

# Programmes de physique-chimie des sections post-bac

## Contenus disciplinaires

Compilés par L. LEVREL

8 février 2022

<b>Sections de technicien supérieur</b>	<b>3</b>
BTS Techniques physiques pour l'industrie et le laboratoire . . . . .	3
BTS Chimiste : physique . . . . .	10
BTS Chimiste : chimie . . . . .	31
<b>Classes préparatoires, filières générales</b>	<b>82</b>
CPGE 1 <sup>re</sup> année BCPST : physique-chimie . . . . .	82
CPGE 2 <sup>e</sup> année BCPST : physique-chimie . . . . .	101
CPGE 1 <sup>re</sup> année MPSI : physique-chimie . . . . .	115
CPGE 2 <sup>e</sup> année MP : physique-chimie . . . . .	143
CPGE 1 <sup>re</sup> année MP2I : physique-chimie . . . . .	166
CPGE 2 <sup>e</sup> année MPI : physique-chimie . . . . .	189
CPGE 1 <sup>re</sup> année PCSI : physique . . . . .	209
CPGE 1 <sup>re</sup> année PCSI : chimie . . . . .	232
CPGE 2 <sup>e</sup> année PC : physique . . . . .	254
CPGE 2 <sup>e</sup> année PC : chimie . . . . .	279
CPGE 2 <sup>e</sup> année PSI : physique-chimie . . . . .	298
<b>Classes préparatoires, filières technologiques</b>	<b>331</b>
CPGE 1 <sup>re</sup> année PTSI : physique-chimie . . . . .	331
CPGE 2 <sup>e</sup> année PT : physique-chimie . . . . .	359
CPGE 1 <sup>re</sup> année TSI : physique-chimie . . . . .	384
CPGE 2 <sup>e</sup> année TSI : physique-chimie . . . . .	408
CPGE 1 <sup>re</sup> année TPC : physique . . . . .	425
CPGE 1 <sup>re</sup> année TPC : chimie . . . . .	440
CPGE 2 <sup>e</sup> année TPC : physique . . . . .	456
CPGE 2 <sup>e</sup> année TPC : chimie . . . . .	472
CPGE 1 <sup>re</sup> année TB : physique-chimie . . . . .	485
CPGE 2 <sup>e</sup> année TB : physique-chimie . . . . .	500



## BTS TECHNIQUES PHYSIQUE POUR L'INDUSTRIE ET LE LABORATOIRE

### TECHNIQUES DES MESURES

Le programme, pour chacune des matières, comporte un certain nombre de rubriques qui seront abordées sur l'ensemble des deux années. L'ordre dans lequel ces rubriques sont étudiées est laissé à l'initiative des professeurs qui tiendront compte, pour organiser leur progression, des projets personnels des étudiants.

On aura constamment à l'esprit la finalité professionnelle du diplôme; on évitera donc les développements mathématiques superflus et l'on privilégiera l'approche concrète, l'étude au laboratoire ou à partir de dispositifs industriels. Cette approche place l'étudiant en situation de recherche, développe son autonomie et permet au professeur de gagner un temps précieux. L'équipe enseignante recherchera toutes les occasions de convergences afin de limiter les redondances par des présentations concertées, de donner l'exemple du travail en commun dont on montre ainsi l'intérêt, et d'entraîner l'étudiant à la vision systémique.

La sécurité et l'environnement ne figurent pas explicitement dans le programme. Cependant, ces notions doivent être systématiquement introduites dans les enseignements dispensés et dans les activités des étudiants.

Il est superflu de reprendre systématiquement les prérequis; de rapides tests préalables doivent permettre aux étudiants de recenser leurs lacunes et de prendre les dispositions nécessaires pour les combler. Il n'y a pas lieu d'effectuer systématiquement l'étude théorique avant la mise en oeuvre d'un phénomène ou d'un appareil.

### I. ELECTRICITE

#### 1. CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE

L'enseignement dispensé sous cette rubrique doit permettre au titulaire du BTS Techniques physique pour l'Industrie et le Laboratoire de:

1. Mettre en oeuvre les composants de l'électronique analogique et numérique.
2. Concevoir et tester des montages réalisant les principales fonctions de l'électronique.
3. Mettre en oeuvre et tester des composants et des montages d'électronique de puissance, d'électrotechniques et d'asservissements.
4. Maîtriser les techniques usuelles de mesures électriques et d'acquisition.

#### 2. PROGRAMME

*L'étude théorique sera réduite au strict minimum. En revanche, on recherchera toutes les occasions de conduire l'étude au laboratoire, dans le cas des composants isolés ou,*

*préférentiellement, au sein de montages. Il n'y a pas lieu de revenir sur les connaissances et savoir-faire exigés des candidats au baccalauréat.*

### **I.1. Circuits électriques.**

Lois générales des réseaux linéaires, dans le cas des régimes continu, sinusoïdal permanent, alternatif non sinusoïdal, transitoire.

Etude énergétique.

Systèmes triphasés équilibrés.

### **I.2. Composants électroniques.**

L'étude porte sur les composants de l'électronique et de l'électronique de puissance.

### **I.3. Electronique.**

*L'étude porte sur l'électronique analogique et sur l'électronique numérique. Elle a pour objectif la maîtrise des différentes fonctions mises en oeuvre dans les domaines de l'acquisition, du traitement et de la transmission des données, ainsi que dans celui du contrôle automatique de processus. Cette maîtrise comprend une connaissance des dispositifs réalisant ces fonctions.*

Production de signaux.

Modulation-démodulation.

Amplification.

Filtrage.

Codage.

Conversions analogique/numérique et numérique/analogique.

### **I.4. Convertisseurs.**

Convertisseurs statiques.

Convertisseurs électromécaniques.

### **I.5. Capteurs et régulation.**

Capteurs. L'étude porte sur le principe de différents capteurs ( température, pression, déplacement, débit, force, par exemple ), sur la réalisation technologique et les conditions d'exploitation. Le laboratoire se prête bien à cette étude.

Régulation. Principe d'une boucle de régulation; aspects fonctionnel et technologique. Fonctions de transfert des système de réglage et des systèmes réglés. Méthodes d'identification du système réglé (Broïda et Stejc) et réglage du régulateur.

Architecture d'un système numérique de contrôle-commande.

II. MECANIQUE**1. CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE**

Les connaissances et savoir-faire en mécanique doivent permettre au titulaire du BTS Techniques physique pour l'Industrie et le Laboratoire de:

1. Comprendre le principe de réalisation et de fonctionnement de dispositifs employés en analyse ou dans les technique du vide.
2. D'analyser ces dispositifs et proposer des solutions susceptibles de les améliorer.
3. D'analyser leurs éventuelles anomalies de fonctionnement et proposer des solutions propres à y remédier.
4. Maîtriser l'ensemble des techniques du vide: mesure des pressions, de débits, réalisation du vide, écoulement des fluides dans des canalisations, etc.

**2. PROGRAMME.****II .1. Eléments de cinématique.**

Cinématique du point.  
Cinématique du solide.

**II.2 . Dynamique du point matériel.**

Quantité de mouvement, moment cinétique, énergie mécanique.  
Lois de la dynamique.

Etude de quelques mouvements ( on se place dans des situations concrètes, sans oublier d'envisager le cas de particules relativistes ).

**II.3 . Systèmes matériels.**

Lois de conservation. ( On donne quelques notions sur les chocs et développe l'effet Compton).

Dans le cas d'un solide : quantité de mouvement, moment cinétique, énergie cinétique. ( On pourra s'intéresser à l'équilibrage d'un rotor, équilibrage statique et équilibrage dynamique; l'approche se fera de manière concrète, sans recours à un appareil mathématique important ).

Contact de deux solides: frottements.

**II.4 . Mécanique des fluides.**

Statique:

la pression, sa mesure, théorème de pascal;  
forces pressantes ( on se limite à des cas simples )  
capillarité.

Dynamique:

lois de l'écoulement;  
mesure de débits  
viscosité  
éléments de dynamique des fluides compressibles.

**III. OPTIQUE, OPTOELECTRONIQUE ET IMAGERIE.****1. CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE**

Les connaissances et savoir-faire en optique doivent permettre au titulaire du BTS Techniques physique pour l'Industrie et le Laboratoire de:

1. Faire l'étude analytique et mettre en oeuvre des appareillages optiques.
2. Choisir et mettre en oeuvre les matériels nécessaires à un montage: sources, composants, capteurs.
3. Maîtriser les techniques de mesures optiques, d'acquisition, de traitement des résultats.
4. Proposer des solutions pour améliorer un appareillage, une méthode.

**2. Programme**

*On aura constamment présent à l'esprit le fait que l'optique ne se réduit pas au visible et qu'elle s'étend à l'ensemble des radiations électromagnétiques, aux ondes mécaniques, aux ondes de de Broglie. Le choix judicieux des exemples permettra d'en donner une illustration convaincante.*

**III .1.Sources et détecteurs.**

Éléments de photométrie.

Emission de lumière:

- \* par les corps portés à haute température, par les gaz et les vapeurs.
- \* émission spontanée, émission stimulée.
- \* sources lumineuses

Détecteurs de lumière:

- \* oeil, émulsion;
- \* photopile, photodiode, photorésistance;
- \* photomultiplicateur, matrice CCD.

Colorimétrie:

- \* synthèse des couleurs;
- \* définition d'une couleur par ses coordonnées trichromatiques.

*Une bonne part de l'étude des sources et détecteurs peut être menée au laboratoire et en liaison avec le cours d'électronique.*

**III .2 Optique géométrique.**

Lois de l'optique géométrique

Formation des images: stigmatisme

Composants optiques: miroirs, dioptrés, lentilles

Systèmes centrés:

- \* éléments cardinaux; à une étude générale et abstraite, on préférera une approche concrète, à partir d'un oculaire par exemple
- \* existence des aberrations chromatiques et géométriques

**III .3. Optique ondulatoire.**

Propagation des ondes:

- \* cohérence temporelle, cohérence spatiale
- \* effet Doppler

Interférences.

*Pour ces trois phénomènes on privilégiera la compréhension du principe, des performances et des limites des techniques, des méthodes, et des appareils qui les mettent en oeuvre, sans en rechercher l'analyse exhaustive.*

Diffraction.

Polarisation.

### III.4. Instrumentation.

Optique guidée:

- \* fibres optiques;
- \* caractéristiques d'une fibre;
- \* senseurs à fibre.

Instruments d'optique: l'étude d'un exemple permet d'introduire les propriétés des instruments.

Spectrométrie

Holographie

Formation d'images par contraste de phase.

Notions d'analyse et de traitement d'images.

IV. THERMODYNAMIQUE ET THERMIQUE.**1. CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE.**

Les connaissances et savoir-faire en thermodynamique et thermique doivent permettre au titulaire du BTS Techniques physique pour l'Industrie et le Laboratoire de:

1. Faire l'étude analytique et mettre en oeuvre des appareillages dans les domaines de la thermique et du vide.
2. Choisir et mettre en oeuvre, en tenant compte des règles de sécurité, les matériels nécessaires à un montage: radiateurs, échangeurs, pompes à vide.
3. Maîtriser les techniques de mesure de pression et de température, les méthodes d'acquisition et de traitement des résultats, être capable de contrôler le vide, de détecter les fuites, de réaliser un dépôt en couche mince.
4. Proposer des solutions pour améliorer un appareillage, une méthode.

**2. PROGRAMME.**

*Ce programme inclut celui de technique du vide qui sera, pour l'essentiel, étudié au laboratoire. L'approche des principes et notions doit être très concrète; elle peut être partiellement conduite au laboratoire au moyen d'une pompe à chaleur par exemple. On n'abusera pas des équations aux dérivées partielles et on aura recours aux diagrammes thermodynamiques aussi fréquemment que possible, afin que les étudiants les utilisent sans hésitation.*

**IV.1. Système thermodynamique.**

Système et milieu extérieur.

Equilibre thermodynamique.

Variables d'état; équation d'état; fonction d'état.

Transferts de chaleur.

**IV.2. Température.**

Mesure des températures

Très basses températures

**IV.3. Premier principe.**

Chaleur et travail.

Premier principe.

Energie interne. Enthalpie.

**IV.4. Les gaz parfaits.**

Equation d'état des gaz parfaits.

Théorie cinétique des gaz.

**IV.5. Second principe.**

Entropie. Energie libre. Enthalpie libre.

*Thermochimie. Cette partie du cours de thermodynamique porte sur les applications à la chimie: équilibre chimique, évolution d'un système. On s'attache à des exemples susceptibles d'illustrer le paragraphe MATERIAUX du cours de chimie.*

**IV.5. Equilibres physiques.**

Changement d'état des corps purs

Relation de Clapeyron

Diagrammes thermodynamiques: TS et diagramme de Mollier



**IV .7. Technique du vide.**

Phénomènes physico-chimiques sous vide:  
adsorption, absorption  
décharges électriques dans les gaz.

Les pompes à vide.

Ecoulement des gaz.

Les mesures de pression.

Applications du vide et de l'ultravide.

## LE CORPUS

Le programme de physique est articulé autour d'un certain nombre "d'entités" caractérisées par des contenus spécifiques internes de savoirs ou de savoir-faire.

### E1 **Météorologie :**

- les grandeurs physiques et unités,
  - mesures et séries de mesures,
  - notions liées aux plans d'expérience.
- La partie électricité est volontairement allégée compte tenu des acquis en filière S ou CLPI. Les connaissances antérieures seront essentiellement ressourcées en TD et TP.
  - La sécurité liée aux courants forts, à l'utilisation des machines tournantes (protection différentielle, terre - masse) sera abordée, là où c'est possible par un professeur de spécialité à l'occasion d'un passage en laboratoire d'électrotechnique, sinon par un intervenant extérieur compétent.
  - Une méthode ne vaut que par l'interprétation critique des résultats de mesure qui en sera faite : la physique, quand elle est au service de cette démarche, permet au jeune technicien de justifier des données significatives, donc utilisables.

### E 2 **Thermodynamique fondamentale (1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> principes)**

appliquée et illustrée pour les développements potentiels en chimie et en génie chimique.

### E 3 **Les phénomènes d'interface.**

- Tension superficielle et interfaciale.
- Phénomènes électriques aux interfaces.

### E 4 **Rhéologie.**

Les industriels signalent que la chimie actuelle s'oriente moins vers la fabrication de nouvelles molécules que vers la formulation de nouveaux produits par des mélanges de molécules existantes. Il semble donc utile de prévoir les développements nécessaires afin que l'étude des propriétés des solutions et des mécanismes de formation des mélanges contribue à la compréhension des techniques utilisées en formulation.

Si la chimie des produits tend aujourd'hui vers une chimie de fonctions d'usage, des professionnels souhaitent qu'elle soit reconnue comme une discipline en tant que telle. Cette discipline comporte donc inévitablement un volet "physique" puisque la formulation a aussi pour objet de définir des cocktails de produits aux propriétés physiques bien déterminées ou "encadrées" pour répondre à un cahier des charges spécifiques ou à des normes précises.

### E 5 **Spectrométrie des particules.**

## E 6 Spectrométrie des rayonnements.

Il ne pouvait être question d'étudier, dans une démarche de nature encyclopédique, chaque méthode d'analyse dans sa spécificité, mais de réaffirmer clairement que les principes sur lesquels reposent ces méthodes d'investigation sont à connaître.

Il ne peut être question de courir après une technologie toujours plus évolutive et prompte à essouffler ceux qui cherchent à la suivre. Si la maîtrise des techniques est fondamentale, le cours de physique n'a pas à dériver vers une "technologie d'appareillage" ni vers un cours de pure instrumentation ; chaque méthode ne peut être abordée dans toute sa complexité aussi complètement que pourrait le faire un chimiste dans l'étude d'une monographie.

Pour autant, il faut souligner la nécessité pour l'étudiant :

- de connaître les bases de la physique pour en comprendre le rôle fondamental dans les analyses chimiques ;
- de maîtriser le "ce sur quoi" reposent les méthodes d'analyses, ce qui est essentiel pour la compréhension de celles-ci ;
- d'être à même de justifier d'un domaine d'analyse et en conséquence de comparer les limites et les mérites de telle ou telle méthode dans une démarche expérimentale.

Les procédés complexes n'ont donc pas à être traités dans le détail.

- RMN.
- Fluorescence X.
- Torche à plasma (ICP)...

Ce qui n'exclut pas pour un étudiant, d'éprouver ces méthodes en stage d'entreprise.

De même, si les techniques du type IRFT deviennent prépondérantes aujourd'hui, (les étudiants ne peuvent ni ne doivent l'ignorer) il ne s'agit pas pour autant, et à cette seule fin, de mettre en oeuvre un cours de traitement du signal qui n'a pas sa place dans le programme d'une section de technicien supérieur Chimiste.

**NB:** certaines notions (énergie mécanique par exemple) ne figurent pas explicitement dans le programme. Le professeur les introduira «en situation», quand elles lui paraîtront nécessaires, par exemple pour l'énergie mécanique dans la partie 2.6 : «Échanges d'un système avec le milieu extérieur».

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>1. MÉTROLOGIE.</b></p> <p><b>1.1. Le système international d'unités et les unités usuelles.</b></p> <p><b>1.2. Equation aux dimensions et homogénéité d'une relation.</b></p> <p><b>1.3. Qualité d'une mesure :</b></p> <p>Erreurs systématiques, fidélité, justesse, précision. Résolution et sensibilité d'un appareil de mesure. Incertitudes sur le résultat : traitement statistique d'une série de mesures ; tendance centrale (moyenne, médiane) ; dispersion (écart-type, étendue) ; intervalle de confiance associé à un niveau de confiance. Cas d'un échantillon de petite taille : méthode de Student ; méthode de l'étendue.</p>	<p>Il ne faudrait pas oublier certaines unités hors système mais dont l'usage reste fréquent (anglo-saxonnes comme le psi ou le <math>\text{cm}^{-1}</math> en spectrophotométrie par exemple). Il convient désormais de privilégier l'utilisation des multiples et des sous-multiples par fraction de mille (M, k, m, <math>\mu</math>, etc...).</p> <p>But à atteindre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- faire comprendre qu'une relation sera exacte (à un coefficient numérique près, s'il y a lieu) dès que les termes de part et d'autre du signe égal s'expriment dans la même unité ; exemple: <math>\lambda = c \times T</math> est peut être exacte tandis que <math>\lambda = c/T</math> est, à coup sûr, fausse !</li> </ul> <p>But :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- être "raisonnable" et crédible dans l'écriture d'un résultat, en particulier sur le nombre de chiffres significatifs lié aux incertitudes.</li> </ul>	<p>Utilisation de ces notions à partir de mesures simples et directes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Exemple : mesures de longueurs, de masses, de densités et de masses volumiques.</li> <li>- Des mesures d'activité d'échantillons radioactifs peuvent fournir des données numériques nombreuses pour les exercices et permettre notamment d'extraire des échantillons d'environ 10 % de la population pour étudier leur représentativité.</li> </ul>

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>1.4. Notion de contrôle de qualité.</b> <b>La norme ISO 9000.</b></p> <p><b>1.5. Rappels et généralités sur les régimes électriques continus.</b></p> <p>Conducteurs (métaux, électrolytes, semi-conducteurs...), nature des porteurs de charges. Tension et intensité d'un courant. Dipôles linéaires : résistances (effet Joule, loi d'Ohm, lois d'association), générateurs de tension, pile (modèle équivalent de Thévenin : f.e.m., résistance interne). Point de fonctionnement. L'A.O. en amplificateur.</p> <p><b>1.6. Recherche d'une relation entre deux grandeurs.</b></p> <p>Linéarisation par changement de repère, régressions linéaires ou autres, extrapolation et interpolation.</p>	<p>L'intervention d'un spécialiste de ces questions dans l'industrie chimique ou dans un organisme agréé semble nécessaire.</p> <p>Il s'agit de rappels de notions acquises dans les classes antérieures. Cette partie du programme doit s'appuyer sur l'intérêt que présente l'électrocinétique en ce qui concerne les capteurs.</p> <p>On insistera sur l'importance d'obtenir un coefficient de corrélation élevé (0,999) pour garantir la validité d'une relation.</p>	<p>- Multimètre - Montages conditionneurs: en pont ; alimentation en courant continu. - Amplification en tension. - On s'efforcera de présenter un modèle des appareils industriels alimentés en 24 V et débitant un courant entre 4 et 20 mA.</p> <p>- A titre indicatif, l'étalonnage d'un capteur à thermistance permet d'illustrer les points suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• incertitudes de fidélité ; courbe d'étalonnage <math>R</math> en fonction de la température <math>t(^{\circ}\text{C})</math> ; recherche de la loi <math>R = f(T(\text{K}))</math> par changement de variables et régression linéaire ou directement,</li> <li>• temps de réponse du capteur à un échelon de température ; recherche de la relation <math>t(^{\circ}\text{C}) = f(\theta(\text{s}))</math>,</li> <li>• mise en équation différentielle et intégration pour constater que le système est du premier ordre.</li> </ul> <p>Ce TP permet une initiation au fonctionnement d'un tableur.</p>

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>2. THERMODYNAMIQUE.</b></p> <p><b>2.1. Pression dans un fluide.</b></p> <p><b>2.2. Température.</b></p> <p>Echelles de températures à 1 ou 2 points fixes. Echelle Celsius, échelle absolue. Echelles pratiques.</p>	<p>On se contentera d'une définition macroscopique du fluide et d'une approche qualitative de la notion de pression en veillant particulièrement à éviter la confusion entre les effets de la pression et ceux d'un champ agissant à distance, en particulier le champ de pesanteur. Le but est d'arriver aux relations :</p> $\frac{dp}{dz} = -\rho \cdot g \text{ et } p = \frac{dF}{dS}$ <p>Il ne s'agit ici que d'une approche simple de la notion de température, sa définition exacte ne pouvant être donnée - éventuellement - que plus tard. Le passage de l'échelle Celsius à l'échelle absolue sera présenté, à ce niveau du cours, simplement par un changement d'origine lié à l'existence d'un zéro fondamental situé 273,15 degrés plus bas que la température d'équilibre solide-liquide de l'eau sous la pression normale. Les échelles pratiques (utilisant le thermomètre à résistance de platine, le thermocouple Pt Rh 10% / Pt et le rayonnement du corps noir) seront simplement présentées sans développement théorique. Aucun exercice portant sur les écarts entre les échelles légales et les "échelles thermométriques" ne pourra être posé à l'examen.</p>	<p>- Etalonnage d'un capteur de pression.</p>

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>2.3. Thermomètres.</b></p> <p>Thermomètres à dilatation de liquides : leurs limites, leurs défauts.</p> <p>Thermomètres électriques à résistance (de platine ou à semi-conducteur).</p> <p>Thermocouples.</p> <p><i>Pyromètres</i> : Constatation expérimentale d'une relation entre la température d'un corps et :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- d'une part l'énergie totale qu'il émet,</li> <li>- d'autre part la répartition spectrale des radiations émises, ce qui conduit à deux types de pyromètres ( à rayonnement total et à rayonnement monochromatique).</li> </ul>	<p>Il paraît impossible d'oublier le thermomètre à dilatation de liquide qui fournit, de plus, une occasion de mettre en évidence la notion de sensibilité d'un appareil. Tout calcul de correction de température, de quelque sorte soit-elle, est totalement hors programme.</p> <p>Pour les thermomètres électriques, on se limitera à faire comprendre le principe de fonctionnement de ces appareils et des montages conditionneurs (pont de mesure ou alimentation à courant constant) utilisés pour un obtenir un signal de sortie qui soit une tension ou une intensité (entrée d'un traceur ou d'un système informatisé). Les travaux pratiques ainsi que de nombreux exercices illustreront ces méthodes.</p> <p>Pour les pyromètres, il s'agit uniquement de faire connaître leur existence et leur domaine d'utilisation. On veillera à rester très proche de l'expérience. On se fondera sur les courbes de la luminance énergétique du corps noir en fonction de la longueur d'onde à différentes températures. Les lois de Wien, Stéfan et Planck peuvent être données sans aucun calcul.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etalonnage d'un capteur de température à thermistance : incertitude de fidélité ; courbe d'étalonnage <math>R = f(\theta^\circ \text{C})</math> ; recherche de la loi <math>R = f(T(\text{K}))</math>.</li> <li>- Etalonnage d'un thermomètre à résistance de platine.</li> <li>- Etalonnage d'un couple thermoélectrique (thermocouple).</li> </ul> <p><i>Des saisies de données informatisées peuvent avantageusement être utilisées.</i></p>

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>2.4. Thermodynamique : son universalité.</b></p> <p>Définition du système thermodynamique et du milieu extérieur : systèmes fermé, ouvert, isolé. Etat du système, paramètres d'état, équation d'état.</p> <p>Variables extensives et intensives. Transformations du système : isobare, isochore, isotherme, adiabatique.</p> <p>Echanges entre le système et le milieu extérieur : travail, chaleur, matière.</p> <p>Conventions de signe.</p>	<p>Il s'agit de donner avec rigueur et précision les définitions indispensables.</p> <p>L'étude des systèmes ouverts n'est pas au programme et ne doit pas donner lieu à de plus amples développements que sa définition, voire son application à l'étude de la détente de Joule-Thomson.</p> <p>On pourra signaler que l'équilibre thermodynamique est lié à l'homogénéité des variables intensives.</p> <p>Pour l'écriture des grandeurs extensives, l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée (UIPPA) recommande de les représenter par une lettre majuscule (<math>V</math> en <math>m^3</math>) <i>en italiques pour la typographie</i>, les grandeurs intensives massiques par une lettre minuscule (<i>italique</i>) (<math>v</math> pour le volume massique en <math>m^3.kg^{-1}</math>, <math>s</math> pour l'entropie massique en <math>J.K^{-1}.kg^{-1}</math>) et les grandeurs intensives molaires par la majuscule affectée de l'indice <math>m</math> (<math>V_m = 22,414 L.mol^{-1}</math> dans les conditions normales).</p> <p>Le travail et la chaleur seront notamment présentés comme des grandeurs d'échange qui n'existent que pendant la durée de la transformation, alors que les différentes formes d'énergie sont des grandeurs permanentes.</p> <p>La convention de signe est : "Quantité positive si reçue par le système, négative si cédée par le système au milieu extérieur" ... même si certains auteurs anglo-saxons en emploient une autre.</p>	



PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>2.5. Premier principe de la thermodynamique : son caractère de conservation.</b></p> <p>Enoncé. Existence d'une fonction d'état : l'énergie totale du système.</p> <p>Cas où l'énergie potentielle et l'énergie cinétique sont constantes : énergie interne du système.</p> <p>Transformations particulières :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- à volume constant ne mettant pas en jeu d'autre forme d'énergie que mécanique : <math>Q_v = \Delta U</math>,</li> <li>- sous pression constante ne mettant pas en jeu d'autre forme d'énergie que mécanique : intérêt de fabriquer la fonction d'état <math>U + pV</math> appelée enthalpie pour avoir <math>Q_p = \Delta H</math>.</li> </ul>	<p>Le premier principe postule l'existence d'une grandeur caractéristique du système qui ne varie pas lors d'une transformation fermée (cyclique) qui est l'énergie totale du système. Ce n'est que si les deux formes d'énergie cinétique et potentielle peuvent être considérées comme constantes que la variation d'énergie totale se réduit à la variation d'énergie interne <math>\Delta U</math>. Cette précaution est nécessaire si l'on veut éviter des ennuis dans l'étude des fluides compressibles.</p> <p>Il faut noter aussi que dans l'expression <math>\Delta U = W + Q</math>, <math>W</math> représente la totalité du travail échangé avec le milieu extérieur. Si, pour nous, ce travail est toujours sous forme mécanique, il peut, pour les chimistes, se présenter sous forme électrique par exemple.</p> <p>En accord avec le professeur de chimie générale, il sera possible d'aborder et/ou de traiter les chaleurs de réaction et leur variation avec la température.</p> <p>Les propriétés des fonctions d'état seront admises sans faire appel au formalisme mathématique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- extensivité ;</li> <li>- principe de l'état initial et de l'état final, conséquence pour les transformations cycliques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enthalpie d'une réaction acide-base.</li> <li>- Enthalpie de combustion (calorimètre de Junkers)</li> <li>- Enthalpie de transition : <ul style="list-style-type: none"> <li style="text-align: right;"><math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math></li> <li style="text-align: center;"><math>\text{Na}_2\text{SO}_4, 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow \quad +</math></li> <li style="text-align: right;"><math>10\text{H}_2\text{O}</math></li> </ul> </li> <li>- Energie interne de réaction à volume constant (bombe calorimétrique).</li> <li>- <math>\Delta H = f(\theta)</math> : enthalpie de dissolution de l'acide benzoïque.</li> </ul>

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>2.6. Calorimétrie.</b></p> <p>Capacité thermique (notée <math>C</math>) d'un système (simple ou composé), capacité thermique massique (notée <math>c</math>) et molaire (notée <math>C_m</math>) d'un corps pur monphasé. Chaleurs latentes massiques et molaires de changement de phase. Méthodes calorimétriques électriques de comparaison et de compensation.</p> <p><b>2.7. Gaz réels.</b></p> <p>Courbes isothermes. Point critique.</p> <p><b>2.8. Le modèle du gaz parfait.</b></p> <p>Le gaz parfait comme limite des gaz réels quand la pression tend vers zéro. Equation d'état. Coefficients thermoélastiques <math>\alpha</math>, <math>\beta</math> et <math>\chi</math>. Masse volumique et densité d'un gaz supposé parfait. Mélange de gaz parfaits ; pressions partielles, fractions molaires.</p>	<p>Pour les notations, on s'efforcera de respecter les recommandations de l'U.I.P.P.A. (cf. 2.4.) en plaçant en dernier l'unité qui rend la grandeur intensive. Ainsi, l'unité de capacité thermique massique est le <math>J.K^{-1}.kg^{-1}</math>.</p> <p>On restera essentiellement qualitatif (descriptif). On pourra donner des exemples d'équations d'état (Van der Waals, Beattie-Bridgeman, ...) ou l'équation du viriel mais on se gardera de tout développement tel que le calcul des coefficients <math>a</math> et <math>b</math> de l'équation de Van der Waals à partir des coordonnées du point critique.</p> <p>La variation de la densité gazeuse au cours d'une réaction chimique en phase gazeuse s'accompagnant d'un changement de la quantité de matière est utilisée en chimie (étude des équilibres). On insistera sur les termes de pression partielle et de fraction molaire en évitant de parler de "proportion en volume", chacun des constituants du mélange occupant à l'évidence la totalité du volume.</p>	<p>- Capacité thermique massique d'un solide ou d'un liquide (pour ce dernier, la méthode de chauffage en régime permanent est toute indiquée). - Enthalpie de changement d'état.</p> <p>- Tracé du réseau des isothermes d'un gaz facilement liquéfiable.</p> <p>- Variation de la pression d'un certain volume d'air avec la température. Détermination de <math>\beta</math>.</p>

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>2.9. Etude énergétique des gaz considérés comme parfaits.</b></p> <p>Lois de Joule et de Joule-Thomson. Capacité thermique massique et molaire ; relation de Mayer. Transformations isochore, isobare, isotherme, adiabatique réelle (appelée ensuite polytropique). Écoulement en régime permanent. Refroidissement par détente.</p> <p>Cycle de Carnot d'un gaz parfait ; rendement théorique d'un cycle réversible.</p>	<p>On s'efforcera de mettre l'accent sur les transformations réelles traduites par une relation <math>p \cdot V^\alpha = cte</math> avec <math>1 &lt; \alpha &lt; \gamma</math>. On constate, en effet, que ces transformations se placent, dans un diagramme de Clapeyron, entre les transformations réversibles isothermes (infiniment lentes avec <math>p \cdot V^1 = cte</math>) et adiabatiques (instantanées avec <math>p \cdot V^\gamma = cte</math>). On fera remarquer que, pour une transformation donnée, l'exposant <math>\alpha</math> dépend des conditions d'échange thermique avec l'extérieur et change donc de valeur avec ces conditions. De même, on insistera sur l'importance de la fonction enthalpie dans les évolutions avec écoulement en régime permanent.</p> <p>Pour le cycle de Carnot, on insistera sur son importance théorique même s'il est impossible de le réaliser.</p>	<p>- Mesure de <math>\gamma</math> par la méthode de Clément &amp; Desormes et par la mesure de la vitesse de propagation du son.</p>

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>2.10.A Le deuxième principe : son caractère non conservatif (création d'entropie).</b></p> <p>Transformations réversibles et irréversibles.            Énoncé du second principe : définition de l'entropie.            Exemples simples de variation de l'entropie dans les phénomènes spontanés.            Définition des fonctions énergie libre et enthalpie libre.</p> <p><b>2.10.B Le troisième principe.</b></p> <p>Définition, entropie d'un corps pur au zéro K, postulat de Nernst, calcul des entropies absolues, utilités et usages des tables de données thermodynamiques.</p>	<p>Si le premier principe est un principe qui permet de faire un bilan d'énergie, le deuxième principe permet d'expliquer l'évolution d'un système vers l'état final observé.            La variation d'entropie d'un système au cours d'une transformation est la somme de deux termes d'échange : l'entropie échangée et l'entropie créée qui donne au second principe son caractère non conservatif.            Pour des raisons d'uniformisation avec les notations des chimistes, on s'efforcera de noter <math>S_e</math> l'échange d'entropie avec le milieu extérieur et <math>S_i</math> l'entropie créée à l'intérieur du système.            On écrira donc <math>\Delta S = S_e + S_i</math> ou <math>dS = \delta S_e + \delta S_i</math>.            Même si les évolutions réversibles sont des cas idéaux inobservables, elles sont incontournables pour évaluer la variation de la fonction d'état entropie entre l'état initial et l'état final d'une transformation. A ce titre, on remarquera que dans l'expression : <math>\delta S_e = \delta Q/T</math>, la température est celle prise à la frontière du système. D'où l'importance de la notion de source de chaleur (thermostat à la température <math>T</math>).</p>	

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>2.11. Changements de phase des corps purs : étude générale.</b></p> <p>Règle des phases. Diagramme d'équilibre : point triple, domaines de stabilité des phases. Relation de Clapeyron. Retard aux changements de phase. Tables d'entropie et d'enthalpie des corps purs. Diagrammes d'état : courbes <math>\ln p(h)</math>, <math>s(T)</math>, <math>h(s)</math>.</p>	<p>L'étude sera essentiellement expérimentale.</p> <p>La démonstration de la relation de Clapeyron est hors programme.</p> <p>Les exercices donneront l'occasion de montrer qu'un même problème peut être résolu soit par des calculs, soit par l'utilisation des tables, soit au moyen de diagrammes. On insistera sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la distinction entre les différents domaines d'existence des phases,</li> <li>- la méthode de placement du point représentatif d'un état sur un diagramme,</li> <li>- les différentes courbes représentant chaque transformation (isentropique, isenthalpique, isobare, isotitre (à teneur en vapeur constante), etc...).</li> </ul> <p>On donnera évidemment une importance particulière à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau.</p>	<p>- Etude expérimentale de l'équilibre liquide - vapeur de l'eau.</p>
<p><b>2.12. Machines et moteurs thermiques.</b></p> <p>Théorème de Carnot.</p> <p>Moteurs thermiques ; efficacité idéale théorique.</p> <p>Machines frigorifiques ; efficacité théorique.</p> <p>Pompes à chaleur ; efficacité théorique.</p>	<p>Le cycle théorique de Carnot permet de calculer la limite supérieure de l'efficacité (efficacité idéale) mais ne peut être réalisé.</p> <p>Les machines thermiques fonctionnant en régime d'écoulement continu, la fonction thermodynamique utile est l'enthalpie.</p>	<p>- Etude d'une pompe à chaleur.</p>

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>3 - PHENOMENES D'INTERFACE.</b></p> <p><b>3.1. Interface liquide pur-gaz.</b></p> <p>Mise en évidence expérimentale (lames liquides, gouttes, ménisques, ascension capillaire, etc...).</p> <p>Origine des phénomènes : interactions de type Van der Waals ; leur rayon d'action.</p> <p>Définitions :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tension superficielle,</li> <li>• énergie libre de surface.</li> </ul> <p>Influence de la pression et de la température.</p> <p>Propriétés des interfaces courbes. Équation de Laplace dans le cas d'une structure sphérique.</p> <p><b>3.2. Interface liquide-solide.</b></p> <p>Phénomène de mouillage : angle de raccordement, condition de Young.</p> <p>Ascension capillaire : loi de Jurin.</p>	<p>On évitera tout développement théorique.</p> <p>On distinguera les phénomènes dus aux interfaces fluide-fluide (gouttes, bulles, films) de ceux liés à l'interface solide-liquide (ménisques, ascension capillaire).</p> <p>On ne manquera pas de remarquer que la sphère est la forme géométrique qui minimise la surface.</p> <p>La résultante des forces de Van der Waals appliquée à une molécule de la surface n'est pas nulle et est orientée vers l'intérieur du liquide.</p> <p>Il ne faut pas perdre de vue que la tension superficielle <math>\sigma</math> est relative à un interface : par abus de langage, on parle de tension superficielle de l'eau alors qu'il faudrait évoquer la tension superficielle de l'interface eau-air.</p> <p>L'énergie libre de surface (<math>F = \sigma S</math>) permet de justifier qu'un équilibre est atteint quand la surface devient minimale.</p>	

PROGRAMME PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>3.3. Tension superficielle des solutions aqueuses.</b></p> <p>Composés tensioactifs : structure moléculaire. Répartition en surface du tensioactif. Loi de Szyskowski. Isotherme de Gibbs.</p> <p><b>3.4. Méthodes de mesure des tensions superficielles et interfaciales.</b></p> <p>Utilisant l'ascension capillaire et/ou capillaire horizontal. Méthodes d'arrachement. Méthodes des gouttes tombantes (loi approchée de Tate). Méthode de la goutte sessile. Méthode de la pression de bulle maximale.</p> <p><b>3.5. Phénomènes électriques aux interfaces.</b></p> <p>Potentiels entre phases : de Galvani, de Volta et de surface. Double couche électrique : potentiel de distribution (d'électrodes, de membranes, entre liquides non miscibles) ; potentiel d'adsorption. Phénomènes électrocinétiques : électro-osmose ; potentiel d'écoulement ; électrophorèse.</p>	<p>Il s'agit d'une sensibilisation aux phénomènes. (2 heures maximum)</p>	<p>- Tension superficielle des solutions aqueuses de corps tensioactifs. Isotherme de Gibbs.</p> <p>- Méthodes de mesure de tension superficielle.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ascension capillaire.</li> <li>• Stalagmométrie (dosage eau - éthanol).</li> <li>• Tensiomètre à lame ou à anneau.</li> <li>• Pression de bulles et goutte sessile si les moyens matériels le permettent.</li> </ul>

PROGRAMME DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>4 - VISCOSITE DES FLUIDES : INTRODUCTION A LA RHEOLOGIE.</b></p> <p><b>4.1. Notions de rhéologie.</b></p> <p>Contrainte de cisaillement, déformation et vitesse de cisaillement. Définition d'un rhéogramme : courbe de la vitesse de cisaillement en fonction de la contrainte de cisaillement.</p> <p><b>4.2. Définitions des coefficients de viscosité.</b></p> <p>Viscosité dynamique <math>\eta</math>, viscosité cinématique <math>\nu</math>, viscosité relative <math>\mu_{rel}</math>, viscosité spécifique <math>\mu_{sp}</math>, viscosité intrinsèque <math>[\mu]</math>. Unités légales et industrielles. Distinction entre fluides newtoniens et non newtoniens.</p> <p><b>4.3. Influence de différents paramètres sur la viscosité.</b></p> <p>Température, pression, nature chimique.</p> <p>Viscosité des solutions et des suspensions : influence du solvant, de la concentration, de la taille et de la forme des particules. Influence de la masse moléculaire pour les solutions de polymères.</p>	<p>L'introduction peut s'appuyer sur un mouvement laminaire plan de cisaillement.</p> <p>C'est essentiellement la viscosité dynamique qui sera utilisée.</p> <p>Cette distinction peut être faite à partir de l'interprétation graphique de la viscosité dynamique sur un rhéogramme.</p> <p>L'influence du temps sera étudiée au paragraphe 4.4. L'influence de la température ne satisfait à aucune théorie et ne fait donc appel qu'à des modèles empiriques.</p> <p>Importance des viscosités relatives et intrinsèques.</p>	<p>- Variation de la viscosité de l'eau avec la température (viscosimètre à capillaire). - Viscosité d'une solution en fonction des concentrations. - Mesure du degré de polymérisation d'une macromolécule de synthèse.</p>



PROGRAMME DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>4.4. Comportement rhéologique et classification des fluides.</b></p> <p>Fluides au comportement indépendant du temps :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- newtoniens ;</li> <li>- fluidifiants (pseudoplastiques) ou épaississants: lois de puissance ;</li> <li>- plastiques : seuil d'écoulement.</li> </ul> <p>Fluides au comportement dépendant du temps :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- thixotropes : rhéogramme à hystérésis.</li> </ul> <p><b>4.5. Méthodes de mesure de viscosité.</b></p> <p>Viscosimètre plan-plan et/ou cône-plan.</p> <p>Viscosimètre capillaire : répartition des vitesses dans un écoulement laminaire ; loi de Poiseuille.</p> <p>Viscosimètre à chute de bille.</p> <p>Viscosimètre rotatif.</p>	<p>Il s'agit d'aborder la description du comportement d'un fluide à partir des exemples.</p> <p>L'étude des modèles rhéologiques est hors programme.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etude de quelques fluides à l'aide d'un viscosimètre rotatif (plan-plan, cône-plan, à cylindres coaxiaux). Tracé de rhéogrammes. Fluides newtoniens, fluidisants, plastiques.</li> <li>- Influence du temps : pâtes thixotropes (yaourts, dentifrices, ...)</li> </ul>

PROGRAMME DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>5. SPECTROMÉTRIE DES PARTICULES.</b></p> <p><b>5.1. Champ et potentiel électrique.</b></p> <p>Lignes de champ ; surfaces équipotentielles.            Champ uniforme.            Action d'un champ électrique sur une particule électrisée au repos ou en mouvement: accélération d'une particule dans un spectrographe de masse ; déviation électrostatique.            Dipôles électriques:            - application aux atomes ; polarisabilité électronique ;            - application aux molécules ; moment dipolaire, hydratation des ions.</p> <p><b>5.2. Champ magnétique.</b></p> <p>Rappel : champ magnétique créé par un solénoïde suffisamment long ou par des bobines d'Helmholtz.            Action d'un champ magnétique sur une particule électrisée en mouvement dans le vide et dans un milieu matériel (effet Hall).            Production d'un faisceau monocinétique de porteurs de charges.            Application aux spectrographes de masse.</p>	<p>C'est l'occasion de revoir la cinématique et la dynamique.            Le théorème de Gauss est hors programme, tout comme les calculs de capacité de condensateurs. On donnera les formules sans démonstration.            La loi de Coulomb peut être évoquée mais ne pourra pas faire l'objet d'une question à l'examen.            On restera à un niveau qualitatif (descriptif).</p> <p>Le théorème d'Ampère et la force de Laplace sont hors programme.</p>	<p>- Expérience de Millikan.</p> <p>- Mesure du quotient <math>q/m</math> pour un électron.</p> <p>- Mesure de champs magnétiques (utilisation de teslamètre).</p>

PROGRAMME DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>5.3. Milieux aimantés.</b></p> <p>Notions sur le diamagnétisme, le paramagnétisme, le ferromagnétisme. Matériaux magnétiques, température de Curie. Production de champs magnétiques.</p> <p><b>5.4. Transformations radioactives.</b></p> <p>Emission de particules <math>\alpha</math>, de particules <math>\beta^-</math>, de particules <math>\beta^+</math>, de photons <math>\gamma</math> ; capture électronique. Production de radioéléments artificiels. Niveaux d'énergie dans le noyau ; énergie de liaison par nucléon. Fission ; fusion. Interactions des rayonnements avec la matière. Atténuation des <math>\gamma</math> et des X : relation <math>\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}</math>. Couche de demi-atténuation. Effets biologiques de l'exposition aux rayonnements: grandeurs caractéristiques: dose absorbée ; débit de dose ; équivalent de dose et leurs unités. Protection contre l'exposition ; parcours moyen d'un ensemble de particules. Récepteurs : compteur de particules.</p>	<p>Il s'agit essentiellement de décrire la production d'un champ magnétique pour un spectromètre de R.M.N..</p> <p>Les mécanismes des différentes transformations seront étudiés. On n'oubliera pas d'évoquer la nécessité de l'existence du neutrino et de l'antineutrino, ni de discuter les spectres d'énergie. L'émission de photons <math>\gamma</math> sera interprétée comme résultant de la désexcitation du noyau fils. L'énergie de liaison sera comptée négativement.</p> <p>Le but est de donner une information précise sur les risques encourus et en même temps de les démystifier. On insistera sur le fait que l'irradiation externe ne présente pas de danger, sauf accident majeur, mais que le risque important est celui de la contamination interne par voie respiratoire ou digestive. On donnera les doses légales autorisées ; et les ordres de grandeur de dose absorbée dans des situations particulières (irradiation d'origine naturelle et humaine) ainsi que les effets observés en fonction de la dose reçue.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection <math>\alpha, \beta, \gamma</math>.</li> <li>- Comptage, échantillonnage.</li> <li>- Absorption.</li> <li>- Etude d'une transmutation avec un générateur de neutrons là où l'équivalent existe.</li> </ul>

PROGRAMME DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<b>6. SPECTROMÉTRIE DES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.</b>		
<p><b>6.1. Généralités sur les ondes.</b></p> <p>Double périodicité. Ondes transversales et longitudinales. Principe de superposition (amplitudes faibles). Réflexion, réfraction. Interférences. Diffraction.</p> <p><b>6.2. Nature ondulatoire de la lumière.</b></p> <p>Interférences. Expériences de diffraction à l'infini par une fente rectangulaire. Vue d'ensemble du spectre électromagnétique.</p> <p>Diffusion Rayleigh.</p> <p>Polarisation rectiligne de la lumière : loi de Malus ; pouvoir rotatoire de certaines substances.</p>	<p>Cette partie du cours sera présentée au moyen de la cuve à ondes.</p> <p>Cette partie sera traitée sous forme de TP-cours. L'ordre de présentation des interférences et de la diffraction est laissé libre. L'important est la mise en évidence de la relation entre la largeur de la tache centrale de diffraction et la largeur de la fente. Il faut donc montrer l'existence des minima d'éclairement et repérer leurs positions. Cette partie doit rester essentiellement qualitative.</p>	<p>- Polarimètre de Laurent.</p>
<p><b>6.3. Etude des sources de radiations électromagnétiques.</b></p> <p>De l'ampoule à incandescence au tube de Crookes en passant par le laser.</p> <p>Photométrie : flux, éclairement.</p>	<p>Lampe à incandescence (spectre continu). Lampes spectrales : spectre discontinu. Laser : mécanisme de l'émission, cavité résonante, cohérences. On se limitera aux définitions pour des rayonnements quasi monochromatiques.</p>	

PROGRAMME DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>6.4. Approximation de l'optique géométrique.</b></p> <p>Réflexion.</p> <p>Réfraction, réfraction limite, réflexion totale.</p> <p>Lentilles minces convergentes dans les conditions de Gauss.</p>	<p>Réflexion : on tiendra compte du fait que dans certains spectroscopes la marche des rayons est assurée par des miroirs à symétrie sphérique ( mais tout développement sur le mode de fonctionnement est banni).</p> <p>Réfraction : on n'oubliera pas d'évoquer le principe de fonctionnement des réfractomètres, ni celui des fibres optiques</p> <p>Lentilles : leur seul rôle en spectroscopie est de donner dans le plan du spectre des images différentes (raies) d'une même fente d'entrée. La relation intéressante est donc <math>dx \approx f \cdot d\alpha</math>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etude expérimentale des lentilles (pas de focométrie).</li> <li>- Principe du collimateur.</li> <li>- Principe de la lunette de visée.</li> </ul>
<p><b>6.5. Systèmes dispersifs à réseau.</b></p> <p>Différences avec les appareils à transformée de Fourier.</p> <p>Diffraction des rayons X par les cristaux.</p>	<p>Le prisme sera vu exclusivement en TP en raison de son intérêt historique et pédagogique.</p> <p>Pour le réseau, on se limitera aux conditions d'utilisation classiques (<math>i=0</math> ; <math>D_m=0</math> ; spectre normal).</p> <p>Aucune démonstration de formule ne sera demandé à l'examen. Aucune formule ni aucun sens d'orientation ne sera imposé à l'examen.</p> <p>Tout schéma devra avoir une orientation explicitée.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etude du prisme et du réseau en lumière monochromatique.</li> <li>- Etude du prisme et du réseau en lumière polychromatique.</li> </ul>
<p><b>6.6. Capteurs de lumière.</b></p> <p>Cellule photovoltaïque.</p> <p>Photomultiplicateurs (il est évident qu'il faudra parler de la cellule photoélectrique).</p> <p>Capteur CCD.</p> <p>Photodiode.</p> <p>Photorésistor.</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en œuvre de capteurs.</li> </ul>

PROGRAMME DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES	PROPOSITION DE TRAVAUX PRATIQUES
<p><b>6.7. Méthodes spectroscopiques.</b></p> <p>6.7.1. Spectroscopie I.R.. Notions sur la théorie classique et quantique des vibrations dans l'IR ; spectres de raies et spectres de bandes ; principe des spectromètres IR. Spectroscopie Raman.</p> <p>6.7.2. Spectroscopie d'absorption U.V. et visible. Loi de Beer-Lambert ; spectres électroniques ; principe des spectromètres.</p> <p>6.7.3. Spectroscopie et fluorescence X. Principe d'obtention d'un spectre X.</p> <p>6.7.4. R.M.N.. Principe ; interaction spin/champ ; noyaux étudiés en RMN ; noyau <math>s=1/2</math> ; fréquence de Larmor ; déplacement chimique ; les deux catégories d'appareils.</p>	<p>On s'intéresse aux phénomènes physiques plus qu'au dépouillement des spectres.</p> <p>Cette source d'information est complémentaires de l'infrarouge sur la structure des molécules. On veillera à bien définir le flux d'énergie lumineuse et de définir la transmittance et l'absorbance à l'aide des flux lumineux et non des intensités lumineuses.</p>	<p>- Utilisations de spectromètres. L'aspect «physique» sera prépondérant : exemples ; influence de la largeur de la fente, influence de l'amplification dans la résolution d'un spectre.</p>

## CHIMIE GÉNÉRALE ET INORGANIQUE : COURS DE PREMIÈRE ANNÉE.

PROGRAMME DE PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES
<p><b>A) STRUCTURE DE LA MATIÈRE.</b></p> <p><b>Préambule.</b></p> <p><b>L'importance accordée au programme d'atomistique est justifiée, en particulier par ses diverses applications en spectroscopie</b></p> <p><b>I - L'atome.</b></p> <p>I-1- Ses constituants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– électron ;</li> <li>– noyau: neutron, proton ;</li> <li>– nombres de masse et de charge ;</li> <li>– nucléide, élément, isotope ;</li> <li>– masse atomique relative.</li> </ul> <p>I-2- Le modèle quantique de l'atome.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Mise en évidence expérimentale de la quantification de l'énergie des atomes : spectre de raies.</li> <li>– Onde associée à une particule, probabilité de présence de l'électron ; nombres quantiques <b>n, l, m</b>, orbitale atomique ; géométrie des orbitales <b>s, p, d</b>.</li> <li>– Spin de l'électron, nombre quantique de spin.</li> <li>– Configuration électronique des atomes dans leur état fondamental : principe de Pauli, règle de Klechkowski et règle de Hund.</li> </ul>	<p>Ce paragraphe constitue un rappel de connaissances acquises.</p> <p>Aucun calcul relatif aux expériences historiques (Millikan, Rutherford) ne sera envisagé.</p> <p>Cohésion, défaut de masse, fission, radioactivité sont traités en physique.</p> <p>Les calculs concernant l'identification sont hors programme. Les méthodes de séparation pourront être sommairement décrites.</p> <p>Aucun calcul ni aucune question ne seront posés sur le modèle de Bohr.</p> <p>Les règles de Slater ne sont pas au programme.</p> <p>L'équation de Schrödinger n'est pas au programme.</p>

PROGRAMME DE PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES
<p><b>II - Classification périodique des éléments à partir du modèle quantique de l'atome.</b> (environ 4 heures)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Construction : historique et classification actuelle.</li> <li>– Périodicité des propriétés atomiques : <ul style="list-style-type: none"> <li>• énergie d'ionisation, affinité électronique ;</li> <li>• électronégativité de Pauling ;</li> <li>• notion de pouvoir polarisant et de polarisabilité.</li> </ul> </li> </ul> <p><b>III - La liaison chimique.</b></p> <p>III - 1- La liaison covalente.</p> <p>III - 1.1 - Exploitation de données expérimentales pour déterminer :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– les constantes de force, longueurs et énergies de liaison,</li> <li>– la géométrie, les moments dipolaires et les propriétés magnétiques des molécules.</li> </ul> <p>III - 1.2 - Structure électronique des molécules.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Liaison covalente localisée : notation de Lewis, règle de l'octet et règle des dix huit électrons.</li> <li>– Liaison covalente délocalisée : mésomérie - résonance.</li> <li>– Préviation de la géométrie par la méthode de répulsion des paires électroniques de la couche de valence (VSEPR).</li> <li>– Niveaux énergétiques électroniques : <ul style="list-style-type: none"> <li>• principe de construction des orbitales moléculaires par combinaison linéaire d'orbitales atomiques ;</li> <li>• diagramme des orbitales moléculaires des molécules diatomiques.</li> </ul> </li> </ul>	<p>La représentation en 18 colonnes est recommandée par l'U.I.C.P.A..</p> <p>Les évolutions et les analogies dans les colonnes et les lignes seront mises en évidence.</p> <p>L'existence d'autres échelles d'électronégativité sera signalée.</p> <p>La présentation de résultats d'expériences en spectroscopie IR (molécules diatomiques), électricité, magnétisme, a pour but d'introduire le modèle de liaison. Les techniques de mesure et les calculs relatifs à la spectroscopie sont hors programme.</p> <p>Le principe de construction sera limité à l'interaction entre deux orbitales atomiques. On se limite aux éléments de la deuxième période.</p>



PROGRAMME DE PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES
<p>– Etude des complexes : structure électronique ; géométrie.</p> <p>III - 2- Autres interactions fortes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– interaction ionique,</li> <li>– liaison métallique.</li> </ul> <p>III - 3 - Interactions faibles :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– liaison de Van der Waals,</li> <li>– liaison hydrogène.</li> </ul> <p><b>IV - L'état solide.</b></p> <p>IV - 1 - Présentation de l'état cristallin : réseaux, nœuds, maille, motif, coordinence, compacité ;</p> <p>IV - 2 - Les édifices métalliques :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– réseau cubique centré ;</li> <li>– assemblages compacts : cubique faces centrées - hexagonal compact ;</li> <li>– existence de sites interstitiels tétraédriques et octaédriques ;</li> <li>– alliages d'insertion et de substitution : structure, exemples.</li> </ul> <p>IV - 3 - Les édifices ioniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– description des divers types de structures : CsCl, NaCl, ZnS (blende), CaF<sub>2</sub> ;</li> <li>– relations entre type structural et rayons ioniques dans le cas des composés AB.</li> </ul> <p>IV - 4 - Les édifices covalents et moléculaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– carbone : diamant, graphite ;</li> <li>– cristaux moléculaires : diiode, dioxyde de carbone, glace.</li> </ul>	<p>La structure électronique est envisagée dans le cadre de la théorie du champ cristallin appliquée aux complexes octaédriques. Les propriétés magnétiques des complexes seront évoquées à cette occasion. La nature du ligand ( champ fort, champ faible ) sera précisée le cas échéant. Aucune connaissance sur l'isomérisation n'est exigible.</p> <p>Le modèle de bandes pourra être esquissé de façon très sommaire dans le but de distinguer conducteurs, isolants et semi-conducteurs. On introduira à cette occasion les notions de rayon ionique et de rayon métallique.</p> <p>On insistera sur l'influence de ces liaisons sur les propriétés physico-chimiques. On introduira la notion de rayon de Van der Waals.</p> <p>Les quatorze réseaux de Bravais, les indices de Miller, la loi de Bragg ne sont pas au programme.</p> <p>Le dénombrement et le calcul des dimensions des sites ne seront effectués que dans le cas du réseau cubique compact.</p> <p>Le calcul de l'énergie réticulaire sera fait en thermo chimie en utilisant le cycle de Born-Haber. Le calcul de la constante de Madelung est exclu.</p>

PROGRAMME DE PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES
<p><b>B) THERMODYNAMIQUE CHIMIQUE.</b></p> <p>En liaison avec le cours de physique où les grandeurs U, H, S, G ont été introduites.</p> <p>I - Le système thermodynamique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- description d'un système fermé en réaction chimique : avancement de la réaction ;</li> <li>- état standard d'un constituant pur : grandeur molaire standard.</li> </ul> <p>II - Applications du premier principe - thermochimie. Système fermé siège d'une transformation physicochimique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- énergie interne standard de réaction <math>\Delta_r U^\circ</math> ;</li> <li>enthalpie standard de réaction <math>\Delta_r H^\circ</math> ;</li> <li>enthalpie standard de formation <math>\Delta_f H^\circ</math>.</li> <li>- variation de ces grandeurs avec la température ; température de flamme.</li> </ul> <p>III - Application du 2ème principe aux réactions chimiques.</p> <p>Critère d'évolution spontanée d'un système :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- entropie de réaction <math>\Delta_r S</math> ; variation de cette grandeur avec la température,</li> <li>- potentiel chimique,</li> <li>- enthalpie libre de réaction <math>\Delta_r G</math> ; expression en fonction du produit <math>\pi</math> (<math>\Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln \pi</math>).</li> </ul> <p>Équilibre chimique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- condition d'équilibre ;</li> <li>- constante thermodynamique <math>K^\circ(T)</math> ;</li> <li>- variation de <math>K^\circ</math> avec la température ; relation de Van't Hoff ;</li> <li>- détermination de la composition d'un système à l'équilibre (équilibre homogène gazeux, liquide ; équilibre hétérogène) ;</li> <li>- déplacement d'équilibre ;</li> <li>- variance.</li> </ul>	<p>On envisagera des exemples faisant intervenir des changements d'état.</p> <p>On envisagera des exemples faisant intervenir des changements d'état. On se limitera à son expression. La relation de Gibbs-Duhem est hors programme. La démonstration de cette relation ne pourra être exigée des élèves.</p> <p>On pourra choisir des exemples industriels.</p> <p>On se limitera à une étude qualitative. La formule de Gibbs sera donnée sans démonstration.</p>

PROGRAMME DE PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES
<p><b>C ) RÉACTIONS EN SOLUTION AQUEUSE.</b></p> <p><b>Préambule.</b></p> <p>La réflexion sur les phénomènes sera privilégiée en évitant toute dérive calculatoire. Tous les calculs seront effectués sur les concentrations, et non sur les activités. L'étude de la solution sera envisagée à partir de la réaction prépondérante. Un calcul faisant intervenir plus de deux réactions prépondérantes simultanément ne sera pas exigé. La liaison avec les travaux pratiques d'analyse sera largement privilégiée. La détermination des domaines de prédominance ou d'existence des espèces acido-basiques, des complexes, des précipités, des oxydants et réducteurs sera systématique. En ce qui concerne les courbes de dosage, on utilisera une simulation par ordinateur pour obtenir la composition de la solution. Il ne sera pas fait de calculs conduisant à l'établissement des courbes de dosage. L'établissement de diagrammes logarithmiques ne sera pas exigible.</p> <p>I - L'eau.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Permittivité relative, conductivité, ionisation ; structure et mobilité du proton hydraté ; autoprotolyse de l'eau, produit ionique.</li> <li>- Solvatation et solvolysse.</li> <li>- Electrolyte fort, électrolyte faible.</li> </ul> <p>II - Réactions acide-base (formulation de Brönsted).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Définition des acides et des bases.</li> <li>- Calcul du pH des solutions aqueuses.</li> </ul> <p>- Solutions tampon.</p> <p>III - Réactions de précipitation.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Solubilité et produit de solubilité.</li> <li>- Condition de précipitation.</li> <li>- Effet d'ion commun.</li> <li>- Influence du pH sur la solubilité.</li> </ul> <p>IV - Réactions de complexation.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stabilité des complexes.</li> <li>- Complexations compétitives.</li> <li>- Complexe et précipitation.</li> <li>- Complexe et pH.</li> </ul>	<p>Le choix de l'ordre de grandeur des concentrations sera guidé par les cas rencontrés en travaux pratiques d'analyse (pas de concentrations très faibles). Le nombre de réactions prépondérantes à envisager sera déterminé par un critère simple comme par exemple la comparaison des produits <math>K_a \times c</math> pour des acides en compétition. Le pouvoir tampon sera défini mais ne fera pas l'objet de calculs.</p> <p>L'effet d'ions non communs ne sera pas envisagé. On se limitera à des exemples simples.</p> <p>On définira les constantes successives et la constante globale. On se limitera à des exemples simples.</p>

PROGRAMME DE PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES
<p>V - Réactions d'oxydo-réduction.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Couple redox : définition, potentiel redox standard, formule de Nernst.</li> <li>- Prévion qualitative et quantitative des réactions ; détermination des constantes d'équilibre.</li> <li>- Oxydo - réduction et pH : diagrammes conditionnels potentiel-pH.</li> <li>- Oxydo - réduction et complexation : diagrammes potentiel-pL.</li> <li>- Oxydo - réduction et précipitations : diagrammes potentiel-pX.</li> </ul>	<p>La formule de Nernst sera donnée sans démonstration. On utilisera la relation : <math>\Delta rG^{\circ} = - n FE^{\circ}</math>.</p> <p>Les conditions nécessaires à l'établissement des diagrammes seront choisies dans un souci de simplification des calculs. Toutes les espèces dissoutes seront supposées exister en solution à la même concentration. L'accent sera mis sur l'exploitation du diagramme qui sera, notamment, utilisée en chimie minérale.</p> <p>Les diagrammes de Frost ne sont pas exigés.</p>

## CHIMIE GÉNÉRALE ET INORGANIQUE : COURS DE DEUXIÈME ANNÉE.

PROGRAMME DE DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES
<p><b>A ) CINÉTIQUE CHIMIQUE.</b></p> <p>1 - Définition générale de la vitesse d'une réaction chimique dans le cas d'un réacteur fermé et de composition uniforme : vitesses de disparition et de formation d'un constituant, vitesse globale de réaction.</p> <p>2- Influence des concentrations sur la vitesse d'une réaction ; ordre de réaction ; méthodes expérimentales de détermination.</p> <p>3 - Étude de quelques types de réaction :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- réactions totales d'ordre 0, 1 et 2 (proportions quelconques),</li> <li>- réactions d'ordre 1 donnant lieu à un équilibre chimique,</li> <li>- réactions successives d'ordre 1,</li> <li>- réactions parallèles d'ordre 1.</li> </ul> <p>4 - Influence de la température. Energie d'activation.</p> <p>5 - Notions de mécanismes réactionnels en cinétique homogène.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Molécularité.</li> <li>- Processus élémentaires : intermédiaires de réaction, état de transition.</li> <li>- Approximation de l'état quasi-stationnaire.</li> <li>- Approximation de l'étape cinétiquement déterminante.</li> <li>- Application à la vérification de mécanismes réactionnels, postulat de Hammond, contrôles cinétique et thermodynamique.</li> </ul>	

PROGRAMME DE DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES
<p>6 - Catalyse homogène et hétérogène.</p> <p><b>B ) CHIMIE MINÉRALE.</b></p> <p>Cette étude s'appuie sur toutes les notions acquises en chimie générale, c'est pourquoi elle se situe en deuxième année.</p> <p>L'étude des composés en solution aqueuse se fait plutôt à travers le cours de chimie générale et au laboratoire. L'accent sera mis sur l'importance industrielle des composés choisis.</p> <p>1 - L'oxygène.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Etude de la molécule de dioxygène.</li> <li>- Réactivité du dioxygène gazeux</li> <li>- Etude des oxydes ; <ul style="list-style-type: none"> <li>• classification structurale,</li> <li>• évolution du caractère acido-basique,</li> <li>• stabilité et réduction : diagramme d'Ellingham.</li> </ul> </li> </ul> <p>2 - Le chlore.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Etude de la molécule de dichlore.</li> <li>- Réactivité du dichlore gazeux.</li> <li>- Etude du chlore en solution aqueuse : exploitation du diagramme potentiel-pH.</li> <li>- Préparation industrielle du dichlore.</li> <li>- Evolution des propriétés des halogènes : <ul style="list-style-type: none"> <li>• propriétés physiques des atomes, des molécules <math>X_2</math>, et <math>HX</math>,</li> <li>• propriétés oxydo-réductrices de <math>X_2</math> en solution aqueuse.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Se limiter à des notions très simples pour cette étude ; ne présenter aucun calcul sur la catalyse hétérogène.</p> <p>Signaler l'importance de la catalyse enzymatique sans l'aborder du point de vue formel ; le modèle de Michaelis peut être explicité sans être exigible à l'examen.</p> <p>On signalera, à coté du mélange fer-carbone, les mélanges d'oxydes de métaux ayant une application industrielle (ex : silice-alumine).</p> <p>On se limitera aux espèces de degrés d'oxydation (- I, 0, +I).</p> <p>On utilisera les courbes intensité-potential <math>I = f(E)</math>.</p>

PROGRAMME DE DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES
<p>3 - L'ammoniac et l'acide nitrique.</p> <p>3-1- L'ammoniac.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Synthèse industrielle.</li> <li>- Réactivité de l'ammoniac gazeux.</li> <li>- L'ammoniac liquide : <ul style="list-style-type: none"> <li>• propriétés acido-basiques du solvant, comparaison avec l'eau,</li> <li>• propriétés oxydo-réductrices.</li> </ul> </li> </ul> <p>3-2- L'acide nitrique.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriétés acides et propriétés oxydantes.</li> <li>- Préparation industrielle.</li> <li>- Notions sur l'industrie des engrais azotés.</li> </ul> <p>4 - L'acide sulfurique.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Préparation industrielle, importance industrielle.</li> <li>- Propriétés acides et propriétés oxydantes.</li> <li>- Notions sur l'industrie des divers types d'engrais.</li> </ul> <p>5- Quelques métaux, alliages, matériaux.</p> <p>5-1 Généralités sur les métaux.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriétés physiques et mécaniques, intérêt des alliages ;</li> <li>- Grands principes de la métallurgie : <ul style="list-style-type: none"> <li>• méthodes chimiques,</li> <li>• méthodes électrochimiques : exemple de l'aluminium,</li> <li>• affinage.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Le calcul relatif à l'optimisation du rendement par le choix des proportions des réactifs ne sera pas envisagé.</p> <p>Aucun calcul en milieu non aqueux ne sera exigé.</p> <p>Par le procédé de contact.</p>

PROGRAMME DE DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES
<p>5-2 L'uranium.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Élément, propriétés radioactives, enrichissement isotopique.</li> <li>– Le cycle du combustible nucléaire : <ul style="list-style-type: none"> <li>• élaboration du combustible à partir du minerai,</li> <li>• retraitement.</li> </ul> </li> <li>– Propriétés réductrices de l'uranium.</li> </ul> <p>5-3 Le fer.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Diagramme potentiel-pH simplifié et application à la corrosion.</li> <li>– Métallurgie : <ul style="list-style-type: none"> <li>• obtention de la fonte,</li> <li>• passage de la fonte à l'acier,</li> <li>• notions succinctes sur les aciers spéciaux.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Aucun détail technologique sur les centrales nucléaires ne sera exigé.</p> <p>On utilisera, sans le construire, le diagramme faisant intervenir <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math>.</p> <p>On étudiera le diagramme simplifié fer-carbone sans le construire. A cette occasion, la notion de diagramme binaire solide-liquide sera introduite.</p>



**ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE.  
TRAVAUX PRATIQUES  
DE PREMIERE ANNEE.**

PROGRAMME DE PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES
<p><i>On se limitera aux réactions en solution aqueuse. L'ordre de progression est laissé à l'initiative du professeur</i></p>	
<p><b>Thèmes</b></p> <p>– DOSAGES ACIDO-BASIQUES :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• utilisation d'indicateurs colorés ;</li> <li>• pHmétrie ;</li> <li>• conductimétrie.</li> </ul> <p>– DOSAGE PAR PRÉCIPITATION :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• gravimétrie ;</li> <li>• volumétrie : méthodes de Mohr et Charpentier Volhard ;</li> <li>• potentiométrie (<math>i = 0</math>) ;</li> <li>• conductimétrie.</li> </ul> <p>– DOSAGES PAR COMPLEXATION. Utilisation de l'EDTA disodique (avec indicateur coloré) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• dosage direct ;</li> <li>• dosage en retour ;</li> <li>• dosage par substitution.</li> </ul>	<p>Substances étalons à reconnaître :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– étalons primaires ; <ul style="list-style-type: none"> <li>– acide benzoïque,</li> <li>– hydrogénophtalate de potassium,</li> <li>– hydrogénodiiodate de potassium,</li> <li>– hydrogénocarbonate de potassium,</li> <li>– carbonate de sodium.</li> </ul> </li> <li>– étalons secondaires ; <ul style="list-style-type: none"> <li>– acide oxalique,</li> <li>– tétraborate de disodium.</li> </ul> </li> </ul> <p>L'utilisation d'un titrateur automatique doit être envisagée.</p> <p>En gravimétrie, on se limitera à un dosage.</p> <p>Substances étalons ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– carbonate de calcium,</li> <li>– métaux purs (zinc, cuivre, magnésium).</li> </ul>

PROGRAMME DE PREMIÈRE ANNÉE	COMMENTAIRES
<p>– DOSAGES D’OXYDORÉDUCTION :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• utilisation d’indicateurs colorés ;</li> <li>• potentiométrie (<math>i = 0</math>) ;</li> <li>• manganimétrie ;</li> </ul> <p>• iodométrie ;</p> <p>• cérimétrie ;</p> <p>• chromimétrie.</p> <p>– DOSAGES PAR SPECTROPHOTOMÉTRIE D’ABSORPTION MOLÉCULAIRE (UV, VISIBLE) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tracé de spectres d’absorption ;</li> <li>• dosages : méthode de la gamme d’étalonnage.</li> </ul> <p>– DOSAGE PAR SPECTROPHOTOMÉTRIE D’ABSORPTION ATOMIQUE ET D’ÉMISSION ATOMIQUE.</p> <p>– PROPRIÉTÉS ANALYTIQUES D’IONS EN SOLUTION AQUEUSE. Les exemples seront choisis parmi les ions rencontrés en analyse quantitative et en chimie minérale.</p>	<p>Indicateurs colorés : diphénylaminesulfonate de sodium ou de baryum, orthophénanthroline fer (II).</p> <p>Substances étalons : oxalate de sodium, acide oxalique, sel de Mohr. On proposera en outre : la méthode de Zimmerman-Reinhardt.</p> <p>Substances étalons : iodate de potassium, hydrogénodiodate de potassium, trioxyde de diarsenic, dichromate de potassium.</p> <p>Détermination de la D.C.O..</p> <p>On introduira la méthode des ajouts dosés. On signalera l’importance croissante des torches à plasma (ICP).</p> <p>Cette étude basée sur une approche raisonnée plutôt que descriptive, permettra d’illustrer les grands types de réactions.</p>

**ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE:  
TRAVAUX PRATIQUES  
DE DEUXIÈME ANNÉE.**

PROGRAMME DE DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES
<p><b>A) Thèmes.</b></p> <p>METHODES ELECTROCHIMIQUES.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Étude des courbes intensité-potentiel.</li> <li>– Applications : <ul style="list-style-type: none"> <li>• polarographie ;</li> <li>• ampérométrie ;</li> <li>• potentiométrie à courant nul : <ul style="list-style-type: none"> <li>– utilisation d'électrodes spécifiques,</li> <li>– utilisation d'une électrode de mercure : <ul style="list-style-type: none"> <li>* mercurimétrie : dosage des ions chlorures et de l'EDTA,</li> <li>* dosage de cations en présence du complexe mercure-EDTA ;</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• potentiométrie à courant imposé ;</li> <li>• électrogravimétrie.</li> </ul> </li> </ul> <p>METHODES OPTIQUES : SPECTROPHOTOMETRIE D'ABSORPTION MOLECULAIRE :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• dosage d'un mélange de substances ;</li> <li>• dosage photométrique par suivi d'absorbance en fonction du volume de réactif versé.</li> </ul>	<p>Étude expérimentale : système rapide - système lent. Étude théorique très simplifiée dans laquelle on ne donne pas de développements mathématiques.</p> <p>Utilisation en analyse qualitative. Dosage d'un ion, d'un mélange d'ions ou d'un composé organique. Méthodes à une et deux électrodes indicatrices (telles que mercure, platine, argent). Exemples : électrodes à fluorure, à nitrate, ...</p> <p>On se limitera au montage à deux électrodes indicatrices.</p> <p>On pourra utiliser une fibre optique.</p>

PROGRAMME DE DEUXIÈME ANNÉE	COMMENTAIRES
<p>CHROMATOGRAPHIE SUR RESINES ECHANGEUSES D'IONS.</p> <p>TECHNIQUES SPECIFIQUES.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosages d'acides ou de bases très faibles.</li>   <li>• Dosage de l'azote par la méthode de Kjeldahl.</li> <li>• Dosage de l'eau par la méthode de Karl Fischer.</li> </ul> <p>DOSAGES DE SUBSTANCES ORGANIQUES</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Détermination des indices d'iode, d'acide, d'ester et de saponification.</li> <li>• Dosages de substances telles que : alcool, cétone, aldéhyde, phénol, amine.</li> </ul> <p>ÉTUDE DE CINETIQUES DE REACTIONS.</p> <p>DETERMINATION DE CONSTANTES THERMODYNAMIQUES.</p> <p><b>B) Couplage de méthodes analytiques.</b></p> <p>Après l'étude des différents thèmes, on combinera les techniques acquises au cours des deux années à l'occasion de séances récapitulatives.</p> <p><b>C) Compléments sur les appareillages professionnels.</b></p> <p>Organisation de visites (laboratoires, sites industriels).</p>	<p>On soulignera l'importance croissante de la chromatographie ionique.</p> <p><i>Exemples :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– acide borique en présence de polyols,</li> <li>– acide phosphorique en présence d'ions <math>\text{Ag}^+</math>,</li> <li>– ions <math>\text{NH}_4^+</math> ou acides aminés en présence de méthanal,</li> <li>– en milieu non aqueux ; dosage de l'hydrogénophtalate de potassium par l'acide perchlorique, en milieu acide acétique.</li> </ul> <p><i>Exemples :</i> analyse des eaux, engrais, ciments, détergents, alliages, bains industriels, ...</p> <p>Progressivement l'étudiant devra choisir de manière autonome les méthodes et, en conséquence, les appareils à utiliser. Il devra savoir consulter des tables de données.</p> <p><i>Exemples :</i> torche à plasma, fluorescence X, chromatographie ionique, microscope électronique,...</p>

## CHIMIE ORGANIQUE : COURS DE PREMIERE ET DEUXIEME ANNEE.

### Préambule.

L'ordre présenté ci-dessous ne l'est qu'à titre indicatif, et il couvre les deux années. D'autres progressions sont possibles. L'exercice de la liberté pédagogique ne doit pas faire oublier que certains étudiants changent d'établissement entre la classe de STS1 et celle de STS2.

PROGRAMME	COMMENTAIRES
<b>A) CHIMIE ORGANIQUE GÉNÉRALE.</b>	
1- Détermination d'une formule brute.	On se limitera à l'exploitation des résultats de la microanalyse élémentaire limitée à C, H, O, N, S et halogènes, la masse molaire étant fournie.
2- L'atome de carbone et ses liaisons.	On se limitera à une description géométrique des liaisons dans la molécule (direction, longueur, symétrie, ...). Représentations développées, semi-développées et topologiques.
3- Isomérie.	La manipulation de modèles moléculaires pour concrétiser les notions abordées dans ce paragraphe se fera en travaux dirigés.
3.1 - Isomérie structurale.	
3.2 - Introduction à la stéréochimie : <ul style="list-style-type: none"> <li>• représentations graphiques des molécules ;</li> <li>• notions de conformation et configuration.</li> </ul>	Représentations perspective, de Cram, de Newman, de Fischer et de Haworth.
3.3 - Analyse conformationnelle.	Diagrammes énergétiques (Ep en fonction de $\alpha$ (angle du dièdre)) ; cas des chaînes saturées simples non cycliques et cycliques ; cas des diènes conjugués.

PROGRAMME	COMMENTAIRES
3.4 - Isomérisation de configuration : <ul style="list-style-type: none"> <li>• chiralité, activité optique ;</li> <li>• énantiomérisation ;</li> <li>• diastéréoisomérisation ;</li> <li>• lien entre chiralité et activité biologique.</li> </ul>	Règles séquentielles de Cahn-Ingold-Prelog ; nomenclatures R, S et D, L. On étudiera principalement les molécules possédant un centre d'asymétrie ; on évoquera le cas des allènes, des hydrures spiraniques et des biphényles ortho-disubstitués.  Principes de résolution des racémiques.  Cas des doubles liaisons (nomenclature Z,E) ; cas des cyclanes (nomenclature cis-trans) ; cas des stéréoisomères non cycliques et cycliques ayant deux atomes de carbone asymétriques.  On pourra prendre comme exemple : le lindane, la thalidomide, ...
4- Réactivité en chimie organique.	
4.1 - Effets électroniques dans les liaisons.	Polarisation et polarisabilité d'une liaison ; effet inducteur ; effet mésomère, délocalisation électronique.
4.2 - Tautomérisation et ses conséquences.	On se limitera à la prototropie.
4.3 - Notion de mécanisme réactionnel.	Présentation des diagrammes énergétiques $E_p = f(C.R.)$ des processus en une étape ou deux étapes élémentaires ; approche des notions de contrôle thermodynamique et cinétique.
4.4 - Intermédiaires réactionnels.	Structure, stabilité, réactivité ; on étudiera principalement les carbocations, les carbanions et les radicaux ; on évoquera le cas des méthylènes (carbènes).
4.5 - Acido-basicité de Brønsted et de Lewis.	
4.6 - Nucléophilie, électrophilie.	
4.7 - Orientation des réactions.	Régiosélectivité, stéréosélectivité, stéréospécificité.
5- Solvants.	Polaires ; apolaires ; protiques ; aprotiques. Notions simples de lipophilie, hydrophilie, amphiphilie. Effets toxicologiques de la famille des solvants.

PROGRAMME	COMMENTAIRES

PROGRAMME	COMMENTAIRES
<b>B ) CHIMIE ORGANIQUE FONCTIONNELLE.</b>	
<p>A l'occasion de chaque chapitre, on donnera la nomenclature (officielle et triviale), les propriétés spectroscopiques, physiques et toxicologiques, ainsi que les réactions dangereuses, les préparations et les applications industrielles.</p> <p>L'initiation à la synthèse organisée sera développée tout au long du cycle (protection de fonction, rétrosynthèse, ...).</p> <p>Les mécanismes seront interprétés uniquement en termes de contrôle de charge ; la notion d'orbitale frontière est hors programme.</p> <p>A l'occasion de l'étude des propriétés des différentes familles, on insistera sur l'appartenance des réactions rencontrées aux grands types de mécanismes.</p> <p>Seuls les mécanismes des réactions marquées d'un astérisque (*) sont exigibles à l'examen.</p>	
<b>I - RÉACTIVITÉ DES HYDROCARBURES ET DES COMPOSÉS MONOFONCTIONNELS.</b>	
ALCANES	raffinage du pétrole : pétrochimie ; halogénéation : substitution radicalaire * ; nitration ; sulfonation ; oxydation.
ALCENES	
1- Addition électrophile.	mécanisme général * ; halogénéation*, hydratation*, hydrohalogénéation* ; formation d'halohydrines* ; réarrangement d'un carbocation ;
2- Autres additions.	addition radicalaire de HBr* ; hydroboration ; hydrogénation ; oxosynthèse ; addition des méthylènes (carbènes) ;
3- Oxydations.	avec et sans coupure de la molécule ;
4- Substitution allylique.	halogénations.
ALCYNES	
1- Additions.	hydrogénation ; additions électrophiles ; hydroboration ;
2- Propriétés des alcynes vrais.	propriétés acides ; propriétés nucléophiles des ions alcynures.
COMPOSÉS AROMATIQUES	
1- Notion d'aromaticité.	règle de Hückel sans calculs de mécanique quantique ;

PROGRAMME	COMMENTAIRES

PROGRAMME	COMMENTAIRES
2- Substitution électrophile.	mécanisme général* ; monosubstitution* ; polysubstitution, règles de Hollemann : la justification de ces règles par l'étude des intermédiaires de Wheland ne peut faire l'objet d'une question à l'examen ; le cas du naphthalène sera traité de façon succincte ;
3- Réactions de la chaîne latérale.	halogénéation et oxydation ;
4- Additions.	halogénéation ; hydrogénation ;
5- Réduction de Birch.	
6- Oxydations du cycle.	cas du benzène, du naphthalène, de l'anthracène ;
7- Hétérocycles à caractère aromatique.	on traitera d'un hétérocycle à 5 chaînons possédant un seul hétéroatome et d'un hétérocycle à 6 chaînons : la pyridine ; on mettra en évidence leur différence de comportement.
<b>DÉRIVÉS HALOGÉNÉS</b>	
1- Substitution nucléophile.	substitution nucléophile unimoléculaire (SN1) et bimoléculaire (SN2)* ;
2- Réaction d'élimination.	élimination unimoléculaire (E1) et bimoléculaire (E2)* ; compétition substitution nucléophile-élimination ;
3- Action des métaux et du silicium.	
4- Halogénures éthyléniques.	SN avec les composées vinyliques et allyliques.
<b>ORGANOMÉTALLIQUES</b>	
1- Organomagnésiens mixtes : - constitution ; - propriétés basiques ; - propriétés nucléophiles.	justification du choix du solvant ;  schémas réactionnels des réactions avec les époxydes, les dérivés halogénés, les orthoesters et les composés comportant les groupes C=O et C=N ;



PROGRAMME	COMMENTAIRES
2- Autres organométalliques.	comparaison de la réactivité de quelques organométalliques ; en particulier, action des lithien, magnésien et cuprate avec une cétone conjuguée.
ALCOOLS	(à cette occasion on montrera la similitude thiols - alcools)
1- Propriétés acido-basiques.	
2- Propriétés nucléophiles.	déshydratation* ; estérification* ; halogénéation ; acétalisation ;
3- Oxydations ; déshydrogénation.	obtention d'aldéhydes, de cétones ou d'acides.
PHÉNOLS	
1- Acidité.	
2- Substitution électrophile.	influence du groupe OH* ;
3- Propriétés nucléophiles.	éthérification* , acylation* ;
4- Réactions de condensation.	milieu acide et milieu basique : - synthèse de phtaléines et de phénoplastes ; - réactions de Kolbe et de Reimer-Tiemann.
5- Oxydo-réduction.	
ÉPOXYDES ET ÉTHERS-OXYDES	
1- Ouverture du cycle des époxydes.	attaque nucléophile* ; ouverture par catalyse acide* ;
2- Propriétés nucléophiles des éthers-oxydes.	action de l'acide iodhydrique ;
3- Réaction due à l'hydrogène en $\alpha$ des éthers-oxydes.	formation des hydroperoxydes ; corrélation avec les risques encourus lors de la manipulation des éthers-oxydes.

PROGRAMME	COMMENTAIRES
AMINES ALIPHATIQUES	
1- Propriétés basiques.	
2- Propriétés nucléophiles.	formation d'amides*, d'imines*, d'énamines*, formation de sulfonamides, d'isocyanates ; réaction avec l'acide nitreux : schéma réactionnel ;
3- Ions ammonium quaternaires.	élimination d'Hofmann*.
AMINES AROMATIQUES	
1- Propriétés basiques.	
2- Substitution électrophile.	influence du groupe NH <sub>2</sub> * ;
3- Propriétés nucléophiles.	formation d'amides* ; réaction avec l'acide nitreux ;
4- Oxydations.	on se limitera à la formation de noir d'aniline et de dérivés nitrés.
DIAZOIQUES	
1- Réactions avec départ d'azote.	halogénations ; préparation de nitriles, de phénols ; désamination nitreuse ;
2- Réactions sans départ d'azote.	préparation d'azoïques* ; réduction en hydrazines substituées ;
3- Le diazométhane.	la préparation n'est pas au programme ; réactions avec les composés à hydrogène mobile et les composés carbonylés.
ALDÉHYDES-CÉTONES	
1- Addition nucléophile au carbonyle.	mécanisme général* ; eau* ; alcools* ; thiols* ; organométalliques* ; alcynures* ; hydrures* ; dérivés du type A-NH <sub>2</sub> * ; acide cyanhydrique* ; hydrogénosulfite de sodium* ; pentachlorure de phosphore ; réactions de Doebner-Knoevenagel ; réaction de Wittig* ; à propos de la formation des cétoximes on traitera la transposition de Beckmann en milieu acide* ;

PROGRAMME	COMMENTAIRES
2- Réactions dues à l'hydrogène en $\alpha$ .	aldolisation*, cétolisation*, crotonisation* ; halogénéation en milieu acide et basique* ;
3- Aldéhydes aromatiques.	réaction de Perkin ; benzoïnation ;
4- Cétones conjuguées.	addition 1,4 de Michael* ; action des organomagnésiens* ;
5- Réactions d'oxydo-réduction.	réductions en alcanes et en alcools ; réduction duplicative ; oxydation en milieu acide ou basique des aldéhydes ; oxydation des cétones avec coupure de la chaîne carbonée ; réaction de Cannizzaro*.
<b>ACIDES CARBOXYLIQUES</b>	
1 - Propriétés acides.	
2 - Passage aux dérivés d'acides.	
3 - Halogénéation en $\alpha$ .	le mécanisme est hors programme ;
4 - Passage aux dérivés carbonylés.	réactions de Piria et de Sabatier-Senderens.
5 - Réduction.	
<b>DÉRIVÉS D'ACIDES</b>	
1 - Chlorures, anhydrides, esters, amides, nitriles.	réactivités comparées ; hydrolyse ; réductions (catalytique et par les hydrures) ; réactions avec les organométalliques.
2 - Dégradation d'Hofmann des amides.	
3 - Réactions dues à la mobilité de l'hydrogène en $\alpha$ du carbonyle des esters et des nitriles.	
<b>II - RÉACTIVITÉ DES COMPOSÉS POLYFONCTIONNELS.</b>	
<b>DIÈNES CONJUGUÉS</b>	
1 - Addition électrophile 1,2 et 1,4 .	contrôles cinétique et thermodynamique ;
2 - Synthèse de Diels-Alder.	on étendra au cas des dérivés carbonylés $\alpha,\beta$ -insaturés ; à propos de la stéréochimie de l'addition, on n'abordera pas l'étude des isomères endo et exo.

PROGRAMME	COMMENTAIRES
<b>DIOLS</b>	
1 - Déshydratation.	déshydratations inter et intramoléculaire ; transposition pinacolique * ;
2 - Oxydations.	avec ou sans coupure de la molécule.
3 - Protection du groupe carbonyle.	
<b>COMPOSÉS DICARBONYLÉS</b>	
1 - Composés 1,2-dicarbonylés.	glyoxal : réaction de Cannizzaro intra- moléculaire* ;
2 - Composés 1,3-dicarbonylés.	benzile : réaction de transposition benzylique ; propriétés acides ; tautomérie.
<b>DIACIDES</b>	
1 - Propriétés acides.	influence de la structure ;
2 - Déshydratation et décarboxylation.	influence de la structure ;
3 - Esters maloniques.	on se limitera à la synthèse malonique *.
<b>III - APPLICATIONS.</b>	
<b>MATÉRIAUX MACROMOLÉCULAIRES</b>	
1 - Polymérisation par addition.	réactions radicalaires, cationiques, anioniques, de Ziegler-Natta ;
2 - Polymérisation par condensation.	
3 - Relations structure-propriétés.	on introduira les notions de tacticité, de polymères thermoplastiques et thermodurcissables et d'élastomères ;
4 - Les matières plastiques.	on soulignera l'intérêt des adjuvants à l'aide de quelques exemples.
5 - Produits de dégradation.	
<b>COMPOSÉS D'INTÉRÊT BIOLOGIQUE</b>	
	On se contentera dans ce paragraphe de décrire les principales structures rencontrées dans ces molécules et d'étudier les propriétés fondamentales qui en découlent.

PROGRAMME	COMMENTAIRES
<p>1 - Acides <math>\alpha</math>-aminés - Polypeptides - Protéines :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- propriétés acido-basiques ;</li><li>- stéréochimie des acides aminés naturels ;</li><li>- liaison peptidique ;</li><li>- stéréochimie des protéines ;</li><li>- intérêt biologique.</li></ul> <p>2 - Glucides :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- présentation des principales familles ;</li><li>- anomérie ;</li><li>- intérêt biologique.</li></ul> <p>3 - Lipides :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- classification ;</li></ul> <p>- utilisations dans les domaines biologiques, alimentaires et industriels.</p>	<p>structures primaire et secondaire.</p> <p>lipides simples ou homolipides : triglycérides, cires ; lipides complexes ou hétérolipides : phospholipides ; micelles, liposomes, membranes.</p>

## CHIMIE ORGANIQUE : TRAVAUX PRATIQUES DE PREMIÈRE ET DEUXIÈME ANNÉE.

La sensibilisation aux problèmes de toxicologie, d'écotoxicologie et de sécurité, par rapport aux produits utilisés, aux appareillages, aux réactions mises en jeu, devra être un souci constant. Au cours de chaque séance, on recherchera dans la documentation disponible les risques encourus, ainsi que les précautions à prendre pour s'en garantir et protéger l'environnement. Il est important que les élèves soient sensibilisés aux bonnes pratiques de laboratoire (B.P.L.) ; on insistera particulièrement sur la saisie, le classement, l'archivage de l'information et la tenue d'un cahier de laboratoire.

PROGRAMME	COMMENTAIRES
<b>A) TECHNIQUES DE SYNTHÈSE, DE SÉPARATION ET DE PURIFICATION.</b>	
Initiation, ou révision, des techniques fondamentales du laboratoire de chimie organique (distillation, cristallisation, extraction, contrôle des constantes physiques, etc...).	On présentera le matériel de synthèse et les différents types d'appareillage utilisés selon les conditions réactionnelles. On expliquera les raisons du choix de tel ou tel type d'appareillage (pour toute cette partie, on pourra s'aider utilement de catalogues de fournisseurs de matériel).
<b>B) MÉTHODES SPECTROMÉTRIQUES.</b>	
L'étude théorique est limitée au minimum nécessaire à l'exploitation correcte des spectres, ceci en complément des notions théoriques étudiées dans les autres disciplines. L'étude technologique des différents types d'appareillage est exclue. L'étude des spectres donnera lieu à l'utilisation de logiciels et de banques de données.	
1. Spectrométrie de masse.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identification des isotopes.</li> <li>– Pics "parents" P, P+1, P+2.</li> <li>– Fragmentations simples.</li> <li>– L'étude des transpositions est exclue.</li> </ul>
2. Spectroscopie IR	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Différentes techniques de préparation de l'échantillon (film, pastilles, etc...).</li> <li>– Tracé de spectres.</li> <li>– Identification des groupes caractéristiques.</li> <li>– On montrera (si possible) comment l'IRTF permet d'appliquer l'IR à l'analyse quantitative.</li> </ul>
3. Spectroscopie de RMN.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Exploitation de spectres de RMN du proton et du <math>^{13}\text{C}</math>.</li> <li>– On se limitera aux couplages AX et AMX.</li> </ul>
4. Spectroscopie UV-visible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tracé de spectres.</li> <li>– Applications à l'identification de composés et</li> </ul>

PROGRAMME	COMMENTAIRES
<p>5. Application à la détermination des structures.</p>	<p>à leur dosage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation de règles empiriques permettant de prévoir la longueur d'onde de certaines bandes d'absorption caractéristiques et d'identifier certains types de structures.</li> </ul> <p>On montrera la complémentarité des différentes techniques.</p>
<p><b>C) MÉTHODES CHROMATOGRAPHIQUES.</b></p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chromatographie sur colonne.</li> <li>- Chromatographie sur couche mince.</li> <li>- Chromatographie en phase gazeuse.</li> <li>- Chromatographie liquide haute performance.</li> </ul>	<p>On s'efforcera de faire apparaître les raisons motivant le choix de telle ou telle technique et de relier les conditions opératoires (nature de la phase stationnaire, de l'éluant, des conditions de température et de débit en phase gazeuse, etc...) à la nature des composés étudiés.</p> <p>Les TP de chromatographie seront l'occasion de familiariser les élèves à la saisie et au traitement des données par un système informatisé.</p>
<p><b>D) THÈMES DE SYNTHÈSE ORGANIQUE.</b></p>	
<p>On illustrera à l'échelle du laboratoire les réactions importantes de la chimie organique, en les rattachant aux grandes opérations unitaires de l'industrie organique. On commencera par des réactions simples et des synthèses à une seule étape, le but devant être au cours du cursus, d'arriver à la réalisation de préparations en plusieurs étapes.</p> <p>On mettra en évidence les méthodes permettant de protéger un groupement fonctionnel. Les opérations dirigées au début, devront évoluer progressivement vers une plus grande autonomie, incluant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- des recherches bibliographiques ;</li> <li>- le choix du matériel et des réactifs ;</li> <li>- le calcul des quantités mises en œuvre ;</li> <li>- des propositions de variation des paramètres pour optimiser les résultats (on pourra à ce sujet aborder succinctement les plans d'expérience) ;</li> <li>- la proposition et la mise en œuvre de méthodes de contrôle des matières premières et des produits.</li> </ul> <p>La liste ci-dessous n'est proposée qu'à titre indicatif, pour les séances ne comportant qu'une préparation en une seule étape réactionnelle :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- oxydations ;</li> <li>- réductions ;</li> <li>- réactions de Friedel et Crafts ;</li> <li>- réactions de transpositions ;</li> <li>- halogénations ;</li> <li>- réactions mettant en œuvre un organo-magnésien mixte ;</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- préparation d'un éther (à cette occasion on pourra montrer l'intérêt de la catalyse inter-faciale) ;</li> <li>- déshydratation ;</li> <li>- nitration en série aromatique ;</li> </ul>	

PROGRAMME	COMMENTAIRES
<ul style="list-style-type: none"><li>- réactions mettant en œuvre une diazotation ;</li><li>- estérification et réactions apparentées (transestérification, réactions d'acylation des phénols et des amines) ;</li><li>- réactions de condensations.</li></ul>	

Remarque : l'horaire indiqué de 4 heures est un horaire hebdomadaire élève moyen, mais les séances peuvent être de durées inégales, l'horaire global annuel devant être respecté. On peut ainsi envisager des séances d'une demi-journée (4 à 6 heures) ou des séances d'une journée (8 heures).



## **GÉNIE CHIMIQUE : PLAN GÉNÉRAL.**

- 1 - SCHÉMA DE PROCÉDÉ ET RÉGULATION
- 2 - MÉTHODE DES BILANS - RÉACTEURS
- 3 - CIRCULATION DES FLUIDES
- 4 - TRANSFERT DE CHALEUR - PRODUCTION DE CHALEUR ET DE FROID
- 5 - ÉVAPORATION - CRISTALLISATION - SÉCHAGE
- 6 - DISTILLATION
- 7 - EXTRACTION :
  - EXTRACTION LIQUIDE-LIQUIDE
  - EXTRACTION SOLIDE-LIQUIDE
  - ABSORPTION-DESORPTION
- 8 - SÉDIMENTATION - FILTRATION
- 9 - TECHNIQUES ET SÉPARATIONS DIVERSES

## 1<sup>ère</sup> PARTIE : SCHÉMA DE PROCÉDÉ ET RÉGULATION.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>1 - 1 - APPROCHE DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS, ET DU GÉNIE DES PROCÉDÉS.</b></p> <p>Définitions du génie des procédés et du génie chimique. Opérations continues et discontinues. Notions d'opérations unitaires.</p> <p>Schéma de principe et plan de circulation des fluides. Schéma de procédé.</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Réaliser, à partir d'une description écrite ( et éventuellement d'un schéma de principe), le schéma de procédé comportant :               <ul style="list-style-type: none"> <li>– les tuyauteries et ses accessoires ;</li> <li>– les appareils de déplacement des fluides les pompes, compresseurs etc...);</li> <li>– les appareillages principaux en coupe simplifiée ;</li> <li>– les appareils de mesure, contrôle et régulation ;</li> <li>– les organes de sécurité.</li> </ul> </li> <li>◆ Analyser la sécurité du procédé :               <ul style="list-style-type: none"> <li>– savoir lire et utiliser un schéma de fabrication d'une installation réelle et prévoir les conséquences de certains dysfonctionnements ;</li> <li>– savoir lire, interpréter et utiliser un schéma de fabrication en terme de production et de sécurité.</li> </ul> </li> </ul>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>1 - 2 - CONTRÔLES ET RÉGULATION.</b></p> <p><b>RÔLE</b> des différents éléments d'une boucle de régulation</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- capteurs :</li>   <li>- transmetteurs ;</li> <li>- actionneur.</li> </ul> <p>On introduira la notion de sécurité positive (position normalement ouverte ou normalement fermée d'une vanne de régulation) ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- signaux standards (analogique, pression-intensité et numérique).</li> </ul> <p><b>PRINCIPE DES RÉGULATIONS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tout ou rien.</li> <li>- Proportionnelle.</li> <li>- Proportionnelle intégrale.</li> <li>- Proportionnelle intégrale dérivée.</li> <li>- Régulation de rapport.</li>   <li>- Régulation en cascade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En utilisation de boucles de régulation sur installations de fabrication ou de séparation.</li> <li>- Banc d'étude des boucles de régulation.</li> </ul>	<p>L'objectif est triple :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ justifier la nécessité (ou non) de placer une régulation en un point d'une installation.</li> <li>◆ connaître le vocabulaire de base d'une boucle de régulation, de façon à permettre le dialogue avec le personnel d'instrumentation ; <ul style="list-style-type: none"> <li>- grandeur réglée,</li> <li>- grandeur réglante,</li> <li>- grandeur perturbatrice.</li> </ul> </li> <li>◆ indiquer les limites et les dysfonctionnements possibles (influence du temps mort, de l'inertie du système...).</li> </ul> <p>Aucun calcul ne peut être demandé à l'examen.</p> <p>La régulation de rapport ou en cascade sera traitée uniquement à l'occasion de schéma ou de TP.</p>

## 2<sup>ème</sup> PARTIE : MÉTHODE DES BILANS - RÉACTEURS.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>2 - 1 - DIVERSES EXPRESSIONS DE LA COMPOSITION D'UN MÉLANGE.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Définition des titres massique, molaire et volumique.</li> <li>- Conversion mutuelle des concentrations (mol/L ou g/L) en titres.</li> <li>- Définition du rapport massique, du rapport molaire.</li> </ul>		
<p><b>2 - 2 - BILAN MATIÈRE - RÉACTIONS CHIMIQUES.</b></p>		
<p><b>Représenter une vue synoptique du problème (schéma de principe)</b></p> <p>2-2-1 - Cas des opérations unitaires.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bilan global - bilan partiel en chacun des constituants.</li> <li>- Calculs des quantités de matière à l'entrée et à la sortie d'une opération unitaire :               <ul style="list-style-type: none"> <li>- opérations discontinues,</li> <li>- opérations continues.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Ces notions peuvent être exploitées à l'occasion des TP de fabrication ou de séparation.</p>	<p>Après une initiation élémentaire à la méthode des bilans, cet enseignement donnera lieu à des applications au cours des deux années dans le cadre des TD et des TP de génie chimique.</p> <p>On utilisera des notations "parlantes" ; usuelles (R comme reflux, L comme liquide, C comme cristaux etc...) plutôt que des notations générales ( ex : <math>F_i</math>, <math>x_i</math>, ...), car on traite souvent de mélanges binaires.</p> <p>Les notations générales pourront être vues en conclusions (méthodologie générale).</p> <p><b>LA PRATIQUE DE L'ÉQUILIBRAGE DES RÉACTIONS CHIMIQUES EST SUPPOSÉE ACQUISE.</b></p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p>2-2-2 - Cas des réacteurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Étude de réactions chimiques, discontinues ou continues en régime permanent.</li> <li>- Calcul des quantités de réactifs à introduire et des produits formés.</li>   <li>- Bilan matière - calculs avec recyclage et purge ;</li> <li>* définition du TAUX DE CONVERSION <math>\tau</math> d'un réactif.</li>   <li>- Étude de synthèse avec formation de sous produit ;</li> <li>* définition de la SÉLECTIVITÉ <math>\sigma</math> d'une réaction.</li>   <li>- Etude d'un procédé de fabrication avec recyclage des réactifs n'ayant pas réagi ;</li> <li>* calcul du RENDEMENT <math>\eta</math> ;</li> <li>• au niveau du réacteur,</li> <li>• sur l'ensemble du procédé de fabrication.</li>   <li>- Notion de temps de passage des produits dans le réacteur.</li> </ul>		<p>Réactions simples ou deux réactions consécutives ou concurrentes.</p> <p>La présentation des différents types de réacteurs sera faite à l'occasion des schémas de procédés et des études particulières de bilans lors de réactions chimiques, (choisir des exemples diversifiés de réacteurs en phase liquide, en phase gaz, avec catalyseur .... ).</p> <p>Les risques des différents types de réacteurs seront précisés (chargement, étanchéité, agitation).</p> $\tau = \frac{\text{nombre de moles transformées du réactif}}{\text{nombre de moles de réactif introduit}}$ $\sigma = \frac{\text{nombre de moles transformées en produit principal}}{\text{nombre de moles transformées total}}$ $\eta = \frac{\text{nombre de moles transformées en produit principal}}{\text{nombre de moles transformées du réactif introduit}}$ <p>L'étude des réacteurs exclut tous calculs fondés sur la cinétique de la réaction ainsi que sur le dimensionnement des appareils.</p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>2 - 3 - BILAN ÉNERGÉTIQUE</b></p> <p>2-3-1 - Cas des opérations unitaires. Calcul des quantités d'énergie à fournir ou à éliminer pour les opérations discontinues ; calculs des flux énergétiques pour les procédés continus.</p> <p>2-3-2 - Cas des réacteurs. Calcul de l'énergie (ou du flux énergétique) à fournir ou à éliminer pour maintenir un réacteur à température constante dans le cas d'une réaction endothermique ou exothermique dont la variation d'enthalpie est fournie.</p>		<p>Lors de l'établissement des bilans énergétiques, on utilisera la capacité thermique massique ou molaire moyenne, dans l'intervalle de température considéré. Les chaleurs latentes de changement d'état seront fournies, ainsi qu'éventuellement les enthalpies (molaires, massiques).</p> <p>On analysera l'influence de ces différents paramètres sur la sécurité du procédé (emballage, maintien d'une température optimale, ...).</p>

### 3<sup>ème</sup> PARTIE : CIRCULATION DES FLUIDES.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>3 - 1 - GÉNÉRALITÉS.</b></p> <p>3-1-1 - Notions de pression (absolue, effective, dépression) - unités.</p> <p>3-1-2 - Statique des fluides et applications (mesures de pressions - décantation continue dans un décanteur florentin - colonne barométrique).</p> <p>3-1-3 - Poussée d'Archimède et applications (niveau à flotteur - densimètres).</p> <p>3-1-4 - Notions de débits (volumique, massique, molaire) - unités pratiques.</p>	<p>L'utilisation des appareils de mesures de pression et de densité ne fera pas systématiquement l'objet d'une séance de manipulations mais pourra être utilement «dispersée» dans d'autres manipulations.</p>	<p>Tant sur le plan théorique que sur le plan pratique ces notions générales sont a priori :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- presque totalement inconnues des élèves titulaires du Bac S,</li> <li>- théoriquement bien connues de ceux qui sont originaires de la section STL - option CLPI.</li> </ul> <p>Cette partie du programme devra donc être essentiellement traitée en séances de travaux dirigés.</p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<b>3 - 2 - DYNAMIQUE DES FLUIDES PARFAITS INCOMPRESSIBLES.</b>		
<p>3-2-1 - Théorème de Bernoulli.</p> <p>3-2-2 - Application à la mesure des débits à l'aide de débitmètres déprimogènes.</p> <p>3-2-3 - Notions de mise en circulation de liquides dans des installations ne comportant pas de pompe :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- écoulement par gravité,</li> <li>- déplacement par pression d'air ou de gaz inerte,</li> <li>- chargement par action du vide.</li> </ul>	<p>L'étude expérimentale du fonctionnement des débitmètres peut-être faite à l'occasion de travaux pratiques si l'établissement est équipé de l'installation adaptée.</p> <p>L'étude de ces méthodes de mise en circulation ne fera pas l'objet d'une manipulation exclusivement consacrée à ce sujet, mais elles seront largement intégrées aux travaux pratiques de fabrications et de séparations au cours desquelles le transvasement manuel par seau et entonnoir devrait être exclu.</p>	<p>On insistera sur les risques liés :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- au stockage (fuites, surpressions, ...) ;</li> <li>- à la circulation des fluides, fuites, projections, électricité statique ( polarité des fluides, mise à la terre ).</li> </ul>
<b>3 - 3 - DYNAMIQUE DES FLUIDES RÉELS.</b>		
<p>3-3-1 - Notion de viscosité. Fluides newtoniens. Rhéologie.</p> <p>3-3-2 - Régimes d'écoulement : nombre de Reynolds.</p> <p>3-3-3 - Ecoulement d'un fluide réel incompressible :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- notions de pertes de charge,</li> <li>- pertes de charge régulières,</li> <li>- rugosité,</li> <li>- coefficients de frottement (utilisation du diagramme de Moody),</li> <li>- pertes de charges singulières - accessoires de canalisation,</li> <li>- coefficients de pertes de charge et longueurs droites équivalentes,</li> <li>- lectures d'abaques.</li> </ul> <p>3-3-4 - Théorème de Bernoulli appliqué à un fluide réel.</p>	<p>L'étude expérimentale des pertes de charge par frottement et par traversée «d'accidents» est indispensable.</p> <p>Application à l'agitation.</p>	<p>Tenir compte de ce que savent déjà les titulaires du Bac STL - option CLPI.</p>



COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<b>3 - 4 - PERTES DE CHARGES AU COURS DE LA TRAVERSÉE D'UN SOLIDE POREUX.</b>		
Applications à la fluidisation, aux colonnes à garnissage, à la filtration.	Ces phénomènes peuvent être étudiés à l'occasion de travaux pratiques .	Tous les établissements n'étant pas équipés pour réaliser ces manipulations, cette rubrique ne saurait donner lieu à un exercice au cours de l'épreuve écrite.
<b>3 - 5 - MISE EN MOUVEMENT DES LIQUIDES A L'AIDE DE POMPES.</b>		
<p>3-5-1 - Application du théorème de Bernoulli :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- hauteur à fournir dans le circuit ;</li> <li>- courbe de réseau ;</li> <li>- calcul de la puissance à fournir au fluide.</li> </ul> <p>3-5-2 - Calcul de la pression à l'aspiration de la pompe. Problèmes de cavitation. NPSH disponible.</p> <p>3-5-3 - Appareillage :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pompes volumétriques,</li> <li>- pompes alternatives,</li> <li>- pompes rotatives,</li> <li>- pompes doseuses,</li> <li>- pompes centrifugeuses,</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- accessoires (garnitures d'étanchéité - soupape de sécurité - pots anti-bélier).</li> </ul>		<p>On étudiera le fonctionnement d'un modèle de chaque type de pompe ; on analysera les problèmes d'utilisation posés et on en déduira les solutions apportées, les limites et le domaine d'utilisation de chaque modèle.</p> <p>Sécurité liée aux machines tournantes.</p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p>3-5-4 - Caractéristiques d'une pompe :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- courbes caractéristiques : hauteur manométrique - puissance - rendement - NPSH requis ;</li> <li>- loi de similitude - influence de la vitesse de rotation.</li> </ul> <p>3-5-5 - Calcul du point de fonctionnement.</p>	<p>Cette rubrique fera l'objet d'au moins une séance de travaux pratiques</p>	<p>Cette rubrique a déjà été étudiée par les élèves titulaires du Bac STL - option CLPI.</p> <p>L'établissement d'une courbe de réseau ne pourra pas être demandé à l'examen.</p> <p>Détermination graphique.</p>
<p><b>3-6 - CIRCULATION DES FLUIDES COMPRESSIBLES.</b></p>		
<p>3-6-1 - Production du vide industriel :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- éjecteurs à vapeur - montage en série,</li> <li>- étude du fonctionnement de pompes à vide industrielles,</li> <li>- circuit de vide - réglage et régulation du vide.</li> </ul> <p>3-6-2 - Compression et mise en circulation des gaz :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- définition du taux de compression,</li> <li>- mise en évidence de la nécessité d'un refroidissement,</li> <li>- principe de fonctionnement et domaine d'utilisation des compresseurs, soufflantes et ventilateurs.</li> </ul>	<p>Utilisation du vide au cours de chargements de réactifs, filtrations et distillations.</p> <p>On n'étudiera qu'un seul exemple de chaque type d'appareil tant pour la production du vide que pour la compression et la mise en circulation des gaz.</p>	<p>A l'examen on n'exigera aucun calcul sur la dynamique des fluides compressibles.</p> <p>Problèmes liés à la pression.</p>

## 4<sup>ème</sup> PARTIE : PRODUCTION ET TRANSFERT DE LA CHALEUR.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<b>4 - 1 - PRODUCTION DE LA CHALEUR.</b>		
4-1-1 - Les combustibles : définition des pouvoirs calorifiques, fumigènes, comburivores.		Le calcul du pouvoir calorifique d'un combustible ne saurait être demandé à l'examen.
4-1-2 - Les chaudières : à tubes de fumée, à tubes d'eau, électriques.		
4-1-3 - Sécurité des appareils sous pression, réglementation.		
<b>4 - 2 - FLUIDES CALOPORTEURS.</b>		
4-2-1 - Vapeur d'eau et circuits de chauffage à la vapeur - rôle du purgeur.	Utilisation du chauffage à la vapeur ou par thermofluide au cours des travaux pratiques de fabrications et distillations	A l'occasion de l'étude des chaudières on pourra utiliser les diagrammes enthalpie - température.
4-2-2 - Fluides thermiques et circuits permettant leur utilisation.		
4-2-3 - Risques liés aux défaillances de circuits de chauffage et de refroidissement.		
<b>4 - 3 - MODES DE TRANSFERT DE LA CHALEUR.</b>		
4-3-1 - Conduction - loi de Fourier.		Elle sera donnée sous sa forme différentielle originale mais ne sera utilisée que sous forme intégrée en régime permanent, pour des surfaces planes et cylindriques.
4-3-2 - Conduction : – loi de Newton, – exploitation des relations permettant de calculer les coefficients de transfert par convection en fonction des nombres de Reynolds, Nusselt et Prandtl.		
4-3-3 - Notion sommaire sur le rayonnement - loi de Stefan.		Les lois relatives au rayonnement ne sauraient faire l'objet de questions à l'examen.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>4-4 - APPLICATIONS.</b></p> <p>4-4-1 - Association de conductions et convections (cas de surfaces planes et cylindriques).</p> <p>4-4-2 - Cas du coefficient global d'échange - résistance thermique.</p> <p>4-4-3 - Modes d'échange :            – contre-courant,            – courants parallèles.</p> <p>4-4-4 - Calculs simples sur les échangeurs.</p> <p>4-4-5 - Calorifugeage.</p>	<p>Une manipulation ou moins sera consacrée à l'étude expérimentale des transferts de chaleur.</p>	<p>Calculs simples ne nécessitant pas de calculs mathématiques itératifs. Calculs faisant intervenir ces coefficients globaux rapportés à des surfaces différentes (cf calorifugeage).</p>
<p><b>4 - 5 - APPAREILLAGE ET CONDITIONS D'UTILISATION.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Faisceaux tubulaires de différents types.</li> <li>– Double enveloppe.</li> <li>– Serpentin.</li> <li>– Echangeurs à plaques.</li> </ul>		<p>Pour chaque appareil on donnera les conditions d'utilisation, et le détail de ces appareils pourra être vu en schéma.</p>
<p><b>4 - 6 - PRODUCTION ET UTILISATION DU FROID.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Fluides frigorigènes.</li> <li>– Appareils à compression, appareils à absorption.</li> <li>– Production de glace et d'air liquide.</li> </ul>	<p>Si l'établissement dispose de l'installation, l'étude expérimentale d'un groupe frigorifique sera effectuée.</p>	<p>Aucun calcul ne sera exigé à l'épreuve écrite de l'examen au sujet de cette rubrique.</p>

## 5<sup>ème</sup> PARTIE : ÉVAPORATION - CRISTALLISATION - SÉCHAGE.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>5 - 1 - ÉVAPORATION.</b></p> <p>5-1-1 - Principe.</p> <p>– Méthodes d'évaporation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• à simple effet ;</li> <li>• sous pression ordinaire et sous vide ;</li> <li>• évaporation à sec ;</li> <li>• atomisation.</li> </ul> <p>– Domaines d'utilisation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mélanges de deux liquides à forte différence de volatilité (cf distillation) ;</li> <li>• concentration de solutions d'un solide dissous dans un solvant.</li> </ul> <p>5-1-2 - Calculs.</p> <p>– Bilans matière : titres massiques (on pourra également utiliser les rapports massiques).</p> <p>– Bilans thermiques : utilisation des lois de la calorimétrie et association avec les problèmes de transmission de chaleur - bilans enthalpiques.</p> <p>5-1-3 - Récupération d'énergie.</p> <p>– Recompression mécanique des vapeurs.</p> <p>– Multiples effets.</p> <p>5-1-4 - Appareillage.</p> <p>– Evaporateurs à faisceaux de tubes.</p> <p>– Evaporateurs à couche mince .</p>	<p>Soit en continu, soit plus couramment en discontinu dans des réacteurs polyvalents.</p>	<p>Les enthalpies massiques seront fournies.</p> <p>A traiter en schéma. Pas de calculs à l'examen pour la partie 5-1-3.</p> <p>Un appareil de chaque type.</p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>5 - 2 - CRISTALLISATION</b></p> <p>5-2-1 - Solubilité d'un solide dans un solvant.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Expression en titres massiques et rapports massiques.</li> <li>- Courbes de solubilité en fonction de la température.</li> <li>- Application aux corps donnant des hydrates .</li> </ul> <p>5-2-2 - Méthodes de cristallisation.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sursaturation, germination, grossissement des cristaux.</li> <li>- Cristallisations par refroidissement, par évaporation, par évaporation adiabatique sous vide.</li> <li>- Paramètres influant sur la solubilité : pH, addition d'un tiers-corps, impuretés.</li> </ul> <p>5-2-3 - Calculs.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bilans matière : <ul style="list-style-type: none"> <li>• cas des sels anhydres ;</li> <li>• cas des sels donnant des hydrates.</li> </ul> </li> <li>- Bilans thermiques : pertes thermiques ; chaleurs de cristallisation ; bilans enthalpiques.</li> </ul> <p>5-2-4 - Appareillage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Appareils discontinus.</li> <li>- Appareils continus fonctionnant par évaporation sous vide ou non (adiabatement ou non) et par refroidissement.</li> <li>- Ecailleuses pour produits fondus.</li> </ul>	<p>Cette opération peut être étudiée sur un appareillage spécifique, ou en discontinu sur appareil polyvalent (fabrications diverses).</p>	<p>On fera la relation avec la courbe de solubilité.</p> <p>Utilisation des titres et des rapports massiques.</p> <p>Utilisation des titres massiques (méthode générale). On précisera si la cristallisation est endothermique ou exothermique.</p> <p>Réacteur classique agité muni d'un refroidissement pour le discontinu, type " Oslo " pour les appareils continus.</p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>5 - 3 - SÉCHAGE.</b></p> <p>5-3-1 - Principe - but - définitions.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Humidité des solides : humidité liée et non liée - hydratation - pression d'équilibre - différence entre séchage et déshydratation.</li> <li>- Humidité des gaz : pressions partielles - tensions de vapeur - pression de saturation - degré hygrométrique (humidité relative) - taux de saturation - températures sèche et humide - enthalpies - volume humide.</li> </ul> <p>5-3-2 - Méthodes de séchage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Par conduction - utilisation du vide.</li> <li>- Par convection - utilisation de l'air ou d'un gaz inerte.</li> </ul> <p>5-3-3 - Calculs.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bilans matière en régime permanent : avec ou sans recyclage de gaz.</li> <li>- Bilans thermiques et enthalpiques : en régime permanent.</li> </ul> <p>5-3-4 - Appareillage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Discontinu et continu.</li> <li>- Par conduction et par convection.</li> <li>- Par atomisation.</li> </ul>	<p>En fonction de l'équipement local.</p> <p>On insistera sur les risques liés aux séchages des solides pulvérulents : émissions de poussières et explosions.</p>	<p>Définitions et relations reliant ces différents paramètres Calculs par voie normale et par le diagramme de l'air humide comportant l'enthalpie, les humidités absolue et relative, la température sèche.</p> <p>Calculs par voie normale et par le diagramme de l'air humide.</p> <p>On décrira quelques modèles différents en fonction de l'équipement local .</p>

## 6<sup>ème</sup> PARTIE : DISTILLATION.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>6 - 1 - ÉTUDE DES ÉQUILIBRES LIQUIDE-VAPEUR.</b></p> <p>6-1-1 - Cas de mélanges binaires idéaux.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Règle des phases.</li> <li>- Loi de Raoult - loi de Dalton .</li> <li>- Courbes isothermes.</li> <li>- Courbes isobares : courbes de rosée et d'ébullition et d'équilibre <math>y = f(x)</math>.</li> <li>- Définition de la volatilité (absolue et relative).</li> <li>- Équation de la courbe <math>y = f(x, \alpha)</math>, la volatilité relative étant supposée constante.</li> </ul> <p>6-1-2 - Cas de mélanges non idéaux.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mélange zéotropique ; notion de coefficient d'activité.</li> <li>- Mélange homoazéotropique :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• à température d'ébullition maximale,</li> <li>• à température d'ébullition minimale.</li> </ul> </li> <li>- Mélange hétéroazéotropique :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• à immiscibilité totale,</li> <li>• à immiscibilité partielle.</li> </ul> </li> <li>- Etude des isothermes, des isobares et de <math>y = f(x)</math> dans tous les cas.</li> </ul>		<p>Bien que l'étude du corps pur soit supposée connue (tension de vapeur saturante - évolution de la température d'ébullition selon la pression), des rappels peuvent s'avérer nécessaires.</p> <p>Etablir un diagramme en fuseau théorique, à partir des tensions de vapeur saturante.</p> <p>Utiliser un diagramme isobare fourni pour déterminer le nombre de moles dans chaque phase.</p> <p>Calculer le nombre de moles dans chaque phase à l'équilibre, le diagramme isobare étant fourni.</p> <p>Utiliser un diagramme isobare pour déterminer le nombre de phases en présence.</p>



COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>6 - 2 - DIFFÉRENTS TYPES DE DISTILLATION.</b></p> <p>6-2-1 - Distillation simple.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Distillation instantanée (flash) : bilans matière et thermique.</li> <li>- Règle du levier ou des segments inverses.</li> <li>- Etude de la distillation discontinue d'un mélange binaire idéal.</li> <li>- Evolution des titres et des températures.</li> <li>- Entraînement à la vapeur : <ul style="list-style-type: none"> <li>• masse de vapeur nécessaire à l'entraînement ;</li> <li>• bilan énergétique global.</li> </ul> </li> </ul> <p>6-2-2 - Rectification.</p> <p>6-2-2-1 - Principe - étude à reflux total.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Principe de fonctionnement d'un plateau théorique.</li> <li>- Détermination du nombre de plateaux théoriques nécessaires : <ul style="list-style-type: none"> <li>• par le calcul ( relation de Fenske ) ;</li> <li>• par la méthode graphique de Mac Cabe et Thiele ;</li> <li>• efficacité ;</li> <li>• hauteur équivalente à un plateau théorique.</li> </ul> </li> </ul>		<p>Calcul par la règle du levier (courbes de rosée et ébullition) et calcul par la droite d'état thermique sur la courbe d'équilibre.</p> <p>On se limitera aux cas où les constituants sont non miscibles.</p> <p>Le calcul par la relation de Fenske ne saurait être demandé à l'examen.</p> <p>Application au calcul du nombre de plateaux réels ou de la hauteur de garnissage.</p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p>6-2-2-2 - Rectification discontinue.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Définition du taux de reflux.</li> <li>- Bilan matière sur une opération de rectification discontinue.</li> <li>- Rendement de la rectification.</li> <li>- Bilan matière sur les plateaux : équation de la droite opératoire initiale.</li> <li>- Calcul du taux de reflux minimum en début de rectification.</li> <li>- Différents types de rectification : <ul style="list-style-type: none"> <li>• à taux de reflux constant ;</li> <li>• à qualité de distillat constante.</li> </ul> </li> <li>- Evolution de la droite opératoire au cours de la rectification.</li> </ul> <p>6-2-2-3 - Rectification continu d'un mélange binaire idéal.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Principe - bilan matière sur la colonne - rendement de la rectification.</li> <li>- Equation des deux droites opératoires (d'enrichissement et d'épuisement).</li> <li>- Détermination graphique du nombre de plateaux théoriques nécessaires.</li> <li>- Détermination du taux de reflux minimum. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bilans énergétiques : flux thermique à éliminer en tête de colonne.</li> <li>• Flux thermiques à apporter au bouilleur.</li> <li>• Bilans enthalpiques.</li> </ul> </li> </ul>		<p>Aucune intégration graphique ne peut être demandée.</p> <p>On se limitera au cas d'une alimentation à la température d'ébullition.</p> <p>On utilisera les valeurs moyennes des <math>C_p</math> pour chaque corps.</p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p>6-2-2-4 - Rectification de mélanges difficiles à séparer :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- cas de mélanges à plus de deux constituants,</li> <li>- cas de formation d'homoazéotrope ; <ul style="list-style-type: none"> <li>• addition d'un tiers corps : <ul style="list-style-type: none"> <li>* rectification azéotropique,</li> <li>* rectification extractive ;</li> </ul> </li> <li>• changement de pression,</li> </ul> </li> <li>- cas de formation d'hétéroazéotrope à immiscibilité partielle,</li> <li>- couplage de deux colonnes.</li> </ul> <p><b>6 - 3 - APPAREILLAGE.</b></p> <p>6-3-1 - Bouilleurs. Rôle - différents types selon le type de rectification (discontinue ou continue).</p> <p>6-3-2 - Condenseurs. Rôle - différents types - condenseurs partiel, total.</p> <p>6-3-3 - Caractéristiques d'une colonne de rectification.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rôle d'une colonne.</li> <li>- Efficacité - calcul du nombre réel de plateaux.</li> <li>- Rétention de liquide.</li> <li>- Souplesse d'utilisation.</li> <li>- Notion sur la dynamique d'une colonne : pertes de charges - vitesse optimale de la circulation de la vapeur - engorgement - diamètre de la colonne selon la production et le reflux.</li> </ul>	<p>Il est <b>INDISPENSABLE</b> de prévoir une distillation, un entraînement, une rectification discontinue <b>ET</b> une rectification continue.</p>	<p>Cette partie sera traitée essentiellement dans le cadre du schéma et des bilans-matière.</p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p>6-3-4 - Différents types de colonnes.</p> <p>6-3-4-1 - Colonnes à plateaux : description - avantages et inconvénients - efficacité.</p> <p>6-3-4-2 - Colonnes à garnissage : description - différents types de garnissage - avantages et inconvénients - hauteur équivalente à un plateau théorique (HEPT).</p> <p>6-3-5 - Appareillages annexes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- échangeurs : <ul style="list-style-type: none"> <li>• préchauffeur sur l'alimentation,</li> <li>• réfrigérants sur le distillat et le résidu ;</li> </ul> </li> <li>- mise sous vide, sous pression atmosphérique ou sous <math>P &gt; P</math> ordinaire, de la colonne ;</li> <li>- régulations types sur une installation de rectification ;</li> <li>- analyse de sécurité sur chaque partie de l'appareillage.</li> </ul>		<p>Sortie par gravité du distillat avec l'équilibrage des pressions. Utilisation d'un bac tampon.</p>

## 7<sup>ème</sup> PARTIE : EXTRACTION.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>7 - 1 - GÉNÉRALITÉS.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Définitions : soluté, solvant, diluant, transfert d'un soluté entre deux phases, extrait, raffinat.</li> <li>- Titres massiques, rapports massiques.</li> </ul>		<p>Le lien sera fait avec les opérations d'extraction vues au laboratoire.</p>
<p><b>7 - 2 - L'EXTRACTION LIQUIDE-LIQUIDE.</b></p> <p>7-2-1 - Représentations graphiques de l'équilibre entre différentes phases d'un mélange ternaire.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diagramme triangulaire rectangle.</li> <li>- Courbe de partage ou d'équilibre.</li> <li>- Coefficient de partage.</li> </ul> <p>7-2-2 - Méthodes d'extraction.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Extraction simple contact.</li> <li>- Extraction à étages multiples.</li> <li>- Extraction à contre courant :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• bilan-matière ;</li> <li>• détermination du nombre d'étages théoriques par la méthode de Mac Cabe et Thiele (dans le cas de solutions diluées on utilisera les titres massiques, dans le cas général on utilisera les rapports massiques), débit de solvant minimum.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Construction d'un diagramme triangulaire - détermination des conodales.</p> <p>Extraction liquide-liquide, en continu ou en discontinu.</p>	<p>Le diagramme triangulaire ne sera pas utilisé pour les extractions à contre courant.</p>

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
7-2-3 - Appareillages. – Mélangeur-décanteur ; colonnes agitées, pulsées, à garnissage, à plateaux. – Analyse de sécurité : dysfonctionnement, engorgement, ...		
<b>7 - 3 - L'EXTRACTION SOLIDE-LIQUIDE.</b>  – Méthodes d'extraction spécifiques : description de la percolation, la macération, l'infusion, la décoction, l'enfleurage. – Bilan matière. – Appareillage.		Pas de calculs à l'examen.
<b>7 - 4 - L'EXTRACTION LIQUIDE-GAZ.</b> <b>ABSORPTION ET DÉSORPTION</b>		
7-4-1 - Notions théoriques sur l'équilibre liquide-gaz. – Loi de Henry, influence de P et de T, courbe de partage, isothermes.	Absorption ou (et) désorption.	
7-4-2 - Méthodes. – Absorption simple contact. – Absorption à contre-courant : bilan, droite opératoire et détermination du nombre d'étages théoriques par la méthode de Mac Cabe et Thiele dans le cas de solutions diluées (titres molaires) et dans le cas général (rapports molaires).		
7-4-3 - Appareillage : description, analyse de sécurité et applications ; applications à la protection de l'environnement.		

## 8<sup>ème</sup> PARTIE : SÉDIMENTATION - FILTRATION.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>8 - 1 - SÉDIMENTATION.</b></p> <p>8-1-1 - Vitesse limite de chute.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Influence de la surface.</li> <li>- Calcul du débit.</li> <li>- Application à la sédimentation - flocculants.</li> <li>- Applications à l'entraînement et aux transports pneumatiques et hydrauliques - cyclones.</li> <li>- Application à la séparation de particules solides par leur taille et leur masse volumique.</li> <li>- Application aux décanteurs statiques florentins (liquide-liquide).</li> </ul> <p>8-1-2 - Décantation centrifuge : principe - sécurité liée aux machines tournant à grande vitesse.</p> <p>8-1-3 - Appareillage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Décanteur continu (solide - liquide).</li> <li>- Florentin (liquide-liquide).</li> </ul>	<p>Sur pilotes d'étude de ces phénomènes ou à l'occasion de certaines manipulations de fabrication.</p>	<p>Chapitre pouvant être traité sous forme de manipulations ou de travaux dirigés.</p>
<p><b>8 - 2 - FILTRATION.</b></p> <p>8-2-1 - Principe - milieu filtrant.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Influence des différents paramètres : surface de filtration, viscosité du filtrat, différence de pression, épaisseur du gâteau, porosités du support filtrant et du gâteau.</li> <li>- Adjuvants de filtration.</li> </ul> <p>8-2-2 - Filtration centrifuge. Principe.</p> <p>8-2-3 - Appareillage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtre sous vide.</li> <li>- Filtre sous pression.</li> <li>- Essoreuse continue.</li> </ul>	<p>Soit sur banc d'étude de la filtration, soit plus couramment, à l'occasion d'une manipulation de fabrication d'un produit solide.</p>	<p>Un exemple de chaque type.</p>

## 9<sup>ème</sup> PARTIE : TECHNIQUES DIVERSES.

COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p><b>9 - 1 - STOCKAGE ET TRANSPORT DES SOLIDES.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Silos.</li> <li>- Trémies.</li> <li>- Transporteurs à vis et à bande.</li> <li>- Ecluse rotative.</li> <li>- Transport par fluide.</li> </ul>		A voir en schéma.
<p><b>9 - 2 - MISE EN CONTACT D'UN SOLIDE ET D'UN FLUIDE.</b></p> <p>9-2-1 - Définitions.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Granulométrie.</li> <li>- Porosité (fraction de vide).</li> <li>- Surface spécifique.</li> <li>- Dureté.</li> <li>- Friabilité.</li> <li>- Diagrammes de répartition.</li> </ul> <p>9-2-2 - Fluidisation.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Principe.</li> <li>- Applications aux réacteurs, fours et sécheurs.</li> </ul> <p>9-2-3 - Colonnes à garnissage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Principe de fonctionnement.</li> <li>- Points de charge et d'engorgement.</li> <li>- Applications aux colonnes de lavage, de neutralisation et de rectification. Utilisation d'abaques pour les pertes de charge.</li> </ul>	<p>Sur pilotes d'étude de ces phénomènes.</p> <p>Sur pilotes d'étude de ces phénomènes ou sur pilotes d'absorption ou de rectification.</p> <p>En fonction des possibilités.</p>	<p>En travaux pratiques et en schéma.</p>
<p><b>9 - 3 - FRAGMENTATION DES SOLIDES.</b></p> <p>9-3-1 - Définitions.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Broyage</li> <li>- Concassage</li> <li>- Pulvérisation</li> <li>- Désintégration.</li> </ul>	<p>En fonction des possibilités.</p>	<p>Risques liés aux poussières.</p>



COURS	TRAVAUX PRATIQUES	COMMENTAIRES
<p>9-3-2 - Méthodes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compression.</li> <li>- Percussion.</li> <li>- Abrasion.</li> <li>- Cisaillement.</li> <li>- Arrachement.</li> </ul> <p>9-3-3 - Appareillage :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Broyeurs à marteau et à boulets.</li> </ul>		<p>Étude en schéma lié aux procédés de séparation</p>
<p><b>9 - 4 - SÉPARATION SOLIDE-GAZ : DÉPOUSSIÉRAGE.</b></p> <p>Par lavage - par cyclone - par filtration - par procédé électrostatique</p> <p><b>9 - 5 - ÉCHANGE D'IONS.</b></p> <p>Principe de fonctionnement des résines échangeuses d'ions. Application au traitement de l'eau.</p>	<p>En fonction des possibilités.</p>	<p>A l'occasion de ce chapitre, on donnera les bases de l'absorption et son application à la chromatographie.</p>
<p><b>9 - 6 - PROCÉDÉS A MEMBRANE.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Différents types de membranes.</li> <li>- Principe de la perméation.</li> <li>- Principe de l'ultrafiltration.</li> <li>- Principe de la filtration tangentielle.</li> <li>- Principe de la dialyse.</li> <li>- Principe de l'osmose inverse.</li> </ul> <p><b>9 - 7 - FORMULATION.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Définition.</li> <li>- Rôle des différents additifs (tensioactifs, charges etc...).</li> <li>- Phénomènes physiques mis en jeu.</li> </ul>	<p>En fonction des possibilités.</p>	<p>Description et principe de fonctionnement. Forces motrices mises en jeu. Limites d'utilisation. Comparaison avec d'autres méthodes classiques de séparations. Les calculs ne concerneront que les bilans-matière. Applications à la protection de l'environnement.</p> <p>Les différentes notions pourront être illustrées par un exemple, de façon à montrer les problèmes rencontrés en formulation.</p>

## Deuxième partie

## Contenus thématiques

L'organisation des semestres est la suivante.

## Premier semestre

<b>Thème E – énergie : conversions et transferts</b>	9
E.1 Descriptions microscopique et macroscopique d'un système . . . . .	10
E.2 Bilans d'énergie pour un système thermodynamique . . . . .	10
<b>Thème S – ondes et signaux</b>	11
S.1 Propagation d'un signal physique . . . . .	11
S.2 Signaux électriques en régime stationnaire . . . . .	12
<b>Thème C – constitution et transformations de la matière</b>	13
C.1 Constitution et cohésion de la matière à l'échelle des entités chimiques . . . . .	13
C.2 Transformations chimiques : évolution d'un système vers un état final . . . . .	15

## Second semestre

<b>Thème M – mouvements et interactions</b>	18
M.1 Description et paramétrage du mouvement d'un point . . . . .	18
M.2 Lois de Newton . . . . .	18
<b>Thème C – constitution et transformations de la matière</b>	20
C.3 Constitution de la matière : relation entre structure des entités chimiques et propriétés . . . . .	20
C.4 Transformations de la matière : évolution temporelle d'un système . . . . .	21
C.5 Transformations de la matière en chimie organique . . . . .	22
<b>Thème S – ondes et signaux</b>	25
S.3 Dynamique d'un circuit électrique du premier ordre . . . . .	25
<b>Thème E – énergie : conversions et transferts</b>	25
E.3 Formulation et application des principes de la thermodynamique à l'étude des machines thermiques . . . . .	25
E.4 Statique des fluides . . . . .	26
<b>Thème T – phénomènes de transport</b>	27
T.1 Transport de matière diffusif . . . . .	27

## Premier semestre

## Thème E – énergie : conversions et transferts

Après avoir mis l'accent sur le passage fondamental d'une réalité microscopique, où le rôle que peut jouer l'agitation thermique est souligné, à des grandeurs macroscopiques mesurables, cette partie propose d'abord, en s'appuyant sur des modèles fondamentaux, la description et l'étude de la matière à l'échelle macroscopique. Le premier principe de la thermodynamique est ensuite énoncé et permet d'établir les premiers bilans énergétiques, dont la formulation rigoureuse constitue un des objectifs de formation privilégiés du programme de thermodynamique de BCPST1. Les capacités identifiées doivent être introduites en s'appuyant, dès que possible, sur des dispositifs expérimentaux qui permettent leur acquisition progressive et authentique.

On utilise les notations suivantes : pour une grandeur extensive  $A$ ,  $a$  désigne la grandeur massique associée et  $A_m$  la grandeur molaire associée.

## E.1 Descriptions microscopique et macroscopique d'un système

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Caractérisation d'un système thermodynamique</b> Système thermodynamique. Échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique. État d'équilibre thermodynamique.	Préciser les paramètres nécessaires à la description d'un état microscopique et d'un état macroscopique d'un système thermodynamique. Définir l'échelle mésoscopique et en expliquer la nécessité. Associer qualitativement la température et la pression aux propriétés physiques du système à l'échelle microscopique.
<b>Gaz parfait</b> Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température, pression. Équation d'état du gaz parfait. Énergie interne du gaz parfait. Extensivité de l'énergie interne. Capacité thermique à volume constant d'un gaz considéré comme parfait.	Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz. Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un gaz considéré comme parfait, l'expression de la capacité thermique à volume constant étant fournie.
<b>Phase condensée indilatable et incompressible</b> Modèle de la phase condensée indilatable et incompressible. Énergie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée indilatable et incompressible.	Exploiter l'expression de la variation de l'énergie interne d'une phase condensée incompressible et indilatable en fonction de sa température.
<b>Description d'un corps pur en équilibre diphasé</b> Corps pur en équilibre diphasé. Diagramme de phases ( $P, T$ ). Cas particulier de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme de Clapeyron ( $P, v$ ), pression de vapeur saturante, titre en vapeur.	Analyser un diagramme de phases expérimental ( $P, T$ ). Positionner les différentes phases d'un corps pur dans les diagrammes ( $P, T$ ) et ( $P, v$ ).

## E.2 Bilans d'énergie pour un système thermodynamique

Cette partie, centrée sur le premier principe de la thermodynamique, aborde les bilans d'énergie. Les relations entre variables d'état thermodynamiques considérées dans cette partie se limitent exclusivement à celles qui relèvent du modèle du gaz parfait ou du modèle de la phase condensée indilatable et incompressible. La loi de Laplace caractérisant l'évolution adiabatique et réversible d'un gaz parfait n'est pas exigible, pas plus que ses conditions de validité. Elle peut néanmoins être utilisée à condition d'être fournie. L'utilisation de diagrammes ( $P, h$ ), abordés dans la partie E.3, permet d'envisager des fluides dont le comportement s'écarte des modèles précités.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Transformations thermodynamiques</b> Transformation thermodynamique d'un système. Transformations isochore, isobare et monobare. Thermostat, transformations monotherme et isotherme.	Identifier et définir un système ouvert, fermé, isolé. Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur au système pour déterminer l'état d'équilibre final.
<b>Premier principe de la thermodynamique. Bilans d'énergie.</b> Premier principe de la thermodynamique.	Citer les différentes contributions microscopiques et macroscopiques à l'énergie d'un système donné. Utiliser le premier principe de la thermodynamique entre deux états d'équilibre thermodynamique. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne. Distinguer le statut de la variation de l'énergie interne d'un système du statut des termes d'échange énergétique avec le milieu extérieur.
<b>Travail</b>	

Travail des forces de pression.	Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron ou de Watt.
<b>Transferts thermiques</b> Modes de transferts thermiques. Transformation adiabatique.	Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection et rayonnement.
Flux thermique conductif en géométrie unidimensionnelle; résistance thermique.	Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant fournie.
Flux thermique conducto-convectif : loi de Newton. Modélisation de l'évolution de la température d'un système incompressible et indilatable au contact d'un thermostat.	Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible et indilatable en contact avec un thermostat : établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la température du système.
Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi du déplacement de Wien, loi de Stefan-Boltzmann.	Utiliser les expressions fournies des lois du déplacement de Wien et de Stefan-Boltzmann pour expliquer qualitativement l'effet de serre.
<b>Fonction d'état enthalpie</b> Fonction d'état enthalpie; capacité thermique à pression constante d'un gaz parfait et d'une phase condensée.	Exprimer le premier principe de la thermodynamique sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final. Exprimer l'enthalpie du gaz parfait à partir de l'énergie interne. Exprimer la variation d'enthalpie d'un gaz parfait ou d'une phase condensée indilatable et incompressible en fonction de la variation de température. Citer la valeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.
Variation d'enthalpie associée à un changement d'état.	Exploiter l'extensivité de l'enthalpie. Réaliser un bilan énergétique en prenant en compte des changements d'état. <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie de fusion, etc.).</b>

## Thème S – ondes et signaux

### S.1 Propagation d'un signal physique

Cette partie permet de présenter, à partir d'exemples concrets, la variété des signaux physiques susceptibles de se propager, et de décrire qualitativement les mécanismes physiques sous-jacents et responsables de la propagation dans le cas d'un signal mécanique, acoustique ou sismique. Cette partie offre aussi l'occasion de dégager des caractéristiques communes simples de ces signaux, comme la célérité, l'amplitude, la fréquence et la longueur d'onde dans le cas d'un signal sinusoïdal. Aucune référence à une quelconque équation de propagation, ni aucune écriture mathématique de ses solutions ne sont requises. La dualité onde-particule de la lumière est introduite dans une approche principalement descriptive et qualitative. Il s'agit essentiellement de présenter le modèle du photon, utile dans d'autres parties du programme et de présenter quelques illustrations des interactions lumière-matière (par exemple : photosynthèse, rayonnement ionisant, spectroscopies, imagerie médicale et autres, cellule photovoltaïque, capteur de lumière, diode électroluminescente, etc.). La description géométrique de la propagation d'une onde lumineuse est réalisée à l'aide du modèle du rayon lumineux. L'accent est porté sur les phénomènes de réflexion et de réfraction. Ces notions sont ensuite étendues à la description de la propagation des ondes sismiques de volume, en lien avec les sciences de la vie et de la Terre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Signaux physiques</b> Exemples de signaux physiques.	Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux mécaniques, acoustiques, électriques et sismiques.

<p><b>Propagation d'un signal dans un milieu homogène, illimité, non dispersif et transparent</b> Célérité.</p>	<p>Obtenir l'expression de la célérité par analyse dimensionnelle à partir des grandeurs physiques fournies. Interpréter l'influence de ces grandeurs physiques sur la célérité. Citer les valeurs de la célérité du son dans l'air et dans l'eau dans les conditions usuelles.</p>
<p>Retard temporel.</p>	<p>Exploiter la relation entre la distance parcourue par le signal, le retard temporel et la célérité. Exploiter des données pour localiser l'épicentre d'un séisme.</p>
<p>Approche descriptive de la propagation d'un signal unidimensionnel.</p> <p>Cas particulier du signal sinusoïdal : amplitude, double périodicité spatiale et temporelle.</p>	<p>Exploiter une représentation graphique donnant l'amplitude du signal en fonction du temps en un point donné, ou en fonction de la position à un instant donné. Exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité. Citer les limites en termes de fréquences du spectre audible par l'être humain. <b>Mesurer la célérité d'un phénomène ondulatoire.</b></p>
<p><b>Rayonnement électromagnétique : modèles ondulatoire et particulaire de la lumière</b> Domaines spectraux du rayonnement électromagnétique.</p>	<p>Citer des ordres de grandeur de longueurs d'onde associées aux différents domaines spectraux du rayonnement électromagnétique (ondes radio, micro-ondes, rayonnements infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et gamma). Citer des applications scientifiques et techniques des différents domaines spectraux de rayonnement électromagnétique.</p>
<p>Photon : énergie, loi de Planck-Einstein. Effet photoélectrique et photoionisation.</p>	<p>Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique et l'effet photoionisant à l'aide du modèle particulaire de la lumière.</p>
<p><b>Réflexion, réfraction</b> Notion de rayon lumineux dans le modèle de l'optique géométrique. Indice optique d'un milieu transparent. Réflexion, réfraction des ondes lumineuses. Lois de Snell-Descartes. Rais sismiques. Généralisation des lois de Snell-Descartes aux ondes sismiques de volume.</p>	<p>Définir le modèle de l'optique géométrique et en indiquer les limites. Établir la condition de réflexion totale. Appliquer les lois de la réflexion et de la réfraction à l'étude de la propagation des ondes sismiques de volume dans la Terre.</p>

## S.2 Signaux électriques en régime stationnaire

Cette partie pose les bases nécessaires à l'étude des circuits électriques. Il s'agit avant tout de comprendre les principes utilisés et leur mise en œuvre. Si cette partie du programme se concentre sur l'étude du dipôle résistif, il est possible, lors des travaux pratiques, de faire appel à d'autres composants (diodes, photorésistances, thermistances, etc.) dès lors qu'aucune connaissance préalable sur leur fonctionnement n'est nécessaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Grandeurs électriques</b> Charge électrique, intensité du courant électrique. Régime variable et régime stationnaire. Potentiel électrique, référence de potentiel, tension électrique. Mise à la terre.</p>	<p>Relier l'intensité d'un courant électrique au débit de charges électriques. Utiliser la loi des nœuds et la loi des mailles. Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur. Citer les ordres de grandeur d'intensité et de tension électriques dans différents domaines d'application, et en particulier en lien avec la prévention du risque électrique.</p>
<p><b>Circuits en régime continu</b></p>	

Source de tension.	Modéliser une source de tension en utilisant la représentation de Thévenin.
Dipôle résistif, résistance, loi d'Ohm. Associations de deux résistances. Pont diviseur de tension.	Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente. Exploiter des ponts diviseurs de tension. <b>Mettre en œuvre un capteur résistif.</b>
<b>Aspect énergétique</b> Puissance et énergie électriques. Effet Joule.	Établir un bilan de puissance dans un circuit électrique.

## Thème C – constitution et transformations de la matière

### C.1 Constitution et cohésion de la matière à l'échelle des entités chimiques

Dans cette partie, sont abordées la constitution et la cohésion de la matière à l'échelle des entités chimiques (atomes, ions, molécules). L'objectif principal est d'envisager les différents niveaux d'étude pour parvenir à la description et à la représentation spatiale d'une entité puis, au second semestre, la description des propriétés physico-chimiques associées. La chimie organique est introduite en lien avec les programmes de sciences de la vie et de la Terre, par une première approche notamment des groupes caractéristiques et des familles fonctionnelles intervenant dans le domaine du vivant.

#### C.1.1 Constitution et cohésion au sein des atomes

L'étude de la structure de l'atome est l'occasion d'aborder les ordres de grandeur caractéristiques (distances, énergies). Les spectres de raies atomiques permettent d'introduire la notion de quantification des niveaux d'énergie électroniques. La configuration électronique des atomes, abordée dans le cycle terminal de la voie générale du lycée, est réinvestie en lien avec le tableau périodique, sans introduire les nombres quantiques. L'objectif est de systématiser le recours au tableau périodique pour déterminer le nombre d'électrons de valence d'un atome ou d'un ion monoatomique et pour comparer les propriétés d'électronégativité ou de polarisabilité de deux atomes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modélisation quantique de l'atome</b> Constitution de l'atome. Spectre de raies atomiques et quantification des niveaux énergétiques électroniques. Notion d'orbitale atomique : probabilité de présence des électrons, allures des orbitales atomiques $s$ et $p$ .	Relier longueurs d'onde d'émission ou d'absorption et diagramme de niveaux d'énergie électroniques. Citer les ordres de grandeur des énergies d'ionisation et des distances caractéristiques dans l'atome.
Classification périodique et configuration électronique : électrons de cœur, électrons de valence.	Établir la configuration électronique d'un atome dans son état fondamental à partir de son numéro atomique, pour les trois premières périodes. En déduire la configuration électronique des ions monoatomiques usuels. Établir la configuration électronique de valence d'un atome à partir du tableau périodique (bloc $f$ exclu).
Lien entre propriétés atomiques et tableau périodique : électronégativité, polarisabilité.	Comparer les électronégativités et les polarisabilités de deux atomes à partir des positions des éléments associés dans le tableau périodique.

#### C.1.2 Cohésion au sein d'entités polyatomiques : molécules et ions

La notion de recouvrement des orbitales atomiques (OA) est qualitativement présentée comme origine du modèle de la liaison covalente localisée puis délocalisée, en lien avec des données expérimentales. Le modèle VSEPR est limité aux cas les plus courants, en lien avec les structures des entités les plus représentées en chimie organique. La polarité d'une entité est reliée à sa géométrie et aux propriétés des atomes qui la constituent.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modèles de la liaison covalente</b> Modèle de Lewis de la liaison covalente localisée. Modèle quantique de la liaison : recouvrement des OA, notion de liaison $\sigma$ et de liaison $\pi$ .	Relier qualitativement à la notion de recouvrement des OA les différences d'ordres de grandeur des énergies des liaisons $\sigma$ et $\pi$ pour une liaison entre deux atomes de carbone.

<p>Longueur et énergie de la liaison covalente.</p> <p>Représentation de Lewis d'une molécule ou d'un ion polyatomique. Hypervalence.</p> <p>Modèles de la liaison covalente délocalisée : mésomérie.</p>	<p>Citer les ordres de grandeur de longueurs et d'énergies de liaisons covalentes.</p> <p>Établir une ou des représentations de Lewis pertinentes pour une molécule ou un ion polyatomique.</p> <p>Identifier les enchaînements donnant lieu à une délocalisation électronique dans une entité et représenter les formules mésomères limites d'une entité chimique.</p> <p>Mettre en évidence une éventuelle délocalisation électronique à partir de données sur les longueurs de liaison.</p>
<p><b>Géométrie et polarité des entités chimiques</b></p> <p>Géométrie d'une molécule ou d'un ion polyatomique; modèle VSEPR. Représentation de Cram.</p>	<p>Associer qualitativement la géométrie d'une entité à la minimisation de son énergie.</p> <p>Prévoir et interpréter les structures de type <math>AX_n</math> avec <math>n \leq 4</math> et <math>AX_pE_q</math> avec <math>p + q = 3</math> ou <math>4</math>.</p> <p>Interpréter des écarts entre les prévisions du modèle VSEPR et des données structurales.</p>
<p>Liaison polarisée, moment dipolaire, entité polaire.</p> <p>Pourcentage d'ionicité d'une liaison, limites du modèle de la liaison covalente localisée et du modèle de la liaison ionique.</p>	<p>Prévoir l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent d'une entité chimique et représenter, le cas échéant, la direction et le sens du moment dipolaire.</p> <p>Déduire de l'électroneutralité de la matière la stœchiométrie d'un solide ionique.</p>

### C.1.3 Constitution et caractérisation spectroscopique d'entités chimiques organiques et intervenant dans la chimie du vivant

En lien avec le programme de sciences de la vie et de la Terre, des familles fonctionnelles en chimie organique et des familles d'entités chimiques intervenant dans la chimie du vivant sont présentées. La structure d'entités organiques est validée par l'exploitation de spectres IR et RMN  $^1\text{H}$  sans qu'aucun développement théorique sur ces techniques spectroscopiques ne soit abordé. Le modèle de Lewis permet d'introduire les notions d'isomérie de configuration et de conformation. Les ordres de grandeur des énergies de liaison et de la barrière conformationnelle permettent de sensibiliser à la solidité et à la flexibilité des édifices polyatomiques. À ce stade, il n'y a pas d'attendus en termes de nomenclature IUPAC, cette dernière étant étudiée progressivement lors de l'étude des transformations chimiques organiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Familles d'entités chimiques organiques</b></p> <p>Familles fonctionnelles en chimie organique : amine, amide, cétone, aldéhyde, alcool, thiol, ester, acide carboxylique, hémiacétal et acétal, anhydride phosphorique.</p> <p>Familles d'entités chimiques intervenant dans la chimie du vivant :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ sucres (ou oses) et autres glucides;</li> <li>○ acides gras, triglycérides, phosphoglycérides et autres lipides;</li> <li>○ acides aminés, peptides et protéines;</li> <li>○ nucléosides, nucléotides, acides nucléiques.</li> </ul>	<p>Reconnaître et nommer les familles fonctionnelles présentes dans la représentation d'une entité chimique.</p> <p>Reconnaître et nommer la famille à laquelle appartient une entité chimique intervenant dans la chimie du vivant.</p>
<p><b>Spectroscopies d'absorption UV-visible et infrarouge</b></p> <p>Nature des transitions associées aux spectroscopies UV-visible et infrarouge, domaine du spectre des ondes électromagnétiques correspondant.</p> <p>Transmittance, absorbance.</p>	<p>Relier la longueur d'onde du rayonnement absorbé à la nature et à l'énergie de la transition associée.</p> <p>Identifier, à partir du spectre infrarouge et de tables de nombres d'onde de vibration, une liaison ou un groupe caractéristique dans une entité chimique organique.</p>
<p><b>Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire du proton</b></p> <p>Exploitation de spectres RMN <math>^1\text{H}</math>. Déplacement chimique, intégration. Multiplicité d'un signal : couplages du premier ordre <math>A_mX_p</math> et <math>A_mM_pX_q</math>.</p>	<p>Confirmer ou attribuer la structure d'une entité à partir de données spectroscopiques infrarouge et/ou de résonance magnétique nucléaire du proton et de tables de nombres d'onde ou de déplacements chimiques caractéristiques.</p>

<p><b>Isomérisation en chimie organique</b></p> <p>Isomérisation de constitution : isomérisation de chaîne, isomérisation de famille fonctionnelle.</p> <p>Représentation de Newman.</p> <p>Stéréoisomérisation de conformation en série aliphatique non cyclique; ordre de grandeur de la barrière conformationnelle.</p> <p>Chiralité.</p> <p>Stéréoisomérisation de configuration : descripteurs stéréochimiques <i>R</i>, <i>S</i>, <i>Z</i>, <i>E</i>, énantiomérisation, diastéréoisomérisation.</p>	<p>Déterminer la relation d'isomérisation entre deux isomères de constitution.</p> <p>Comparer la stabilité de plusieurs conformations.</p> <p>Déterminer si une entité est chirale.</p> <p>Attribuer un descripteur stéréochimique à un centre stéréogène.</p> <p>Déterminer la relation d'isomérisation entre deux stéréoisomères.</p> <p>Représenter une entité chimique organique à partir de son nom, en tenant compte de la donnée d'éventuelles informations stéréochimiques.</p> <p>Interpréter l'importance de la structure spatiale par des exemples pris dans le domaine du vivant.</p>
--	--

## C.2 Transformations chimiques : évolution d'un système vers un état final

L'objectif de cette partie est d'amener les étudiants à mobiliser de manière autonome les notions et modèles pour décrire, au niveau macroscopique, un système physico-chimique et son évolution. Il convient que les problématiques abordées, les illustrations et les applications prennent largement appui sur des transformations chimiques rencontrées dans la vie courante, au laboratoire, en milieu industriel ou dans le monde du vivant. À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- décrire un système physico-chimique en utilisant un vocabulaire scientifique précis;
- effectuer une distinction entre le monde des objets et des phénomènes (systèmes physico-chimiques, transformations chimiques) et celui des modèles (réaction chimique comme modèle d'une transformation au niveau macroscopique);
- proposer des approximations simplifiant l'exploitation quantitative de données expérimentales et en vérifier la pertinence;
- confronter les prévisions d'un modèle avec des résultats expérimentaux;
- traduire, en langage de programmation, les démarches mises en œuvre pour déterminer l'état final d'un système.

### C.2.1 Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique

L'étude quantitative de l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique, est réalisée dans un premier temps à partir d'une modélisation par une seule réaction chimique, symbolisée par une équation de réaction à laquelle est associée une constante thermodynamique d'équilibre. Il s'agit de prévoir le sens d'évolution de systèmes homogènes ou hétérogènes, et de déterminer leur composition dans l'état final.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Système physico-chimique</b></p> <p>Espèce physico-chimique.</p> <p>Mélange : concentration en quantité de matière, fraction molaire, pression partielle.</p>	<p>Recenser les espèces physico-chimiques présentes dans un système.</p> <p>Décrire la composition d'un système à l'aide des grandeurs physiques pertinentes.</p>
<p><b>Bilan de matière d'une transformation</b></p> <p>Modélisation d'une transformation par une ou plusieurs réactions chimiques.</p> <p>Équation de réaction; avancement, taux d'avancement, caractère total ou non d'une transformation.</p>	<p>Écrire l'équation de la réaction (ou des réactions) qui modélise(nt) une transformation chimique à partir d'informations fournies.</p> <p>Décrire qualitativement et quantitativement un système chimique dans l'état initial ou dans l'état final à partir de données expérimentales.</p>
<p><b>Évolution d'un système</b></p> <p>Activité, quotient de réaction.</p>	<p>Exprimer le quotient de réaction.</p>



Constante thermodynamique d'équilibre $K^\circ$ .	Associer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre au caractère thermodynamiquement favorable ou non d'une réaction. Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques d'équilibre sont connues.
Critère d'évolution.	Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système physico-chimique.
<b>Composition à l'état final</b> État d'équilibre chimique d'un système, transformation totale.	Déterminer la composition du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique. <b>Déterminer la valeur d'une constante d'équilibre et tester l'influence de différents paramètres sur la composition finale d'un système.</b>

### C.2.2 Applications aux transformations modélisées par des réactions acide-base

Les notions et les méthodes introduites dans la partie précédente sont réinvesties pour l'étude de transformations modélisées par des réactions acide-base. À cette occasion, des outils graphiques (diagrammes de prédominance et de distribution des espèces) sont introduits pour faciliter la modélisation d'une transformation, valider la détermination d'une composition à l'état final ou interpréter une courbe de suivi de titrage acido-basique.

La détermination analytique de la composition à l'état final est limitée à des transformations modélisées par une unique réaction chimique. La détermination de l'état final d'un système peut permettre d'accéder à une valeur de pH final qui peut être confrontée à une mesure de pH pour valider le modèle de réaction choisie. Aucune formule de calcul de pH n'est exigible. L'étude théorique des titrages acido-basiques n'est pas exigible, les courbes de suivi pH-métriques et conductimétriques étant analysées au moyen de diagrammes de prédominance et/ou de distribution des espèces.

En vue de faciliter l'appropriation des modèles proposés, le professeur utilise, et met à disposition des étudiants, des simulations obtenues à l'aide d'un langage de programmation. Ces simulations peuvent servir à illustrer le rôle de la constante d'acidité  $K_a$  et de la concentration initiale sur le taux d'avancement de la réaction d'un acide ou d'une base avec l'eau, mais également à tester la pertinence de la modélisation d'une transformation par une unique réaction chimique en comparant l'état final obtenu avec une ou avec deux réactions chimiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Couple acide-base. Constante d'acidité $K_a$ d'un couple, constantes d'acidité des deux couples acide-base de l'eau.	Reconnaître un couple acide-base. Écrire l'équation de la réaction associée à la constante d'acidité d'un couple donné.
pH, diagramme de prédominance, diagramme de distribution : tracé et exploitation. Application aux acides aminés, point isoélectrique.	Extraire les valeurs de constantes d'acidité de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance. <b>Capacité numérique :</b> tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le diagramme de distribution des espèces d'un ou plusieurs couple(s) acide-base, et déterminer la valeur du point isoélectrique d'un acide aminé.
Réaction acide-base; relation entre la constante thermodynamique d'équilibre et les constantes d'acidité des couples mis en jeu.	Reconnaître une réaction acide-base à partir de son équation. Écrire l'équation de la réaction acide-base modélisant une transformation en solution aqueuse et déterminer la valeur de sa constante thermodynamique d'équilibre.
Mise en solution et réaction d'un acide ou d'une base dans l'eau, modèle des acides et bases forts, des acides et bases faibles. Exemples usuels d'acides et de bases : nom, formule et caractère – faible ou fort – des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, éthanoïque, du dioxyde de carbone aqueux, de la soude, la potasse, l'ion hydrogéné-carbonate, l'ion carbonate, l'ammoniac.	Identifier le caractère fort ou faible d'un acide ou d'une base à partir d'informations fournies (pH d'une solution de concentration donnée, espèces présentes dans l'état final, constante d'acidité $K_a$ ). Citer l'influence de la constante d'acidité $K_a$ et de la concentration de l'acide ou de la base sur le taux d'avancement de la réaction d'un acide ou d'une base avec l'eau.

Exploitation de diagrammes de prédominance et état final d'un système.	Extraire les données thermodynamiques pertinentes de tables pour étudier un système en solution aqueuse. Utiliser les diagrammes de prédominance pour identifier des espèces incompatibles ou prévoir la nature des espèces majoritaires. Déterminer la composition du système dans l'état final pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique, en simplifiant éventuellement les calculs à l'aide d'hypothèses adaptées. <b>Mettre en œuvre une réaction acide-base pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse.</b>
Solutions tampons.	Citer les propriétés d'une solution tampon et les relier à sa composition. Citer des couples acide-base jouant un rôle de tampon dans des systèmes biologiques et géologiques.

### C.2.3 Applications aux transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction

Les transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction sont abordées par analogie avec celles modélisées par des réactions acide-base. L'étude des piles permet d'introduire la notion de potentiel d'électrode, dont la relation de Nernst, admise, permet de calculer la valeur à l'équilibre. Ici encore, l'utilisation d'outils graphiques est privilégiée pour faciliter la prévision ou l'interprétation de transformations. La détermination analytique de la composition à l'état final est limitée à des transformations modélisées par une unique réaction chimique. La relation entre la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction et les potentiels standard est admise. La notion de nombre d'oxydation permet de réinvestir le tableau périodique et de comparer des états d'oxydation du carbone dans les familles fonctionnelles rencontrées en chimie organique ou dans des systèmes biologiques. La capacité à tracer un diagramme de prédominance ne peut porter que sur des situations où la concentration totale en quantité de matière des solutés est fournie. Si la frontière sépare deux solutés, alors leurs concentrations en quantité de matière sont nécessairement égales sur la frontière.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Oxydants et réducteurs, nombre d'oxydation. Couple oxydant-réducteur. Exemples d'oxydants et de réducteurs minéraux usuels : nom et formule des ions thiosulfate, permanganate, hypochlorite, du dichlore, du peroxyde d'hydrogène, du dioxygène, du dihydrogène, des métaux. Application à la chaîne d'oxydation des alcools.	Lier la position d'un élément dans le tableau périodique et le caractère oxydant ou réducteur du corps simple correspondant. Prévoir les nombres d'oxydation extrêmes d'un élément à partir de sa position dans le tableau périodique. Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple.
Pile, tension à vide, potentiel d'électrode, potentiel standard, relation de Nernst. Réactions électrochimiques aux électrodes. Diagrammes de prédominance ou d'existence : tracé et exploitation.	Modéliser le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode. Déterminer la capacité électrique d'une pile. <b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement.</b>
Réaction d'oxydo-réduction. Constante thermodynamique d'équilibre. Dismutation et médismutation.	Identifier une réaction d'oxydo-réduction à partir de son équation. Écrire l'équation de la réaction d'oxydo-réduction modélisant une transformation en solution aqueuse et déterminer la valeur de sa constante thermodynamique d'équilibre. Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples mis en jeu.

Exploitation de diagrammes de prédominance ou d'existence. Composition d'un système à l'état final.	Extraire les données thermodynamiques pertinentes de tables pour étudier un système en solution aqueuse. Exploiter les diagrammes de prédominance ou d'existence pour identifier les espèces incompatibles ou prévoir la nature des espèces majoritaires. Déterminer la composition du système dans l'état final pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique, en simplifiant éventuellement les calculs à l'aide d'une hypothèse adaptée. <b>Mettre en œuvre une réaction d'oxydo-réduction pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse.</b>
Influence du pH sur les propriétés d'oxydo-réduction; potentiel standard apparent en biologie.	Relier le pouvoir oxydant ou réducteur d'un couple à son potentiel standard apparent.

## Second semestre

### Thème M – mouvements et interactions

#### M.1 Description et paramétrage du mouvement d'un point

Cette partie a pour objectif de permettre aux étudiants de disposer d'outils efficaces pour décrire le mouvement d'un point matériel ou d'un système matériel. Les mouvements étudiés se limitent à ceux qui peuvent être efficacement décrits au moyen de coordonnées cartésiennes. Il convient de familiariser progressivement les étudiants avec les projections et les dérivations de vecteurs, ainsi qu'avec l'algébrisation des grandeurs dans un contexte relevant de la physique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Repérage dans l'espace et dans le temps</b> Espace et temps classiques. Notion de référentiel. Caractère relatif du mouvement.	Choisir un référentiel adapté à la description du mouvement étudié.
<b>Cinématique du point</b> Description du mouvement d'un système par celui d'un point. Vecteurs position, vitesse et accélération. Système des coordonnées cartésiennes.	Exprimer, à partir d'un schéma, le déplacement élémentaire et en déduire géométriquement les composantes du vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes. Établir les expressions des composantes des vecteurs position, déplacement élémentaire, vitesse et accélération en coordonnées cartésiennes.
Mouvement rectiligne uniformément accéléré.	Caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : rectiligne, rectiligne uniforme, rectiligne uniformément accéléré.
Mouvement de vecteur accélération constant.	Établir l'expression de la vitesse et de la position en fonction du temps. Déterminer la vitesse en une position donnée. Obtenir l'équation de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.
	<b>Réaliser et exploiter quantitativement un enregistrement vidéo d'un mouvement : évolution temporelle des vecteurs vitesse et accélération.</b>

#### M.2 Lois de Newton

Cette partie permet d'abord de renforcer les compétences des étudiants relatives à la modélisation du mouvement d'un système dans le cadre de la mécanique classique, qu'il s'agisse des étapes de bilan des actions mécaniques, de projection de la deuxième loi de Newton dans la base des coordonnées cartésiennes ou de résolution des équations du mouvement. L'étude du mouvement d'un système matériel dans le champ de pesanteur uniforme constitue le cadre privilégié pour consolider

les compétences précitées. D'autres situations peuvent être proposées, dès lors qu'aucune connaissance préalable n'est nécessaire quant aux caractéristiques des forces mobilisées autres que le poids. Dans un second temps, l'introduction du modèle de force de frottement linéaire en vitesse permet d'enrichir l'étude du mouvement d'un point ou d'un système matériel et de confronter les étudiants aux limites de validité de ce modèle, et ainsi de donner toute leur importance aux étapes de modélisation et de validation d'un modèle. En seconde année, la prise en compte d'un modèle non linéaire en vitesse pour la force de frottement fluide vient compléter cette étude. Cette partie donne aussi l'occasion d'une première rencontre avec le modèle de l'oscillateur harmonique, qui joue un rôle majeur en physique et dont l'étude est approfondie en seconde année. L'étude de la déformation élastique d'un matériau comme la modélisation des frottements de glissement sont une première excursion dans la science des matériaux qui peut être illustrée dans le contexte de la géologie. On cherche également, grâce à quelques exemples pertinents, à renforcer les compétences d'analyse qualitative d'une équation différentielle : écriture sous forme adimensionnée, comportement asymptotique de la solution, positions d'équilibre, type d'évolution, durée ou période d'évolution, etc.

### M.2.1 Quantité de mouvement d'un système matériel

Notions et contenus	Capacités exigibles
Masse d'un système matériel. Conservation de la masse d'un système matériel fermé. Centre de masse d'un système matériel.	Justifier qualitativement la position du centre de masse d'un système matériel, cette position étant donnée.
Quantité de mouvement d'un système matériel.	Utiliser la relation entre la quantité de mouvement d'un système matériel et la vitesse de son centre de masse.

### M.2.2 Lois de Newton

Notions et contenus	Capacités exigibles
Première loi de Newton, principe d'inertie. Référentiel galiléen.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens. Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié.
Modélisation d'une action mécanique par une force. Troisième loi de Newton.	Établir un bilan des actions mécaniques s'exerçant sur un système ou sur plusieurs systèmes en interaction et en rendre compte en représentant les forces associées sur une figure.
Deuxième loi de Newton. Équilibre d'un système.	Utiliser la deuxième loi de Newton dans des situations variées. <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier une loi de force à l'aide d'un microcontrôleur ou d'analyser un mouvement enregistré.</b>
<b>Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme</b> Modèle du champ de pesanteur uniforme au voisinage de la surface d'une planète. Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme.	Établir et exploiter les équations horaires du mouvement. Établir l'équation de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.
Modèle d'une force de frottement fluide linéaire en vitesse. Influence de la résistance de l'air sur un mouvement de chute. Vitesse limite.	Déterminer et résoudre l'équation différentielle du mouvement. Exploiter une équation différentielle sans la résoudre analytiquement, par exemple : écriture sous forme adimensionnée, analyse en ordres de grandeur, existence d'une vitesse limite, utilisation des résultats obtenus par résolution numérique, etc.
Modèle du frottement de glissement : lois de Coulomb.	Exploiter les lois de Coulomb fournies dans les trois situations : équilibre, mise en mouvement, freinage. Formuler une hypothèse (quant au glissement ou non) et la valider.

Modèle linéaire de l'élasticité d'un matériau.	Caractériser une déformation élastique linéaire par sa réversibilité et son amplitude proportionnelle à la force appliquée. Extraire une constante de raideur et une longueur à vide à partir de mesures expérimentales ou de données. Analyser la limite d'une modélisation linéaire à partir de documents expérimentaux.
Exemple d'oscillateur harmonique : système masse-ressort en régime libre. Pulsation et période propres.	Déterminer et résoudre l'équation différentielle du mouvement. Déterminer les expressions de la pulsation et de la période propres du mouvement.

## Thème C – constitution et transformations de la matière

### C.3 Constitution de la matière : relation entre structure des entités chimiques et propriétés

L'étude des interactions entre entités chimiques a pour objectif d'interpréter, de prévoir ou de comparer des propriétés physiques : température de changement d'état, miscibilité, solubilité, formation de micelles et d'émulsions. Diverses illustrations et applications dans la vie courante ou au niveau du laboratoire (choix de solvant pour les synthèses et les extractions, interprétation des chromatogrammes sur couche mince) ou dans le domaine du vivant (double couche lipidique) peuvent être proposées.

#### C.3.1 Relation entre structure des entités chimiques et interactions à l'échelle des entités chimiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
Polarisabilité d'une entité polyatomique.	Comparer qualitativement le caractère polarisable de deux entités chimiques polyatomiques.
Interactions de van der Waals. Liaisons hydrogène (interactions par pont hydrogène). Interactions ion-ion et ion-dipôle.	Citer les ordres de grandeur des énergies mises en jeu dans les liaisons covalentes, liaisons hydrogène, interactions de van der Waals et interactions ion-ion. Prévoir, à partir de leur nature et leur structure, les interactions entre entités chimiques.

#### C.3.2 Relation entre structure des entités chimiques et propriétés physiques macroscopiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Changements d'état des corps purs</b> Température de changement d'état d'espèces chimiques moléculaires.	Prévoir ou interpréter l'évolution de températures de changement d'état d'espèces chimiques moléculaires en s'appuyant sur l'analyse des interactions entre entités chimiques associées.
<b>Solubilité, miscibilité</b> Grandeurs caractéristiques et propriétés de solvants moléculaires : moment dipolaire, permittivité relative, caractère protogène. Mise en solution d'une espèce chimique moléculaire ou d'un solide ionique.	Utiliser des données expérimentales pour en déduire les propriétés d'un solvant moléculaire. Interpréter la miscibilité ou la non-miscibilité de deux solvants. Interpréter les différences de rapports frontaux de deux espèces chimiques lors d'une chromatographie sur couche mince. Interpréter la solubilité d'une espèce chimique moléculaire ou ionique dans un solvant donné.
<b>Amphiphilie</b>	

<p>Espèces chimiques amphiphiles, micelles, structure schématique des membranes cellulaires. Émulsions.</p>	<p>Prévoir le caractère amphiphile d'une entité à partir de sa structure et interpréter sa solubilité dans un solvant. Interpréter la structure d'une association d'entités amphiphiles (micelle, bicouche, membrane cellulaire). Citer des exemples d'émulsions de la vie courante. Décrire la structure d'une émulsion en distinguant phase dispersée et phase continue. Interpréter les propriétés détergentes ou émulsifiantes des espèces chimiques amphiphiles.</p>
---	---

## C.4 Transformations de la matière : évolution temporelle d'un système

### C.4.1 Modélisation macroscopique : lois de vitesse et loi d'Arrhenius

L'étude de l'évolution temporelle d'un système chimique permet, dans un premier temps, de mettre en évidence expérimentalement les facteurs cinétiques concentration et température, et de les mettre en œuvre en stratégie de synthèse et d'analyse. Cette étude est prolongée par les premières modélisations macroscopiques d'évolution des concentrations avec des lois de vitesse d'ordre simple et d'influence de la température avec la loi d'Arrhenius. Les déterminations d'ordre global ou apparent mettent en œuvre la méthode différentielle ou intégrale, et peuvent s'effectuer à l'aide de tableurs ou de programmes élaborés en langage de programmation, pour l'exploitation des mesures dans le cadre d'un réacteur fermé parfaitement agité.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Vitesses volumiques de consommation d'un réactif et de formation d'un produit. Temps de demi-vie d'un réactif. Vitesse volumique de réaction pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique (supposée sans accumulation d'intermédiaires). Temps de demi-réaction d'une transformation totale ou non.</p>	<p>Relier la vitesse volumique de réaction à la vitesse volumique de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit. <b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation et à partir de données expérimentales, tracer l'évolution temporelle d'une concentration, d'une vitesse volumique de formation ou de consommation, d'une vitesse volumique de réaction.</p>
<p>Lois de vitesse : réactions sans ordre, réactions avec ordre simple (0, 1, 2), ordre global, ordre apparent.  Loi empirique d'Arrhenius et énergie d'activation.</p>	<p>Exprimer la loi de vitesse dans le cas d'une réaction chimique admettant un ordre, en se limitant strictement à des cas d'ordre 0, 1 ou 2 pour un unique réactif, ou se ramenant à un tel cas par dégénérescence de l'ordre ou conditions initiales stœchiométriques. Déterminer un temps de demi-réaction à partir d'une loi de vitesse. Déterminer un ordre de réaction à l'aide de la méthode différentielle ou par la méthode intégrale. Déterminer la valeur de la constante cinétique à une température donnée. <b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation et à partir de données expérimentales, déterminer les ordres partiels, la constante de vitesse et l'énergie d'activation. <b>Établir une loi de vitesse, déterminer des ordres partiels, la constante de vitesse et l'énergie d'activation à partir du suivi temporel d'une grandeur physique.</b></p>
<p>Facteurs cinétiques (concentration et température) en stratégie de synthèse et d'analyse : dilution, chauffage, reflux, trempé.</p>	<p>Reconnaître, dans un protocole, des opérations visant à augmenter ou à diminuer une vitesse de réaction.</p>

### C.4.2 Modélisation microscopique : mécanismes réactionnels et lois de vitesse dans des cas simples

La modélisation, au niveau microscopique, d'une transformation chimique s'appuie sur les mécanismes réactionnels. L'obtention d'une loi de vitesse à partir d'un mécanisme réactionnel est limitée, en première année, aux cas présentant une étape cinétiquement déterminante et permettant d'appliquer l'approximation du pré-équilibre rapide (l'approximation de l'état quasi-stationnaire est abordée dans le programme de deuxième année). Une approche numérique doit ici permettre

de favoriser la réflexion sur les phénomènes plutôt que la technicité calculatoire. Dans ce but, le professeur utilise, et met à disposition des étudiants, des simulations obtenues à partir d'un langage de programmation, afin d'illustrer le modèle de l'étape cinétiquement déterminante et d'identifier les conditions de son utilisation.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modélisation microscopique d'une transformation : mécanisme réactionnel, actes élémentaires, intermédiaires réactionnels. Molécularité d'un acte élémentaire et loi de van't Hoff.  Profil réactionnel.	Retrouver l'équation de la réaction modélisant la transformation à partir d'un mécanisme réactionnel par stades. Écrire la loi de vitesse d'un acte élémentaire.  Distinguer un intermédiaire réactionnel d'un complexe activé sur un profil réactionnel.
Modélisation d'une transformation par deux actes élémentaires opposés, état d'équilibre d'un système.  Modélisation d'une transformation par deux actes élémentaires successifs. Notion d'étape cinétiquement déterminante. Traitement cinétique d'un mécanisme : approximation de l'étape cinétiquement déterminante, approximation du pré-équilibre rapide.	<b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation, tracer l'évolution des concentrations par résolution numérique de l'équation différentielle. Exprimer en termes de concentrations l'égalité des vitesses à l'équilibre dans le cas d'une transformation modélisée par deux actes élémentaires opposés.  Reconnaître, à partir d'informations fournies, les conditions d'utilisation de l'approximation de l'étape cinétiquement déterminante ou de l'approximation du pré-équilibre rapide et établir la loi de vitesse de réaction à partir d'un mécanisme réactionnel. Confronter le résultat à la loi de vitesse expérimentale.

#### C.4.3 Catalyse, catalyseurs

Introduit expérimentalement, l'effet catalytique est modélisé, au niveau microscopique, par un mécanisme réactionnel concurrent présentant des étapes plus nombreuses et plus faciles. L'étude de la catalyse enzymatique est illustrée par des exemples pris dans le domaine du vivant ou d'applications utilisant le biomimétisme, et permet de réinvestir les structures et interactions entre entités chimiques. En ce qui concerne la catalyse enzymatique, seul le mécanisme sans inhibiteur dans le modèle de Michaelis-Menten doit être connu, les autres mécanismes faisant intervenir des inhibiteurs sont fournis pour pouvoir établir la loi de vitesse.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Catalyse d'une transformation, catalyseur.	Citer les propriétés d'un catalyseur et identifier un catalyseur d'une transformation à l'aide de données expérimentales.
Intervention du catalyseur dans le mécanisme réactionnel.	Reconnaître un catalyseur dans un mécanisme réactionnel. Mettre en évidence un effet catalytique par comparaison des profils réactionnels sans et avec catalyseur.
Catalyse enzymatique, site actif d'une enzyme, complexe enzyme-substrat. Modèles de Michaelis-Menten avec et sans inhibiteur.	Établir la loi de vitesse de formation d'un produit dans le cadre du modèle de Michaelis-Menten avec pré-équilibre rapide, les mécanismes avec inhibiteurs étant fournis.

### C.5 Transformations de la matière en chimie organique

Afin de faciliter cette introduction à la chimie organique et dans le but de préparer les étudiants à proposer des stratégies de synthèse simples, les mécanismes retenus en première année ne font pas intervenir d'étapes d'activation de groupes caractéristiques.

L'étude des caractéristiques stéréochimiques des réactions peut être abordée dans un second temps pour privilégier une spiralisation et une progressivité des acquisitions.

L'utilisation d'une banque de réactions permet d'enrichir les activités proposées et d'utiliser des transformations dont la connaissance n'est pas attendue des étudiants pour l'élaboration de stratégies de synthèse multi-étapes.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- interpréter les transformations chimiques étudiées dans une synthèse à partir de la réactivité des espèces chimiques organiques mises en jeu, réactivité déduite de la structure et des propriétés des entités chimiques qui les composent;
- pratiquer un raisonnement qualitatif argumenté pour expliquer le choix d'un mécanisme réactionnel en synthèse organique;
- acquérir des connaissances et compétences autour des interconversions entre groupes caractéristiques et des modifications de chaînes carbonées;
- analyser des problèmes de complexité croissante;
- identifier, dans une situation complexe, la partie utile au raisonnement;
- proposer une stratégie d'adaptation ou de contournement pour résoudre un problème.

### C.5.1 Transformations : du macroscopique au microscopique

L'objectif de cette partie est de familiariser les étudiants avec les raisonnements de la synthèse organique. Des exemples de synthèses totales ou de biosynthèses d'espèces chimiques dans le domaine du vivant pourront servir de support pour identifier des modifications de groupes caractéristiques et/ou de chaîne carbonée. Les techniques de spectroscopie, développées au premier semestre, permettent d'introduire les notions de chimiosélectivité et régiosélectivité. La partie « constitution de la matière » est réinvestie pour établir les propriétés nucléophiles et électrophiles des entités chimiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Du macroscopique...</b> Modification de groupes caractéristiques. Modification de la chaîne carbonée (allongement ou coupure). Types de réactions en chimie organique : addition, substitution, élimination, oxydation, réduction. Utilisation d'une banque de réactions.	Identifier le rôle (modification de la chaîne carbonée et/ou de groupes caractéristiques) d'une étape d'une synthèse organique multi-étapes. Identifier la nature d'une réaction en chimie organique. Utiliser une banque de réactions pour proposer une synthèse multi-étapes d'une espèce chimique organique.
Chimiosélectivité, régiosélectivité.	Identifier, à l'aide d'une banque de réactions ou de données fournies, une situation de régiosélectivité ou de chimiosélectivité. Proposer une méthode spectroscopique (UV-visible, infrarouge ou RMN <sup>1</sup> H) pour suivre l'évolution d'une transformation chimique ou mettre en évidence une éventuelle sélectivité.
<b>... au microscopique</b> Nucléophile, électrophile. Espèces chimiques classiquement utilisées comme électrophiles : halogénoalcane, aldéhydes, cétones, esters, carbocations. Espèces chimiques classiquement utilisées comme nucléophiles : organomagnésiens mixtes, amines, eau, ions hydroxyde, cyanure, hydrure, alcoolate, carbanions.	Prévoir les sites potentiellement électrophiles et/ou nucléophiles d'une entité chimique à partir de son schéma de Lewis et éventuellement l'écriture de formules mésomères.
Symbolisme de la flèche courbe.	Compléter un mécanisme réactionnel fourni avec des flèches courbes. Identifier le rôle de nucléophile ou d'électrophile joué par une entité chimique dans un acte élémentaire.

### C.5.2 Exemples de réactions usuelles en synthèse organique

L'approche mécanistique est ici privilégiée à l'approche fonctionnelle pour favoriser le raisonnement et la transférabilité dans des situations analogues et pour commencer à engager la réflexion sur les stratégies de synthèse. Les seules transformations et les seuls mécanismes réactionnels exigibles sont indiqués dans la colonne de gauche. Pour ces transformations, il est attendu des étudiants qu'ils soient en mesure de proposer la structure du(des) produit(s) attendu(s) à partir de réactifs fournis, et inversement, de proposer des réactifs permettant d'obtenir un produit fourni, et qu'ils en écrivent le mécanisme réactionnel en autonomie. L'utilisation d'une banque de réactions permet d'enrichir les activités proposées en procédant



par analogie de propriétés et d'utiliser des activations de groupes caractéristiques, sans justifier théoriquement l'augmentation de la réactivité constatée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Addition électrophile sur une double liaison C = C</b> Conversion d'un dérivé éthylénique en halogénoalcane (hydrohalogénéation par voie ionique) ou en alcool (hydratation), mécanisme, régiosélectivité. Stabilisation d'un carbocation par effets électroniques.</p>	<p>Expliciter la réactivité des dérivés éthyléniques. Tracer le profil énergétique de l'hydrohalogénéation pour identifier l'étape cinétiquement déterminante et proposer une loi de vitesse. Comparer la stabilité de deux carbocations. Prévoir ou justifier la régiosélectivité de l'addition électrophile sur un dérivé éthylénique.</p>
<p><b>Substitution nucléophile aliphatique</b> Mécanismes limites S<sub>N</sub>1 et S<sub>N</sub>2. Lois de vitesses associées. Application à la conversion d'halogénoalcane.</p>	<p>Justifier des différences de réactivité en termes de polarisabilité. Justifier le choix d'un mécanisme limite, S<sub>N</sub>1 ou S<sub>N</sub>2, par des arguments structuraux ou à partir d'informations cinétiques. Utiliser une banque de réactions pour proposer une modification de groupe partant dans le but d'en améliorer l'aptitude nucléofuge.</p>
<p><b>Addition nucléophile</b> Organomagnésiens mixtes : préparation à partir des halogénoalcane, inversion de polarité par insertion d'un atome de magnésium, intérêt d'un carbone nucléophile pour l'allongement de la chaîne carbonée. Allongement de chaîne carbonée : action des ions cyanures sur les espèces carbonylées, d'organomagnésien mixte sur les aldéhydes, les cétones et le dioxyde de carbone, mécanismes simplifiés. Modification de groupes caractéristiques : action d'hydrure sur les espèces carbonylées, mécanisme simplifié faisant intervenir un ion hydrure.</p>	<p>Relier le caractère nucléophile d'un organomagnésien mixte à sa structure. Justifier le choix d'un solvant d'une synthèse d'organomagnésien mixte. Proposer une méthode pour allonger une chaîne carbonée.</p>
<p><b>Addition nucléophile suivie d'élimination</b> Conversion d'un acide carboxylique en chlorure d'acyle. Formation d'ester et d'amide à partir de chlorure d'acyle, mécanismes. Hydrolyse basique d'ester, mécanisme. Addition d'organomagnésien mixte et d'hydrure sur un ester, mécanismes simplifiés.</p>	<p>Modéliser la transformation d'un acide carboxylique en chlorure d'acyle par action du chlorure de thionyle. Utiliser un diagramme de prédominance pour justifier l'obtention d'un ion carboxylate par hydrolyse basique. Valider la chimiosélectivité d'une transformation à partir de données expérimentales ou spectroscopiques.</p>
	<p><b>Mettre en œuvre la synthèse, la purification et la caractérisation d'une espèce organique.</b></p>

### C.5.3 Initiation à la stéréochimie dynamique des réactions

L'objectif de cette partie est de réinvestir les notions de stéréochimie abordées au premier semestre en introduisant une réflexion sur les aspects tridimensionnels des transformations organiques. Cette réflexion sera limitée aux réactions précédemment étudiées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Activité optique. Loi de Biot, mélange racémique. Stéréosélectivité, stéréospécificité. Caractéristiques stéréochimiques des réactions d'addition et de substitution.</p>	<p>Relier la valeur du pouvoir rotatoire à la composition d'un mélange de stéréoisomères. <b>Déterminer la composition d'un système chimique ou suivre une transformation chimique à partir de mesures d'activité optique.</b> Justifier la cohérence d'un mécanisme réactionnel à l'échelle microscopique, avec des données stéréochimiques obtenues à l'échelle macroscopique. Représenter les stéréoisomères attendus lors d'une transformation.</p>

## Thème S – ondes et signaux

### S.3 Dynamique d'un circuit électrique du premier ordre

L'étude des circuits électriques linéaires du premier ordre en régime transitoire fait suite à l'étude des circuits en régime stationnaire, conduite au premier semestre. Le modèle du condensateur idéal y occupe une place privilégiée en raison, notamment, de ses applications nombreuses et variées dans l'environnement quotidien (capteurs capacitifs par exemple). L'objectif de cette partie est de donner une première introduction à la réponse indicielle d'un système linéaire du premier ordre, et de comprendre les principes et les méthodes mises en œuvre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Système à comportement capacitif : modèle du condensateur idéal. Relation entre charge et tension électriques, entre intensité du courant électrique et tension électrique; capacité d'un condensateur. Continuité de la tension électrique aux bornes d'un condensateur. Énergie stockée dans un condensateur.	Exploiter l'expression fournie de la capacité d'un condensateur plan. Exploiter la condition de continuité de la tension électrique aux bornes d'un condensateur pour déterminer les conditions initiales dans un circuit.
Modèle du circuit $RC$ série alimenté par une source idéale de tension.	Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur.
Charge d'un condensateur par une source de tension constante, décharge d'un condensateur, temps caractéristique.	Établir l'expression, en fonction du temps, de la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge et de sa décharge. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire. <b>Réaliser l'acquisition d'un signal électrique caractéristique d'un système du premier ordre et en étudier les caractéristiques.</b>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique pour le circuit $RC$ série.

## Thème E – énergie : conversions et transferts

### E.3 Formulation et application des principes de la thermodynamique à l'étude des machines thermiques

L'objectif de cette partie est de mettre en œuvre le premier principe de la thermodynamique, vu au premier semestre, et le second principe de la thermodynamique, énoncé sous la forme de l'inégalité de Clausius, admise à ce stade, pour l'étude de machines thermiques. L'accent doit être mis sur la modélisation du fonctionnement d'une machine réelle par un cycle thermodynamique pertinent faisant apparaître des transformations modèles, tout en s'appuyant sur des situations concrètes et motivantes. L'établissement de l'expression du premier principe de la thermodynamique adaptée à l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire donne l'occasion de consolider les compétences relatives à la formulation du bilan d'une grandeur extensive. Les étudiants doivent avoir compris pourquoi apparaît la fonction enthalpie. Des exemples en lien avec les sciences de la vie et de la Terre (cycle respiratoire, thermodynamique de l'atmosphère par exemple) peuvent être introduits à la discrétion du professeur. L'utilisation du diagramme  $(P, h)$  d'un fluide réel permet d'étudier des situations concrètes, de se libérer de calculs excessifs et de s'interroger sur les limites de validité des modèles usuels de fluides. Les diagrammes  $(T, s)$  sont explicitement hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Application du premier principe de la thermodynamique et de l'inégalité de Clausius aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, limitations.	Décrire le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Citer quelques ordres de grandeur des rendements ou efficacités des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération.
Premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire dans un système muni d'une seule entrée et d'une seule sortie.	Démontrer et utiliser le premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire, en termes de grandeurs massiques ou en termes de puissances, notamment pour l'étude d'un détendeur, d'un compresseur, d'une turbine, d'un échangeur thermique.
Diagramme ( $P, h$ ) de fluides réels.	Exploiter un diagramme donnant la pression $P$ (ou $\log P$ ) en fonction de l'enthalpie massique $h$ d'un fluide réel pour l'étude de machines thermodynamiques réelles.

#### E.4 Statique des fluides

La partie « E.4 Statique des fluides » s'organise en deux sous-parties. L'établissement de la relation fondamentale de la statique des fluides donne l'occasion de mettre en œuvre un raisonnement à l'échelle locale de la particule de fluide. Il convient d'insister sur le principe du découpage d'un domaine physique (volume, surface) en éléments infinitésimaux et de la sommation d'une grandeur extensive (force) pour ce découpage. La notion de gradient d'un champ scalaire est hors programme.

L'étude de la stratification verticale de l'atmosphère et des océans terrestres peut être conduite en lien avec les sciences de la vie et de la Terre. L'analyse de la stabilité d'un fluide stratifié dans le champ de pesanteur repose sur la notion de flottabilité d'une particule de fluide. La recherche des conditions de stabilité vis-à-vis des mouvements verticaux de convection développée à la fin de cette partie, se veut plus transversale et donne ainsi l'occasion de réinvestir des notions vues dans d'autres parties du programme (modèle de l'oscillateur harmonique, force de frottement visqueux, transferts thermiques conductifs notamment). La comparaison des temps caractéristiques des phénomènes physiques favorables ou défavorables aux mouvements de convection peut être conduite à l'aide de nombres adimensionnés, sans que, pour autant, leur définition, leur dénomination ou encore leur expression ne soient exigibles.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Pression dans un fluide au repos</b> Forces volumiques, forces surfaciques. Résultante de forces de pression sur une surface.	Citer des exemples de forces surfaciques ou volumiques. Utiliser les symétries pour déterminer la direction d'une résultante de forces de pression. Déterminer l'expression ou la valeur de la résultante des forces de pression sur une surface plane.
Statique des fluides dans le champ de pesanteur uniforme.	Établir la relation $\frac{dP}{dz} = \pm \rho g$ .
Poussée d'Archimède.	Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède et démontrer son expression.
<b>Équilibre hydrostatique dans le champ de pesanteur terrestre</b> Modèle de l'atmosphère isotherme. Échelle de hauteur caractéristique de variation de la pression.	Établir l'expression de la pression en fonction de l'altitude dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait. Citer la valeur de la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer.
Stratification verticale des océans.	Établir l'expression de la pression avec la profondeur dans le cas d'un fluide incompressible.

Flottabilité.	Interpréter la flottabilité d'une particule de fluide à l'aide des projections verticales du poids et de la poussée d'Archimède. Identifier quelques phénomènes physiques favorables ou défavorables aux mouvements verticaux de convection dans l'atmosphère ou les océans terrestres. Construire, par analyse dimensionnelle, les temps caractéristiques associés à ces phénomènes et les comparer.
---------------	---

## Thème T – phénomènes de transport

### T.1 Transport de matière diffusif

Cette partie introduit le transport de matière diffusif sans formalisme vectoriel : le vecteur densité de courant de particules est explicitement hors programme. La loi phénoménologique de Fick est énoncée sous forme intégrale : l'expression du flux de particules est donnée en fonction de la dérivée de la densité volumique de particules par rapport à une seule coordonnée spatiale et d'une surface adaptée à la géométrie considérée. On insistera sur le rôle fondamental de l'agitation thermique dans le processus de diffusion. La formulation correcte d'un bilan de particules à l'échelle globale d'un système, en distinguant les échanges de particules à travers sa frontière de la production ou consommation de particules en son sein, est un des objectifs de formation visés. Pour autant, afin d'éviter toute dérive calculatoire, toute situation où la densité volumique de particules dépend du temps est exclue, à l'exception du régime quasi-stationnaire. Les régimes variables dans le temps sont seulement approchés de façon qualitative grâce à la loi d'échelle donnant le temps caractéristique de diffusion en fonction de l'extension spatiale et du coefficient de diffusion, introduite à partir d'une analyse dimensionnelle du coefficient de diffusion. Enfin, l'étude du transport de matière diffusif peut s'appuyer sur des situations concrètes et motivantes pour les étudiants (sédimentation, mûrissement des émulsions, membranes biologiques, etc.).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modèle phénoménologique de transport de matière</b> Flux convectif et flux diffusif de particules.	Distinguer un transport de matière diffusif d'un transport convectif.
Loi phénoménologique de Fick donnant le flux diffusif en fonction de la dérivée de la densité volumique de particules par rapport à une seule coordonnée spatiale, à travers une surface plane, cylindrique ou sphérique, adaptée à la géométrie considérée.	Discuter des dépendances du flux de particules à travers une membrane en fonction de ses paramètres géométriques (épaisseur et surface de la membrane) et physiques (nature du milieu) en lien avec des applications biologiques.
Coefficient de diffusion.	Citer l'ordre de grandeur du coefficient de diffusion dans un gaz ou d'une espèce dissoute en solution aqueuse dans les conditions usuelles.
Loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusion.	Exploiter la loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusion.
Bilan de particules en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.	Établir un bilan de particules, éventuellement en présence de sources internes. Exploiter la conservation du flux de particules en régime stationnaire et en l'absence de sources internes.

## Deuxième partie

## Contenus thématiques

<b>Thème E – énergie : conversions et transferts</b>	9
E.5 Second principe de la thermodynamique . . . . .	9
E.6 Description des systèmes fermés de composition variable . . . . .	9
E.7 Application des principes de la thermodynamique à l'étude des transformations physico-chimiques . . . . .	10
E.8 Changement d'état solide-liquide d'un mélange binaire . . . . .	11
<b>Thème C – constitution et transformations de la matière</b>	11
C.6 Transformations de la matière : évolution temporelle d'un système . . . . .	11
C.7 Transformations de la matière en solution aqueuse . . . . .	12
C.8 Transformations de la matière en chimie organique . . . . .	14
<b>Thème M – mouvements et interactions</b>	16
M.3 Approche énergétique du mouvement d'un point matériel . . . . .	16
M.4 Oscillateurs mécaniques . . . . .	17
M.5 Phénomènes de tension superficielle . . . . .	18
M.6 Fluides en écoulement . . . . .	19
<b>Thème S – ondes et signaux</b>	20
S.4 Filtrage linéaire d'un signal . . . . .	20
S.5 Interaction lumière-matière . . . . .	21
<b>Thème T – phénomènes de transport</b>	21
T.2 Conduction thermique . . . . .	21

## Thème E – énergie : conversions et transferts

## E.5 Second principe de la thermodynamique

L'étude du second principe de la thermodynamique s'inscrit dans la continuité du programme de thermodynamique de première année. La fonction d'état entropie est systématiquement donnée et sa construction n'est pas une capacité visée. On cite, sans développement quantitatif, son interprétation en termes de désordre statistique, c'est-à-dire de perte d'information sur la connaissance de l'état microscopique d'un système, de façon à faciliter une interprétation intuitive des bilans d'entropie. Le professeur peut profiter de cette partie pour donner une assise à l'inégalité de Clausius, admise en première année. Les diagrammes  $(T, s)$  sont explicitement hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Fonction d'état entropie; entropie massique et entropie molaire.	Interpréter qualitativement une augmentation de l'entropie d'un système isolé comme une perte d'information sur la connaissance de l'état du système à l'échelle microscopique.
Entropie d'un gaz parfait, d'une phase condensée indilatable et incompressible.	Exploiter l'expression fournie de la variation d'entropie entre deux états d'équilibre thermodynamique d'un gaz parfait ou d'une phase condensée indilatable et incompressible.
Second principe de la thermodynamique pour un système fermé. Entropie échangée, entropie créée, bilan d'entropie.	Formuler un bilan d'entropie sous forme infinitésimale ou intégrale. Associer la création d'entropie au caractère réversible ou irréversible de la transformation.

## E.6 Description des systèmes fermés de composition variable

Le critère d'évolution spontanée d'un système physico-chimique, admis en première année, est démontré à partir du second principe de la thermodynamique. On adopte, pour les potentiels chimiques, l'expression générale suivante :

$$\mu_i(T, P, \text{composition}) = \mu_i^{\text{réf}}(T, P) + RT \ln(a_i)$$

qui fait référence aux activités  $a_i$  introduites en première année. L'établissement de cette relation est strictement hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Enthalpie libre.  Identité thermodynamique pour la fonction d'état $G$ . Potentiel chimique.	Relier la variation de l'enthalpie libre et la création d'entropie lors d'une transformation spontanée à $T$ et $P$ constantes. Établir un critère d'évolution et un critère d'équilibre pour une transformation à $T$ et $P$ constantes en termes d'enthalpie libre. Relier les grandeurs $V$ , $S$ et $\mu$ aux dérivées partielles de $G(T, P, n)$ .
Condition d'équilibre thermodynamique d'un corps pur sous deux phases.	Utiliser le potentiel chimique pour prévoir l'évolution d'un système contenant un corps pur sous deux phases. Traduire la condition d'équilibre par une égalité de potentiels chimiques.
Identité d'Euler.	Exprimer l'enthalpie libre d'un système physico-chimique en fonction des potentiels chimiques.
Activité d'un constituant et potentiel chimique dans les cas modèles : — des gaz parfaits : $\mu_i(T, P_i) = \mu_i^\circ(T) + RT \ln\left(\frac{P_i}{P^\circ}\right)$ ; — des constituants en mélange idéal en phase condensée : $\mu_i(T, P, x_i) = \mu_i^{\text{réf}}(T, P) + RT \ln(x_i)$ ; — des solutés infiniment dilués : $\mu_i(T, P, c_i) = \mu_i^{\text{réf}}(T, P) + RT \ln\left(\frac{c_i}{c^\circ}\right)$ pour les solutés et $\mu_i(T, P) = \mu_i^{\text{réf}}(T, P)$ pour le solvant.	Exprimer l'activité d'un constituant dans un mélange idéal et dans une solution infiniment diluée. Exprimer et utiliser le potentiel chimique d'un constituant dans un mélange idéal et dans une solution diluée. Déterminer la variation d'enthalpie libre d'un système physico-chimique entre deux états d'équilibre thermodynamique. Interpréter un transport de matière à l'aide du potentiel chimique (partage entre deux solvants, diffusion membranaire, etc.).
Influence de la pression sur $\mu_i^{\text{réf}}$ pour des constituants en phase condensée. Osmose, pression osmotique, loi de van't Hoff.	Interpréter qualitativement le sens de transfert du solvant dans un processus osmotique en termes de potentiel chimique, la relation donnant la variation du potentiel chimique en fonction de la différence de pression étant fournie. Exploiter la loi de van't Hoff, son expression étant fournie.

### E.7 Application des principes de la thermodynamique à l'étude des transformations physico-chimiques

Dans cette partie, seules des transformations physico-chimiques monobares sont envisagées. Pour le calcul des grandeurs standard de réaction, on se limite strictement au cas où les enthalpies et entropies standard de réaction sont supposées indépendantes de la température (approximation d'Ellingham). Les grandeurs standard de réaction permettent la détermination de la constante thermodynamique d'équilibre dont la valeur était simplement admise en première année. La notion d'affinité chimique n'est pas utilisée, le sens d'évolution spontanée d'un système hors d'équilibre, à température et pression fixées, est déterminé par le signe de l'enthalpie libre de réaction. Enfin, l'étude de la modification d'un paramètre sur l'évolution d'un système chimique et son état d'équilibre permet d'aborder la problématique de l'optimisation d'un procédé chimique ou des perturbations dans les processus biologiques ou géologiques. Aucun calcul différentiel ne pourra être demandé.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Grandeur de réaction. État standard. Enthalpie standard de réaction et entropie standard de réaction. Enthalpie standard de formation, état standard de référence d'un élément, entropie molaire standard absolue. Loi de Hess.	Déterminer l'enthalpie standard et l'entropie standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques. Interpréter le signe de l'enthalpie standard de réaction. Prévoir le signe de l'entropie standard de réaction.
Effets thermiques en réacteur monobare : — transfert thermique associé à une transformation chimique en réacteur monobare isotherme ; — variation de température en réacteur adiabatique monobare.	Prévoir la température atteinte par un système siège d'une transformation physico-chimique supposée monobare et réalisée dans un réacteur modélisé comme adiabatique.

<p>Enthalpie libre de réaction : expression en fonction des potentiels chimiques.</p> <p>Critère d'évolution, critère d'équilibre dans le cas d'un système chimique dont l'évolution spontanée est modélisée par une seule réaction à <math>T</math> et <math>P</math> constantes.</p> <p>Enthalpie libre standard de réaction, constante thermodynamique d'équilibre et relation de van't Hoff dans le cadre de l'approximation d'Ellingham.</p>	<p>Relier l'enthalpie libre de réaction à la constante thermodynamique d'équilibre et au quotient de réaction.</p> <p>Prévoir le sens d'évolution d'un système chimique.</p> <p>Calculer la constante thermodynamique d'équilibre à partir de grandeurs standard de réaction.</p> <p>Modéliser l'évolution de la constante thermodynamique d'équilibre avec la température dans le cadre de l'approximation d'Ellingham.</p> <p>Identifier, en comparant le quotient de réaction et la constante thermodynamique d'équilibre, si le système se trouve dans une situation d'équilibre chimique ou hors équilibre chimique.</p>
<p>Nombre de degrés de liberté d'un système physico-chimique à l'équilibre; variance.</p> <p>Perturbation d'un système à l'équilibre chimique.</p>	<p>Reconnaître si une grandeur intensive est ou non un facteur d'équilibre.</p> <p>Dénombrer les degrés de liberté d'un système à l'équilibre et interpréter le résultat.</p> <p>Comparer le quotient de réaction et la constante thermodynamique d'équilibre pour interpréter l'effet de la variation d'un paramètre d'influence sur un système initialement à l'équilibre chimique.</p>
	<b>Déterminer une grandeur standard de réaction.</b>

### E.8 Changement d'état solide-liquide d'un mélange binaire

L'étude des changements d'état d'un mélange binaire s'effectue à l'aide de diagrammes de phases solide-liquide isobares fournis ou construits à partir des courbes d'analyse thermique. Les expressions théoriques des frontières ne sont pas attendues. Ces diagrammes sont utilisés pour interpréter le processus de cristallisation fractionnée. Cette partie peut être conduite en lien avec l'enseignement de sciences de la vie et de la Terre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Caractérisation d'un mélange binaire.</p> <p>Miscibilité totale ou nulle.</p>	<p>Convertir des fractions molaires en fractions massiques dans le cas de systèmes binaires et inversement.</p> <p>Citer les facteurs d'influence de la miscibilité : interactions entre entités chimiques, température.</p>
<p>Diagrammes de phases solide-liquide isobares :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— avec miscibilité totale à l'état solide,</li> <li>— avec miscibilité nulle à l'état solide, avec ou sans composé défini à fusion congruente; eutectique.</li> </ul> <p>Théorème des moments chimiques.</p> <p>Cristallisation fractionnée.</p>	<p>Exploiter un faisceau de courbes d'analyse thermique pour établir l'allure d'un diagramme de phases solide-liquide isobare.</p> <p>Attribuer les différentes zones du diagramme.</p> <p>Exploiter un diagramme de phases isobare pour décrire l'évolution d'un système lors d'une variation de température.</p> <p>Calculer et commenter la valeur de la variance en un point du diagramme.</p> <p>Décrire les caractéristiques des mélanges indifférents, eutectiques et des composés définis.</p> <p>Déterminer la ou les phases en présence et leur composition en un point donné d'un diagramme de phases solide-liquide isobare.</p> <p>Interpréter une cristallisation fractionnée à l'aide de diagrammes de phases solide-liquide isobares.</p> <p>Effectuer un bilan de matière pour une cristallisation fractionnée.</p>

## Thème C – constitution et transformations de la matière

### C.6 Transformations de la matière : évolution temporelle d'un système

L'étude des mécanismes réactionnels, limitée en première année au cas présentant une étape cinétiquement déterminante et/ou un équilibre préétabli, est poursuivie en deuxième année avec l'approximation de l'état quasi-stationnaire, ce qui permet d'aborder des mécanismes plus complexes, par stades ou en chaîne. L'objectif est d'établir des lois de vitesse à

partir des mécanismes, et de les confronter aux lois expérimentales pour valider ou invalider les mécanismes proposés. D'autres méthodes de validation de mécanismes pourront être présentées aux étudiants.

L'usage d'un langage de programmation, pour résoudre des équations différentielles, permet de mettre en évidence les conditions d'application de l'approximation de l'état quasi-stationnaire, et les situations de contrôle thermodynamique ou de contrôle cinétique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Mécanismes par stades. Mécanismes en chaîne : étapes d'initiation, de transfert, maillon de chaîne, étape de rupture de chaîne.	Reconnaître un mécanisme par stades ou un mécanisme en chaîne. Identifier la nature des actes élémentaires dans un mécanisme en chaîne. Associer le maillon de chaîne et l'équation de la réaction modélisée par le mécanisme réactionnel.
Modélisation d'une transformation catalysée : cycle catalytique.	Reconnaître un catalyseur ou un précurseur de catalyseur dans un cycle catalytique fourni. Écrire les équations des actes élémentaires d'un cycle catalytique fourni. Écrire l'équation de la réaction modélisant une transformation catalysée à partir du mécanisme présenté sous forme d'un cycle catalytique.
Modélisation microscopique d'une transformation par deux actes élémentaires successifs.  Traitement cinétique d'un mécanisme : approximation de l'étape cinétiquement déterminante, approximation du pré-équilibre rapide, approximation de l'état quasi-stationnaire.	<b>Capacité numérique</b> : à l'aide d'un langage de programmation, tracer, dans le cas de deux actes élémentaires successifs, l'évolution des concentrations par résolution numérique du système d'équations différentielles et mettre en évidence les conditions d'application de l'approximation de l'état quasi-stationnaire. Reconnaître, à partir d'informations fournies, les conditions d'utilisation de l'approximation de l'étape cinétiquement déterminante, de l'approximation du pré-équilibre rapide et de l'approximation de l'état quasi-stationnaire. Établir une loi de vitesse à partir d'un mécanisme réactionnel et la confronter à la loi de vitesse obtenue expérimentalement. <b>Établir la loi de vitesse d'une réaction pour tester un mécanisme réactionnel.</b>
Sélectivité d'une transformation modélisée par deux réactions : contrôle thermodynamique et contrôle cinétique.	Reconnaître à partir de données expérimentales, les paramètres qui favorisent un contrôle cinétique ou un contrôle thermodynamique. <b>Capacité numérique</b> : établir un système d'équations différentielles et le résoudre numériquement, à l'aide d'un langage de programmation, afin de visualiser l'évolution des concentrations au cours du temps et mettre en évidence les situations de contrôle cinétique ou thermodynamique.

### C.7 Transformations de la matière en solution aqueuse

L'étude des transformations en solution aqueuse a été abordée en première année pour des transformations modélisées par des réactions acide-base et des réactions d'oxydo-réduction. En seconde année, ces modélisations sont enrichies par les réactions de complexation et de précipitation. Ces réactions peuvent être illustrées par des applications en analyse chimique et en traitement des solutions (résines échangeuses d'ions, précipitation sélective, etc.) et par des exemples tirés de la chimie du vivant (respiration, photosynthèse, etc.) et de la géologie (sédimentation, etc.). L'influence de la complexation sur les propriétés oxydantes ou réductrices des espèces chimiques en solution permet d'établir des liens avec les cycles catalytiques rencontrés en sciences de la vie et de la Terre.

Les diagrammes de prédominance et de distribution d'espèces chimiques constituent un outil privilégié pour prévoir et interpréter les réactions mises en jeu; ils sont enrichis, en deuxième année, par les diagrammes d'existence de solides ioniques et les diagrammes potentiel-pH. Aucune capacité relative à la construction des diagrammes potentiel-pH n'est exigible.

Certaines capacités développées lors de l'étude des transformations de la matière en solution aqueuse sont mises en exergue afin de souligner leur caractère transversal.



Notions et contenus	Capacités exigibles
Transformation chimique en solution aqueuse modélisée par une seule réaction chimique.	<p>Extraire la valeur d'une constante thermodynamique d'équilibre à partir d'un diagramme de prédominance ou d'existence.</p> <p>Extraire les données thermodynamiques pertinentes de tables pour étudier un système en solution aqueuse.</p> <p>Utiliser des diagrammes de prédominance, d'existence ou potentiel-pH pour identifier des espèces incompatibles ou prévoir la nature des espèces majoritaires.</p> <p>Écrire l'équation de la réaction modélisant une transformation en solution aqueuse et déterminer la valeur de sa constante thermodynamique d'équilibre.</p> <p>Déterminer la composition du système dans l'état final pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique, en simplifiant éventuellement les calculs à l'aide d'hypothèses adaptées.</p> <p>Prévoir le sens d'évolution d'un système chimique, initialement à l'équilibre, à la suite d'une perturbation par comparaison du quotient de réaction et de la constante thermodynamique d'équilibre.</p> <p>Confronter les prévisions thermodynamiques à des données expérimentales et interpréter d'éventuels écarts en termes cinétiques ou de modélisation inappropriée.</p>
<p><b>Transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction</b></p> <p>Enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard d'oxydo-réduction des couples impliqués.</p>	<p>Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple oxydant-réducteur à partir de données thermodynamiques (constantes thermodynamiques d'équilibre, potentiels standard).</p>
<p><b>Diagrammes potentiel-pH</b></p> <p>Lecture et exploitation des diagrammes potentiel-pH.</p> <p>Diagramme potentiel-pH de l'eau.</p>	<p>Attribuer les différents domaines d'un diagramme potentiel-pH fourni à des espèces chimiques données.</p> <p>Prévoir une éventuelle dismutation ou médiatisation en fonction du pH du milieu.</p>
<p><b>Transformations modélisées par des réactions de complexation-décomplexation</b></p> <p>Atome ou ion central, ligand, modélisation de la liaison entité chimique centrale-ligand par recouvrement <math>\sigma</math> entre orbitales, complexe, indice de coordination.</p> <p>Constante de formation globale d'un complexe.</p> <p>Réaction d'échange de ligands : relation entre structure et propriétés du ligand, effet chélate, influence de la proportion relative de ligands.</p> <p>Influence de la complexation sur les propriétés d'oxydo-réduction.</p>	<p>Relier qualitativement la liaison entité chimique centrale-ligand à la notion de recouvrement d'orbitales.</p> <p>Citer des exemples de complexes intervenant dans le domaine des sciences du vivant pour le transport de ligand et l'activation d'un ligand.</p> <p>Justifier par un argument entropique l'origine de l'effet chélate.</p> <p>Identifier, dans un cycle catalytique fourni, les complexes, les modifications ou échanges de ligand et les évolutions du nombre d'oxydation de l'entité chimique centrale.</p> <p>Citer des exemples issus du domaine des sciences du vivant où les propriétés oxydantes ou réductrices d'un centre métallique sont modifiées par son intégration dans un complexe.</p>
<p><b>Transformations modélisées par des réactions de précipitation-solubilisation</b></p>	

<p>Mise en solution d'un solide ionique : produit de solubilité.</p> <p>Condition de précipitation d'un solide ionique : diagramme d'existence.</p> <p>Solubilité et paramètres d'influence de la solubilité : température, effet d'ion commun, pH, complexation.</p>	<p>Citer des exemples de précipités intervenant dans le domaine de la géologie.</p> <p>Prévoir, à partir de données thermodynamiques et de conditions opératoires, l'état de saturation ou de non saturation en solide ionique d'une solution aqueuse.</p> <p>Prévoir qualitativement l'évolution de la solubilité suite à l'introduction d'un ion commun ou d'un ligand.</p> <p>Justifier qualitativement l'allure et exploiter une courbe de solubilité en fonction du pH.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation, déterminer les conditions optimales pour séparer deux ions par précipitation sélective.</p>
	<p><b>Mettre en œuvre des réactions de complexation, de précipitation, d'oxydo-réduction et acide-base pour effectuer une analyse quantitative ou des traitements d'une solution.</b></p>

## C.8 Transformations de la matière en chimie organique

Cette partie s'inscrit dans la continuité de la partie correspondante du programme de physique-chimie de BCPST1 et poursuit les objectifs suivants :

- s'approprier les stratégies de synthèse organique en complétant l'étude des méthodes de conversion de groupes caractéristiques et de création de liaison carbone-carbone ;
- consolider et compléter les connaissances des mécanismes fondamentaux, notamment en présence d'étapes d'activation.

L'approche retenue privilégie donc l'aspect mécanistique et la stratégie de synthèse à l'approche fonctionnelle, mais l'enseignant dispose de sa liberté pédagogique pour construire la progression de son choix. Le cours et les activités s'appuient le plus souvent possible sur des exemples issus de la chimie du vivant, de la chimie fine et de la chimie industrielle, et permettent une sensibilisation aux principes d'une chimie respectueuse de l'environnement.

À travers les capacités et contenus exigibles, sont développées des compétences générales qui pourront par la suite être réinvesties, consolidées et valorisées, parmi lesquelles :

- interpréter les transformations chimiques étudiées dans une synthèse à partir de la réactivité des espèces chimiques organiques mises en jeu, réactivité déduite de la structure et des propriétés des entités chimiques qui les composent ;
- pratiquer un raisonnement qualitatif argumenté pour choisir un mécanisme réactionnel en synthèse organique ;
- analyser des problèmes de complexité croissante ;
- identifier dans une situation complexe la partie utile au raisonnement ;
- proposer une stratégie d'adaptation ou de contournement pour résoudre un problème.

### C.8.1 Notions et capacités transversales développées lors de l'étude des transformations en chimie organique

Dans le prolongement des compétences générales présentées ci-dessus, l'étude des transformations en chimie organique s'appuie sur les notions et capacités transversales suivantes, qui pourront être introduites progressivement en fonction des choix pédagogiques opérés.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Réaction acide-base en chimie organique</b></p> <p>Échelle de <math>pK_a</math> généralisée. Exemples d'acides et de bases utilisés en chimie organique.</p> <p>Ordre de grandeur des <math>pK_a</math> des couples acido-basiques : acide carboxylique / carboxylate, alkyloxonium / alcool, alcool / alcoolate, phénol / phénolate, ammonium / amine, amine / amidure, carbonyle / énolate.</p>	<p>Choisir une base adaptée à la déprotonation quantitative d'une espèce chimique organique.</p>
<p><b>Utilisation d'une banque de réactions</b></p>	<p>Utiliser une banque de réactions fournie pour compléter une séquence réactionnelle, proposer des conditions expérimentales ou déterminer la structure d'espèces chimiques organiques.</p>
	<p><b>Mettre en œuvre la synthèse, l'isolement, la purification et la caractérisation d'une espèce chimique organique.</b></p>

**C.8.2 Activation de la réactivité**

L'étude amorcée en première année est enrichie de mécanismes réactionnels faisant apparaître des étapes d'activation de groupe caractéristique. L'initiation à la stéréochimie dynamique est par ailleurs prolongée.

Les seules transformations et les seuls mécanismes exigibles sont indiqués dans la colonne de gauche. Pour ces transformations, il est attendu des étudiants qu'ils soient en mesure de proposer la structure du(des) produit(s) attendu(s) à partir de réactifs fournis, et inversement, proposer des réactifs permettant d'obtenir un produit fourni, et qu'ils en écrivent le mécanisme réactionnel en autonomie.

**Activation de l'aptitude nucléofuge**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Substitution nucléophile aliphatique</b> Formation et réactivité d'esters sulfoniques : — conversion d'un alcool en ester sulfonique; — formation de composés par substitution nucléophile sur un ester sulfonique; mécanismes limites.</p> <p>Conversion d'un alcool en halogénoalcane par action d'une solution concentrée d'halogénure d'hydrogène; mécanismes limites.</p>	<p>Comparer les réactivités des liaisons carbone-oxygène dans le cas des alcools, des esters sulfoniques et des ions alkyloxoniums.</p> <p>Commenter, dans une synthèse multi-étapes, le choix de l'activation d'un alcool par protonation ou par passage par un ester sulfonique.</p>
<p><b><math>\beta</math>-élimination</b> Déshydratation acido-catalysée d'un alcool : mécanisme limite E1. Réactions de <math>\beta</math>-élimination sur les halogénoalcane et sur les esters sulfoniques en série acyclique : mécanisme limite E2. Compétition substitution-élimination.</p>	<p>Prévoir ou interpréter la régiosélectivité et la stéréosélectivité d'une <math>\beta</math>-élimination en milieu acide sur un alcool. Prévoir ou interpréter la régiosélectivité, la stéréosélectivité et la stéréospécificité éventuelle d'une <math>\beta</math>-élimination sur un halogénoalcane ou sur un ester sulfonique. Interpréter la formation de plusieurs produits par la compétition entre les réactions de substitution et d'élimination.</p>

**Activation du caractère électrophile**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Addition nucléophile</b> Activation électrophile du groupe carbonyle. Acétalisation des aldéhydes et des cétones : conditions expérimentales, mécanisme. Hémiacétalisation acido-catalysée du glucose; glucopyranoses, anomérie, conformations; mutarotation du glucose.</p>	<p>Proposer et justifier les conditions expérimentales permettant la préparation d'un acétal.</p> <p>Représenter le cyclohexane, un cyclohexane monosubstitué et un glucopyranose dans leur conformation la plus stable. Interpréter la mutarotation du glucose par le caractère réversible de l'hémiacétalisation.</p>
<p><b>Addition nucléophile suivie d'élimination</b> Synthèse des esters par activation du groupe carboxyle <i>in situ</i> par protonation, mécanisme. Hydratation-hydrolyse acide des nitriles et hydrolyse acide des esters et des amides; mécanismes.</p>	<p>Proposer et justifier les conditions expérimentales permettant la préparation d'un ester ou l'hydrolyse acide d'un ester, d'un amide ou d'un nitrile.</p>

**Activation du caractère nucléophile**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Substitution nucléophile aliphatique</b> Activation nucléophile des alcools et phénols : formation d'acoolates par réaction acido-basique. Synthèse d'éther-oxydes par la méthode de Williamson; mécanisme.</p>	<p>Proposer une voie de synthèse d'un éther-oxyde dissymétrique. Interpréter la formation de plusieurs produits à partir de résultats expérimentaux fournis.</p>

<p>Formation d'ions énolate : acidité de l'atome d'hydrogène en position <math>\alpha</math> d'un groupe carbonyle. Équilibre céto-énolique.</p> <p>Généralisation aux espèces chimiques possédant un atome d'hydrogène en position <math>\alpha</math> d'un groupe <math>\pi</math>-accepteur.</p> <p>C-alkylation en position <math>\alpha</math> d'un groupe carbonyle de cétone : mécanisme limite <math>S_N2</math>.</p>	<p>Justifier l'acidité d'un composé énolesable.</p> <p>Justifier une éventuelle exception au caractère généralement déplacé de l'équilibre céto-énolique en faveur de la forme céto.</p> <p>Justifier la restriction de la C-alkylation aux cétones énolesables.</p>
<p><b>Addition nucléophile suivie ou non d'élimination</b></p> <p>Aldolisation non dirigée : mécanisme en milieu basique.</p> <p>Aldolisation croisée dirigée avec déprotonation totale préalable : mécanisme.</p> <p>Crotonisation : déshydratation de l'aldol (cétol) en présence d'une base, mécanisme limite <math>E1_{CB}</math> ; régiosélectivité.</p> <p>Réaction de Claisen. Mécanisme.</p>	<p>Choisir, dans le cadre d'une stratégie de synthèse, les meilleures conditions de préparation d'un aldol ou d'un cétol issu d'une aldolisation croisée.</p> <p>Justifier la régiosélectivité de la crotonisation en présence d'une base.</p> <p>Choisir une base adaptée à la déprotonation en position <math>\alpha</math> d'une fonction ester lors d'une réaction de Claisen.</p>

### C.8.3 Initiation à la stratégie de synthèse

Cette partie permet d'amener les étudiants à pouvoir proposer une stratégie de synthèse à travers l'analyse de la réactivité des espèces chimiques et à interpréter la nature et l'ordre des étapes mises en œuvre dans le cas d'une synthèse multi-étapes. L'élaboration d'une courte synthèse multi-étapes par les étudiants peut se faire en autonomie à l'aide d'une banque de réactions fournie, à l'aide des réactions exigibles qui figurent au programme des deux années de BCPST ou à partir de raisonnements procédant par analogies de structure et de réactivité. Les étudiants sont amenés à questionner l'impact environnemental de certaines voies de synthèse totale au laboratoire (choix des réactifs, solvants, durée de chauffage).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Protection-déprotection</b></p> <p>Protection-déprotection du groupe carbonyle ou d'un diol par acétalisation ; conditions expérimentales.</p> <p>Protection-déprotection du groupe hydroxyle : synthèse et hydrolyse d'esters, synthèse d'éther-oxydes.</p> <p>Protection-déprotection du groupe amino : synthèse et hydrolyse d'amides.</p>	<p>Justifier la nécessité de protéger un groupe caractéristique dans une synthèse multi-étapes, une banque de réaction étant fournie le cas échéant.</p> <p>Identifier les étapes de protection et de déprotection d'un groupe carbonyle, d'un groupe carboxyle, d'un groupe amino, d'un groupe hydroxyle ou d'un diol dans une synthèse multi-étapes.</p>
<p><b>Synthèse multi-étapes</b></p> <p>Modifications de groupes caractéristiques et de chaînes carbonées.</p> <p>Rendement, optimisation, prise en compte de l'impact environnemental.</p>	<p>Analyser une synthèse multi-étapes fournie en termes de stratégie de synthèse : ordre des étapes, activation, protection de groupes caractéristiques, rendement, sélectivité.</p> <p>Proposer ou justifier, éventuellement en s'appuyant sur une banque de réactions fournie, une méthode de modifications de groupes caractéristiques et de chaînes carbonées adaptée à une synthèse multi-étapes.</p> <p>Concevoir une stratégie de synthèse simple en tenant compte des impacts environnementaux.</p>

## Thème M – mouvements et interactions

### M.3 Approche énergétique du mouvement d'un point matériel

Cette partie vise à construire une démarche alternative et complémentaire de celle vue en première année pour l'étude d'une situation relevant de la mécanique – et plus généralement de la physique – fondée sur la conservation de l'énergie mécanique. Cette approche est l'occasion d'illustrer la capacité prédictive des analyses graphiques et numériques, par exemple pour décrire un comportement à partir d'une représentation graphique de l'énergie potentielle dans le cas d'un mouvement conservatif.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Puissance, travail et énergie cinétique</b> Puissance et travail d'une force. Théorème de l'énergie cinétique dans un référentiel galiléen, dans le cas d'un système modélisé par un point matériel.</p>	<p>Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force. Exploiter le théorème de l'énergie cinétique.</p>
<p><b>Champ de force conservative et énergie potentielle</b> Énergie potentielle. Lien entre un champ de force conservative et l'énergie potentielle dans un cas unidimensionnel.</p>	<p>Exploiter la relation entre la force et la dérivée spatiale de l'énergie potentielle dans un cas unidimensionnel. Citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur dans le cas d'un champ de pesanteur uniforme et de l'énergie potentielle élastique. Associer le sens de la force au sens de variation de l'énergie potentielle.</p>
<p><b>Énergie mécanique</b> Énergie mécanique. Théorème de l'énergie mécanique. Mouvement conservatif. Mouvement conservatif à un degré de liberté. Application à la liaison chimique. Cas d'un système soumis à un champ de force uniforme.</p>	<p>Exploiter la conservation de l'énergie mécanique pour analyser un mouvement. Identifier, sur un graphe d'énergie potentielle, une barrière et un puits d'énergie potentielle. Déduire, d'un graphe d'énergie potentielle, le comportement qualitatif du système : trajectoire bornée ou non, positions accessibles, positions de vitesse nulle.</p>
<p>Positions d'équilibre. Stabilité.</p>	<p>Déduire, d'un graphe d'énergie potentielle, l'existence de positions d'équilibre. Analyser qualitativement la nature stable ou instable de ces positions.</p>

#### M.4 Oscillateurs mécaniques

Cette partie est consacrée à l'étude des oscillateurs mécaniques, dans divers régimes d'évolution. On insiste sur la généralité des modèles étudiés afin de les transposer *in fine* dans d'autres contextes physiques que la mécanique. L'ouverture proposée à l'oscillateur harmonique quantique unidimensionnel permet d'illustrer le passage d'un spectre énergétique continu, dans le régime classique, à un spectre énergétique discret dans le régime quantique. Le spectre d'énergie de l'oscillateur harmonique quantique unidimensionnel est admis sans démonstration et permet d'interpréter les niveaux d'énergie vibrationnels d'une molécule.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Oscillateurs libres</b> Modèle de l'oscillateur mécanique harmonique. Mouvements de faible amplitude au voisinage d'une position d'équilibre stable. Approximation locale par un puits d'énergie potentielle harmonique.</p>	<p>Établir et exploiter une intégrale première du mouvement. Procéder à un bilan énergétique. Établir l'équation différentielle linéarisée du mouvement au voisinage d'une position d'équilibre. <b>Capacité numérique</b> : à l'aide d'un langage de programmation, mettre en évidence le non isochronisme des oscillations d'un oscillateur anharmonique.</p>
<p>Oscillateur harmonique quantique unidimensionnel. Application aux niveaux d'énergie vibrationnels d'une molécule.</p>	<p>Exploiter la relation fournie <math>E_n = (n + \frac{1}{2})h\nu</math>.</p>

Oscillateur mécanique amorti par frottement visqueux.	<p>Analyser qualitativement l'évolution temporelle transitoire d'un oscillateur mécanique amorti en fonction de ses paramètres caractéristiques.</p> <p>Écrire sous forme canonique l'équation différentielle du mouvement afin d'identifier la pulsation propre et le facteur de qualité.</p> <p>Discuter qualitativement la nature du mouvement.</p> <p>Résoudre l'équation différentielle du mouvement.</p> <p>Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire.</p> <p><b>Mesurer la pulsation propre et le facteur de qualité d'un oscillateur mécanique.</b></p>
<p><b>Oscillateurs forcés</b></p> <p>Oscillateur mécanique soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance, bande passante.</p>	<p>Résoudre analytiquement l'équation différentielle du mouvement d'un oscillateur harmonique en régime sinusoïdal forcé et mettre en évidence les insuffisances du modèle.</p> <p>Mettre en évidence les effets du terme d'amortissement sur la réponse d'un oscillateur à partir de résultats expérimentaux ou simulés.</p> <p>Estimer, à partir de résultats expérimentaux ou simulés, la valeur de la pulsation de résonance et l'intervalle de pulsations ou de fréquences correspondant à la bande passante.</p> <p>Relier qualitativement l'acuité de la résonance au facteur de qualité.</p> <p><b>Identifier un phénomène de résonance (oscillateurs mécanique, électrique, acoustique, etc.) et donner les caractéristiques de la résonance (fréquence de résonance, pulsations de coupure ou bande passante).</b></p>
Exemples de réponse en régime sinusoïdal forcé d'un dispositif mécanique du type amortisseur, sismomètre ou accéléromètre.	<p>Analyser, à partir de résultats expérimentaux ou simulés, la réponse en régime sinusoïdal forcé du dispositif mécanique en fonction de la fréquence d'excitation.</p> <p>Discuter des choix des paramètres du dispositif en fonction du cahier des charges.</p>

## M.5 Phénomènes de tension superficielle

L'introduction aux phénomènes de capillarité s'appuie sur une approche énergétique. La loi de Young est admise et son expression est systématiquement fournie aux étudiants. L'expression de la loi de Laplace, donnant la différence de pression en fonction du coefficient de tension superficielle de part et d'autre d'une interface courbe, n'est exigible que dans le cas d'une interface sphérique. Sa démonstration est, dans tous les cas, hors programme. La loi de Jurin donne l'occasion de réinvestir les connaissances acquises en première année en statique des fluides. Une approche énergétique complémentaire permet de souligner les phénomènes physiques sous-jacents, responsables de l'ascension ou de la descente capillaire. Aucune connaissance relative à la force de tension superficielle, pas plus qu'à son expression en fonction du coefficient de tension superficielle, n'est exigible des étudiants.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Coefficient de tension superficielle. Énergie de surface.	<p>Identifier l'origine physique de la tension superficielle dans le cas de l'interface liquide-vapeur et en déduire un ordre de grandeur de la valeur du coefficient de tension superficielle.</p> <p>Exprimer l'énergie de surface associée à une interface entre deux phases fluides non miscibles, ou entre une phase fluide et une phase solide en fonction du coefficient de tension superficielle correspondant.</p> <p>Interpréter qualitativement le rôle d'un tensioactif.</p>

Mouillabilité. Angle de contact, loi de Young. Loi de Laplace exprimant la différence de pression en fonction du coefficient de tension superficielle et du rayon d'une interface sphérique. Loi de Jurin de l'ascension capillaire.	Interpréter qualitativement la mouillabilité d'une surface solide en termes d'énergies de surface. Interpréter le phénomène d'ascension ou de descente capillaire en termes d'énergies de surface et d'énergie potentielle de pesanteur.
	<b>Mesurer un coefficient de tension superficielle, le protocole expérimental étant interprété, le cas échéant, à partir d'un bilan énergétique.</b>

## M.6 Fluides en écoulement

Cette partie introduit d'abord la description cinématique d'un fluide en écoulement et les actions mécaniques au sein d'un fluide réel en écoulement. Si le cas du fluide newtonien est privilégié, aucune loi de comportement rhéologique ne peut être exigée des étudiants.

La dynamique des fluides concerne tout d'abord l'écoulement parfait et stationnaire d'un fluide. La relation de Bernoulli est admise, tout comme son interprétation énergétique. Sont ensuite étudiés les écoulements unidirectionnels, stationnaires, laminaires et parallèles de cisaillement de fluides réels, pour lesquels le profil de vitesse est établi au moyen d'un bilan de quantité de mouvement, dont l'utilisation se limite exclusivement à cette étude. Il convient aussi de souligner les limites du modèle d'écoulement parfait. L'utilisation d'opérateurs d'analyse vectorielle et la mobilisation d'équations aux dérivées partielles sont absolument proscrites. L'étude de l'écoulement d'un fluide réel à travers un milieu poreux conclut cette partie et permet d'introduire la loi de Darcy, exprimée avec la pression motrice.

De façon générale, l'étude des fluides en écoulement doit s'appuyer sur des situations concrètes et motivantes, et peut être illustrée par des exemples tirés des sciences de la vie et de la Terre.

### M.6.1 Description d'un fluide en écoulement

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Description d'un fluide en écoulement</b> Particule de fluide. Champ eulérien des vitesses. Ligne de courant, tube de courant. Écoulement stationnaire.	Décrire, en utilisant le vocabulaire adapté, l'écoulement d'un fluide. Interpréter un document (photographie ou vidéo d'un écoulement, schéma) et identifier quelques caractéristiques de l'écoulement (stationnarité, lignes de courant, profil de vitesse).
Débit de masse, débit de volume.	Calculer un débit de masse ou de volume.
Bilans de masse. Conservation du débit de masse pour un écoulement stationnaire.	Établir et exploiter un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert ou fermé adapté.
<b>Actions mécaniques dans un fluide en écoulement</b> Force de viscosité de cisaillement pour un fluide newtonien en écoulement unidirectionnel de cisaillement du type $\vec{v} = v_x(y)\vec{e}_x$ (écoulement unidirectionnel, laminaire et parallèle de cisaillement). Viscosité dynamique.	Exploiter l'expression fournie $d\vec{F} = \eta \frac{dv_x(y)}{dy} dS \vec{e}_x$ . Citer l'ordre de grandeur des valeurs de la viscosité dynamique de l'eau et de l'air.
Traînée d'une sphère en mouvement rectiligne uniforme dans un fluide newtonien : nombre de Reynolds $Re$ ; coefficient de traînée $C_x$ ; graphe de $C_x$ en fonction du nombre de Reynolds; notion d'écoulement laminaire et d'écoulement turbulent.	Évaluer un nombre de Reynolds pour choisir un modèle de traînée linéaire ou un modèle de traînée quadratique en vitesse. <b>Capacité numérique</b> : résoudre, à l'aide d'un langage de programmation, l'équation différentielle vérifiée par la vitesse, en utilisant une modélisation fournie du coefficient de traînée $C_x$ en fonction du nombre de Reynolds, dans le cas de la chute d'une bille sphérique dans un fluide newtonien.

## M.6.2 Dynamique des fluides

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Écoulement parfait et stationnaire d'un fluide</b></p> <p>Relation de Bernoulli sous la forme <math>\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 \pm gz = \text{cste.}</math></p>	<p>Exploiter la relation de Bernoulli, en procédant, le cas échéant, à la simplification de termes négligeables.</p>
<p>Effet Venturi. Application à la mesure d'un débit de volume.</p> <p>Tube de Pitot. Application à la mesure d'une vitesse d'écoulement.</p>	<p>Décrire le principe de l'effet Venturi.</p> <p>Établir la relation donnant le débit de volume dans un tube de Venturi.</p> <p>Décrire le principe du tube de Pitot.</p> <p>Établir la relation donnant la vitesse d'écoulement du fluide.</p>
<p><b>Modèles d'écoulements unidirectionnels de cisaillement, laminaires, parallèles et stationnaires de fluides réels</b></p> <p>Bilan de quantité de mouvement pour un fluide réel en écoulement unidirectionnel de cisaillement, laminaire, parallèle et stationnaire, dans un tube de courant à une seule entrée et une seule sortie.</p>	<p>Associer un système fermé à un système ouvert pour établir le bilan de quantité de mouvement.</p> <p>Établir et exploiter le bilan de quantité de mouvement.</p>
<p>Écoulement de Couette plan.</p>	<p>Établir l'expression du profil de vitesse pour l'écoulement de Couette plan d'un fluide newtonien à partir d'un bilan de quantité de mouvement.</p> <p>Calculer un ordre de grandeur de la valeur du nombre de Reynolds de l'écoulement et l'interpréter compte tenu d'une valeur fournie du nombre de Reynolds critique.</p>
<p>Écoulement de Poiseuille.</p> <p>Loi de Poiseuille.</p> <p>Résistance hydraulique. Associations en série et en parallèle de deux résistances hydrauliques.</p>	<p>Établir l'expression du profil de vitesse pour l'écoulement de Poiseuille d'un fluide newtonien dans une conduite cylindrique à partir d'un bilan de quantité de mouvement.</p> <p>Calculer un ordre de grandeur de la valeur du nombre de Reynolds de l'écoulement et l'interpréter compte tenu d'une valeur fournie du nombre de Reynolds critique.</p> <p>Établir l'expression de la loi de Poiseuille donnant le débit de volume en fonction de la différence de pression entre l'entrée et la sortie d'une conduite cylindrique.</p> <p>Modéliser une association série ou parallèle de résistances hydrauliques par une résistance hydraulique équivalente.</p>
<p><b>Écoulement d'un fluide réel à travers un milieu poreux</b></p> <p>Porosité. Perméabilité.</p> <p>Loi de Darcy. Pression motrice.</p>	<p>Définir la porosité d'un milieu.</p> <p>Établir le lien entre porosité et perméabilité d'un milieu pour le modèle simplifié de tubes capillaires parallèles.</p> <p>Exploiter la loi de Darcy énoncée avec la pression motrice.</p> <p><b>Mesurer la porosité ou la perméabilité d'un milieu poreux.</b></p>

## Thème S – ondes et signaux

## S.4 Filtrage linéaire d'un signal

Dans cette partie, le principe du filtrage d'un signal périodique est introduit en utilisant un système linéaire modélisé par un filtre passif du premier ordre, pour lequel une étude théorique, mobilisant le formalisme complexe, est conduite à partir d'une équation différentielle, sans utiliser la notion d'impédance complexe, hors programme. La mise en œuvre expérimentale de systèmes d'ordres supérieurs, dont la courbe de réponse ou la fonction de transfert est fournie, permet de prolonger et de compléter cette étude, l'objectif étant de développer la capacité des étudiants à déterminer la nature qualitative du filtre linéaire adapté à une opération de filtrage donnée. La notion de gain en décibel est hors programme.



Notions et contenus	Capacités exigibles
Spectre d'un signal périodique.	Analyser la décomposition d'un signal périodique fournie sous la forme d'une somme de fonctions sinusoïdales. Identifier la valeur moyenne du signal dans le spectre d'un signal périodique.
Modèle de filtre passif d'ordre 1 : réponse du circuit RC à une excitation sinusoïdale.	Utiliser la notation complexe pour étudier le régime forcé.
Fonction de transfert harmonique, courbes de réponse en gain (module de la fonction de transfert) et en phase, fréquence de coupure, bande passante.	Tracer une courbe de réponse en gain ou en phase associée à une fonction de transfert harmonique du premier ordre. Exploiter une courbe de réponse en gain ou en phase associée à une fonction de transfert harmonique d'ordre quelconque. <b>Étudier le filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal à partir d'une analyse spectrale, la fonction de transfert du filtre étant fournie, ou sa courbe de réponse (en gain et/ou en phase) étant fournie ou déterminée expérimentalement.</b>

## S.5 Interaction lumière-matière

L'interaction lumière-matière, illustrée en première année à travers les techniques de spectroscopies moléculaires UV-visible et infrarouge, est désormais enrichie grâce au modèle quantique de l'oscillateur harmonique vu dans le thème « **mouvements et interactions** ». L'existence de niveaux d'énergie vibrationnels discrets permet de rendre compte du phénomène de fluorescence, très souvent mis en œuvre en imagerie cellulaire. Aucun développement n'est attendu sur les états de spin moléculaire, le diagramme énergétique de Perrin-Jablonski ou le fonctionnement d'un spectrofluorimètre. Le professeur veille à illustrer cette partie en faisant appel à quelques applications pertinentes de son choix ou figurant dans la liste indicative suivante : révélation UV en chromatographie sur couche mince, détection de contrefaçon, imagerie cellulaire, protéines fluorescentes, analyses biologiques, spectrofluorométrie, etc.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Absorption et émission de photons, transition entre niveaux d'énergie électroniques et vibrationnels.	Associer un domaine spectral de rayonnement électromagnétique à la nature d'une transition entre niveaux d'énergie électroniques ou vibrationnels.
Existence de différentes voies de désexcitation radiatives et non radiatives, durée de vie de l'état excité.	Interpréter la différence d'énergie entre photons absorbés et photons émis.
Espèce chimique fluorophore, fluorescence, déplacement de Stokes, coefficient d'absorption molaire et rendement quantique de fluorescence.	Identifier, par comparaison, un spectre d'absorption et un spectre d'émission d'une espèce chimique fluorophore. Déterminer la valeur de la constante de vie radiative à partir de données expérimentales d'intensité de fluorescence en fonction du temps.

## Thème T – phénomènes de transport

### T.2 Conduction thermique

Cette partie est consacrée à la présentation de la conduction thermique et vient compléter l'introduction aux transferts thermiques réalisée en première année. Fondée sur une approche analogue à celle qui prévaut en première année pour l'étude du transport de matière diffusif, l'étude de la conduction thermique se fait sans formalisme vectoriel : le vecteur densité de courant d'énergie est explicitement hors programme. La loi phénoménologique de Fourier est énoncée sous forme intégrale : l'expression du flux thermique est donnée en fonction de la dérivée de la température par rapport à une seule coordonnée spatiale et d'une surface adaptée à la géométrie considérée. Les étudiants disposent ainsi des outils nécessaires à l'établissement des expressions des résistances thermiques, admises en première année. Le professeur souligne le rôle fondamental de l'agitation thermique dans le processus de conduction thermique. Afin d'éviter toute dérive calculatoire, toute situation où le champ de température dépend du temps est exclue, à l'exception du régime quasi-stationnaire. Les régimes variables dans le temps sont seulement approchés de façon qualitative grâce à la loi d'échelle, introduite à par-

tir d'une analyse dimensionnelle, donnant le temps caractéristique de conduction thermique en fonction de l'extension spatiale et du coefficient de diffusivité thermique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Modèle phénoménologique de la conduction thermique</b> Loi phénoménologique de Fourier donnant le flux thermique en fonction de la dérivée de la température par rapport à une seule coordonnée spatiale, à travers une surface plane, cylindrique ou sphérique, adaptée à la géométrie considérée. Conductivité thermique.</p>	<p>Discuter des dépendances du flux thermique à travers une paroi en fonction de ses paramètres géométriques (épaisseur et surface de la paroi) et physiques (conductivité thermique du milieu).  Citer l'ordre de grandeur de la conductivité thermique de l'air, de l'eau et d'un métal, à température et pression ambiantes.</p>
<p>Coefficient de diffusivité thermique.</p> <p>Loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusivité thermique.</p>	<p>Exploiter la relation fournie exprimant le coefficient de diffusivité thermique en fonction de la conductivité thermique, de la masse volumique et de la capacité thermique massique. Exploiter la loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusivité thermique.</p>
<p>Bilan d'énergie en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.</p>	<p>Établir un bilan d'énergie, éventuellement en présence de sources internes. Exploiter la conservation du flux thermique en régime stationnaire et en l'absence de sources internes.</p>

<p>- <b>Risque chimique</b> Règles de sécurité au laboratoire. Classes et catégories de danger. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Mentions de danger (H) et conseils de prudence (P). Fiches de sécurité.</p>	<p>Relever les indications sur le risque associé au prélèvement, au mélange et au stockage des produits chimiques et adopter une attitude responsable lors de leur utilisation.</p>
<p>- <b>Risque électrique</b></p>	<p>Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.</p>
<p>- <b>Risque optique</b></p>	<p>Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.</p>
<p>- <b>Risques liés à la pression et à la température</b></p>	<p>Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.</p>
<p><b>4. Prévention de l'impact environnemental</b> Traitement et rejet des espèces chimiques.</p>	<p>Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.</p>

## Contenus thématiques

L'organisation des semestres est la suivante.

### Premier semestre

#### Thème 1 : ondes et signaux (1)

- 1.1. Formation des images
- 1.2. Signaux électriques dans l'ARQS
- 1.3. Circuit linéaire du premier ordre
- 1.4. Oscillateurs libres et forcés
- 1.5. Filtrage linéaire
- 1.6. Propagation d'un signal

#### Thème 2 : mouvements et interactions (1)

- 2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point
- 2.2. Lois de Newton
- 2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel
- 2.4. Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires

#### Thème 4 : constitution et transformations de la matière (1)

- 4.1. Transformations de la matière
  - 4.1.1. Description d'un système et de son évolution vers un état final
  - 4.1.2. Évolution temporelle d'un système chimique
- 4.2. Relations entre la structure des entités chimiques et les propriétés physiques macroscopiques
  - 4.2.1. Structure des entités chimiques
  - 4.2.2. Relations structure des entités - propriétés physiques macroscopiques

**Deuxième semestre****Thème 2 : mouvements et interactions (2)**

- 2.5. Moment cinétique
- 2.6. Mouvements dans un champ de force centrale conservatif
- 2.7. Mouvement d'un solide

**Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts**

- 3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre
- 3.2. Énergie échangée par un système au cours d'une transformation
- 3.3. Premier principe. Bilans d'énergie
- 3.4. Deuxième principe. Bilans d'entropie
- 3.5. Machines thermiques

**Thème 1 : ondes et signaux (2)**

- 1.7. Induction et forces de Laplace
  - 1.7.1. Champ magnétique
  - 1.7.2. Actions d'un champ magnétique
  - 1.7.3. Lois de l'induction
  - 1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps
  - 1.7.5. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire
- 1.8. Introduction à la physique quantique

**Thème 4 : constitution et transformations de la matière (2)**

- 4.3. Structure et propriétés physiques des solides
- 4.4. Transformations chimiques en solution aqueuse
  - 4.4.1. Réactions acide-base et de précipitation
  - 4.4.2. Réactions d'oxydo-réduction

**A. Premier semestre****Thème 1 : ondes et signaux (1)**

La partie 1.1. « **Formation des images** » traite de la formation des images et propose une ouverture sur la notion de guidage de la lumière par une fibre optique. Cette partie est l'occasion d'interroger le concept de modèle en physique et d'en identifier les limites de validité. Elle permet également d'aborder de nombreuses applications technologiques ; certaines sont précisées par le programme, d'autres sont laissées à l'appréciation des enseignants (lunette, microscope, optique d'un smartphone, etc.). L'approche expérimentale doit être privilégiée dans ce domaine de la physique qui s'y prête particulièrement bien.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Formation des images</b>	
<b>Sources lumineuses</b> Modèle de la source ponctuelle monochromatique. Spectre.	Caractériser une source lumineuse par son spectre. Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
<b>Modèle de l'optique géométrique</b> Modèle de l'optique géométrique. Notion de rayon lumineux. Indice d'un milieu transparent.	Définir le modèle de l'optique géométrique. Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.

Réflexion, réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Établir la condition de réflexion totale.
<b>Conditions de l'approximation de Gauss et applications</b> Stigmatisme. Miroir plan.	Construire l'image d'un objet par un miroir plan.
Conditions de l'approximation de Gauss.	Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences. Relier le stigmatisme approché aux caractéristiques d'un détecteur.
Lentilles minces dans l'approximation de Gauss.	Définir les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence. Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux, identifier sa nature réelle ou virtuelle. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et de Newton. Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.
<b>Modèles de quelques dispositifs optiques</b> L'œil. Punctum proximum, punctum remotum.	Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur plan fixe. Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.
L'appareil photographique.	Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur. Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné.  <b>Étudier l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image.</b>
La fibre optique à saut d'indice.	Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.

La partie 1.2. « **Signaux électriques dans l'ARQS** » pose les bases nécessaires à l'étude des circuits dans l'Approximation des Régimes Quasi Stationnaires (ARQS). Si le programme se concentre sur l'étude des dipôles R, L et C, il est possible, lors des travaux pratiques, de faire appel à des composants intégrés ou non linéaires (filtres à capacité commutée, échantillonneur-bloqueur, diodes, photorésistances, etc.) dès lors qu'aucune connaissance préalable n'est nécessaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Signaux électriques dans l'ARQS</b>	

Charge électrique, intensité du courant. Potentiel, référence de potentiel, tension. Puissance.	Justifier que l'utilisation de grandeurs électriques continues est compatible avec la quantification de la charge électrique. Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charge. Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence. Relier la loi des nœuds au postulat de la conservation de la charge. Utiliser la loi des mailles. Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur. Citer les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d'application.
Dipôles : résistances, condensateurs, bobines, sources décrites par un modèle linéaire.	Utiliser les relations entre l'intensité et la tension. Citer des ordres de grandeurs des composants R, L, C. Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance. Exprimer l'énergie stockée dans un condensateur ou une bobine. Modéliser une source en utilisant la représentation de Thévenin.
Association de deux résistances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente. Établir et exploiter les relations des diviseurs de tension ou de courant.
Résistance de sortie, résistance d'entrée.	<b>Évaluer une résistance d'entrée ou de sortie à l'aide d'une notice ou d'un appareil afin d'appréhender les conséquences de leurs valeurs sur le fonctionnement d'un circuit.</b>  <b>Étudier l'influence des résistances d'entrée ou de sortie sur le signal délivré par un GBF, sur la mesure effectuée par un oscilloscope ou un multimètre.</b>

Les deux parties 1.3. « **Circuit linéaire du premier ordre** » et 1.4. « **Oscillateurs libres et forcés** » abordent l'étude des circuits linéaires du premier et du second ordre en régime libre puis forcé. Il s'agit avant tout de comprendre les principes des méthodes mises en œuvre et leur exploitation pour étudier le comportement d'un signal traversant un système linéaire. Le choix a été fait de présenter simultanément les oscillateurs électriques et mécaniques de manière à mettre l'accent sur les analogies formelles et comportementales.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3. Circuit linéaire du premier ordre</b>	
Régime libre, réponse à un échelon de tension.	Distinguer, sur un relevé expérimental, régime transitoire et régime permanent au cours de l'évolution d'un système du premier ordre soumis à un échelon de tension.

	<p>Interpréter et utiliser la continuité de la tension aux bornes d'un condensateur ou de l'intensité du courant traversant une bobine.</p> <p>Établir l'équation différentielle du premier ordre vérifiée par une grandeur électrique dans un circuit comportant une ou deux mailles.</p> <p>Déterminer la réponse temporelle dans le cas d'un régime libre ou d'un échelon de tension.</p> <p>Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire.</p> <p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un circuit linéaire du premier ordre et analyser ses caractéristiques. Confronter les résultats expérimentaux aux expressions théoriques.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : mettre en œuvre la méthode d'Euler à l'aide d'un langage de programmation pour simuler la réponse d'un système linéaire du premier ordre à une excitation de forme quelconque.</p>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Oscillateurs libres et forces</b>	
Oscillateur harmonique. Exemples du circuit LC et de l'oscillateur mécanique.	<p>Établir et reconnaître l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique ; la résoudre compte tenu des conditions initiales.</p> <p>Caractériser l'évolution en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation.</p> <p>Réaliser un bilan énergétique.</p>
Circuit RLC série et oscillateur mécanique amorti par frottement visqueux.	<p>Analyser, sur des relevés expérimentaux, l'évolution de la forme des régimes transitoires en fonction des paramètres caractéristiques.</p> <p>Prévoir l'évolution du système à partir de considérations énergétiques.</p> <p>Écrire sous forme canonique l'équation différentielle afin d'identifier la pulsation propre et le facteur de qualité.</p> <p>Décrire la nature de la réponse en fonction de la valeur du facteur de qualité.</p> <p>Déterminer la réponse détaillée dans le cas d'un régime libre ou d'un système soumis à un échelon en recherchant les racines du polynôme caractéristique.</p> <p>Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire selon la valeur du facteur de qualité.</p>

	<p><b>Mettre en évidence la similitude des comportements des oscillateurs mécanique et électronique.</b></p> <p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un système linéaire du deuxième ordre et analyser ses caractéristiques.</b></p>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique.
Impédances complexes.	Établir et connaître l'impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine.
Association de deux impédances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux impédances par une impédance équivalente.
Oscillateur électrique ou mécanique soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance.	<p>Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé.</p> <p>Relier l'acuité d'une résonance au facteur de qualité. Déterminer la pulsation propre et le facteur de qualité à partir de graphes expérimentaux d'amplitude et de phase.</p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental visant à caractériser un phénomène de résonance.</b></p>

L'objectif principal de la partie **1.5. « Filtrage linéaire »** n'est pas de former les étudiants aux aspects techniques des calculs des fonctions de transfert et des tracés de diagrammes de Bode mais de mettre l'accent sur l'interprétation des propriétés du signal de sortie connaissant celles du signal d'entrée et d'appréhender le rôle central de la linéarité des systèmes utilisés.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.5. Filtrage linéaire</b>	
Signaux périodiques.	<p>Analyser la décomposition fournie d'un signal périodique en une somme de fonctions sinusoïdales. Définir la valeur moyenne et la valeur efficace d'un signal.</p> <p>Établir par le calcul la valeur efficace d'un signal sinusoïdal.</p> <p>Interpréter le fait que le carré de la valeur efficace d'un signal périodique est égal à la somme des carrés des valeurs efficaces de ses harmoniques.</p>



<p>Fonction de transfert harmonique. Diagramme de Bode.</p>	<p>Tracer le diagramme de Bode (amplitude et phase) associé à une fonction de transfert d'ordre 1. Utiliser une fonction de transfert donnée d'ordre 1 ou 2 (ou ses représentations graphiques) pour étudier la réponse d'un système linéaire à une excitation sinusoïdale, à une somme finie d'excitations sinusoïdales, à un signal périodique. Utiliser les échelles logarithmiques et interpréter les zones rectilignes des diagrammes de Bode en amplitude d'après l'expression de la fonction de transfert.</p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'utilité des fonctions de transfert pour un système linéaire à un ou plusieurs étages.</b></p>
<p>Modèles de filtres passifs : passe-bas et passe-haut d'ordre 1, passe-bas et passe-bande d'ordre 2.</p>	<p>Choisir un modèle de filtre en fonction d'un cahier des charges. Expliciter les conditions d'utilisation d'un filtre en tant que moyennneur, intégrateur, ou dérivateur. Expliquer l'intérêt, pour garantir leur fonctionnement lors de mises en cascade, de réaliser des filtres de tension de faible impédance de sortie et forte impédance d'entrée. Expliquer la nature du filtrage introduit par un dispositif mécanique (sismomètre, amortisseur, accéléromètre, etc.).</p> <p><b>Étudier le filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal à partir d'une analyse spectrale.</b></p> <p><b>Détecter le caractère non linéaire d'un système par l'apparition de nouvelles fréquences.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : simuler, à l'aide d'un langage de programmation, l'action d'un filtre sur un signal périodique dont le spectre est fourni. Mettre en évidence l'influence des caractéristiques du filtre sur l'opération de filtrage.</p>

Dans la partie **1.6.** consacrée à la « **Propagation d'un signal** », il est recommandé de s'appuyer sur une approche expérimentale ou sur des logiciels de simulation pour permettre aux étudiants de faire le lien entre l'observation de signaux qui se propagent et la traduction mathématique de cette propagation, sans qu'aucune référence ne soit faite à une équation d'onde. L'étude de la somme de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence et du phénomène d'interférences associé permet de mettre en évidence le rôle essentiel joué par le déphasage entre les deux signaux dans le signal résultant. L'étude des interférences lumineuses est l'occasion d'introduire la notion de différence de chemin optique et de la relier au déphasage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.6. Propagation d'un signal</b>	
Exemples de signaux. Signal sinusoïdal.	Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.
<b>Propagation d'un signal dans un milieu illimité, non dispersif et transparent</b> Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle non dispersive. Célérité, retard temporel.	Écrire les signaux sous la forme $f(x-ct)$ ou $g(x+ct)$ . Écrire les signaux sous la forme $f(t-x/c)$ ou $g(t+x/c)$ . Prévoir, dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle à position fixée et l'évolution spatiale à différents instants.
Modèle de l'onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle. Vitesse de phase, déphasage, double périodicité spatiale et temporelle.	Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique, mécanique et électromagnétique. Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de phase. Relier le déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation.  <b>Mesurer la vitesse de phase, la longueur d'onde et le déphasage dû à la propagation d'un phénomène ondulatoire.</b>
Milieux dispersifs ou non dispersifs.	Définir un milieu dispersif. Citer des exemples de situations de propagation dispersive et non dispersive.
<b>Phénomène d'interférences</b> Interférences entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence.	Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives. Déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage.
Interférences entre deux ondes lumineuses de même fréquence. Exemple du dispositif des trous d'Young éclairé par une source monochromatique. Différence de chemin optique. Conditions d'interférences constructives ou destructives. Formule de Fresnel.	Relier le déphasage entre les deux ondes à la différence de chemin optique. Établir l'expression littérale de la différence de chemin optique entre les deux ondes. Exploiter la formule de Fresnel fournie pour décrire la répartition d'intensité lumineuse.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser et caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes.</b>

## Thème 2 : mouvements et interactions (1)

La partie 2.1. « **Description et paramétrage du mouvement d'un point** » vise notamment à mettre en place les principaux systèmes de coordonnées : cartésiennes, polaires, cylindriques et sphériques. Le but est de permettre aux étudiants de disposer d'outils efficaces pour décrire une grande variété de mouvements de points. Pour atteindre cet objectif, il convient de les familiariser progressivement avec les projections et dérivations de vecteurs ainsi qu'avec l'algébrisation des grandeurs dans un contexte

relevant de la physique. Enfin, cette partie est l'occasion de procéder à des analyses qualitatives des comportements cinématiques de systèmes réels assimilés à un point, notamment sur les exemples simples des mouvements rectilignes et circulaires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point</b>	
<b>Repérage dans l'espace et dans le temps</b> Espace et temps classiques. Notion de référentiel. Caractère relatif du mouvement. Caractère absolu des distances et des intervalles de temps.	Citer une situation où la description classique de l'espace ou du temps est prise en défaut.
<b>Cinématique du point</b> Description du mouvement d'un point. Vecteurs position, vitesse et accélération. Systèmes de coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques.	Exprimer à partir d'un schéma le déplacement élémentaire dans les différents systèmes de coordonnées, construire le trièdre local associé et en déduire géométriquement les composantes du vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes et cylindriques. Établir les expressions des composantes des vecteurs position, déplacement élémentaire, vitesse et accélération dans les seuls cas des coordonnées cartésiennes et cylindriques.
	Identifier les degrés de liberté d'un mouvement. Choisir un système de coordonnées adapté au problème.
Mouvement à vecteur accélération constant.	Exprimer le vecteur vitesse et le vecteur position en fonction du temps. Établir l'expression de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.
Mouvement circulaire uniforme et non uniforme.	Exprimer les composantes du vecteur position, du vecteur vitesse et du vecteur accélération en coordonnées polaires planes.
Repérage d'un point dont la trajectoire est connue. Vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour une trajectoire plane.	Situer qualitativement la direction du vecteur vitesse et du vecteur accélération pour une trajectoire plane. Exploiter les liens entre les composantes du vecteur accélération, la courbure de la trajectoire, la norme du vecteur vitesse et sa variation temporelle.  <b>Réaliser et exploiter quantitativement un enregistrement vidéo d'un mouvement : évolution temporelle des vecteurs vitesse et accélération.</b>

Dans la partie **2.2.** intitulée « **Lois de Newton** », on cherche d'abord à renforcer les compétences des étudiants relatives à la mise en équations d'un problème, qu'il s'agisse des étapes de bilans de forces ou de projection de la deuxième loi de Newton sur la base choisie. On cherche par ailleurs, sur l'exemple de quelques mouvements simples, à renforcer les compétences d'analyse qualitative d'une équation différentielle : stabilité des solutions, positions d'équilibre, type d'évolution, durée ou période typique d'évolution, etc. Cette pratique s'articule avec l'utilisation d'un langage de programmation pour résoudre des équations différentielles. Enfin, il s'agit aussi de confronter les étudiants aux limites de validité de certains modèles de forces, et ainsi de donner toute leur importance aux étapes de modélisation et de validation d'un modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Lois de Newton</b>	
<b>Quantité de mouvement</b> Masse d'un système. Conservation de la masse pour système fermé.	Exploiter la conservation de la masse pour un système fermé.
Quantité de mouvement d'un point et d'un système de points. Lien avec la vitesse du centre de masse d'un système fermé.	Établir l'expression de la quantité de mouvement pour un système de deux points sous la forme : $\mathbf{p} = m\mathbf{v}(G)$ .
Première loi de Newton : principe d'inertie. Référentiels galiléens.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens.
Notion de force. Troisième loi de Newton.	Établir un bilan des forces sur un système ou sur plusieurs systèmes en interaction et en rendre compte sur un schéma.
Deuxième loi de Newton.	Déterminer les équations du mouvement d'un point matériel ou du centre de masse d'un système fermé dans un référentiel galiléen.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier une loi de force par exemple à l'aide d'un microcontrôleur.</b>
Force de gravitation. Modèle du champ de pesanteur uniforme au voisinage de la surface d'une planète. Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme.	Étudier le mouvement d'un système modélisé par un point matériel dans un champ de pesanteur uniforme en l'absence de frottement.
Modèles d'une force de frottement fluide. Influence de la résistance de l'air sur un mouvement de chute.	Exploiter, sans la résoudre analytiquement, une équation différentielle : analyse en ordres de grandeur, détermination de la vitesse limite, utilisation des résultats obtenus par simulation numérique. Écrire une équation adimensionnée.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides.</b>
Tension d'un fil. Pendule simple.	Établir l'équation du mouvement du pendule simple. Justifier l'analogie avec l'oscillateur harmonique dans le cadre de l'approximation linéaire.

La partie 2.3. « **Approche énergétique du mouvement d'un point matériel** » vise à construire une démarche alternative et complémentaire pour l'étude d'une situation relevant de la mécanique – et plus généralement de la physique – fondée sur la conservation de certaines grandeurs – ici, l'énergie mécanique. Cette approche est l'occasion d'illustrer la capacité prédictive des analyses graphiques et numériques, par exemple pour pouvoir décrire un comportement à partir d'une représentation graphique de l'énergie potentielle dans le cas d'un mouvement conservatif.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel</b>	
<b>Puissance, travail et énergie cinétique</b> Puissance et travail d'une force dans un référentiel.	Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force.

Théorèmes de l'énergie cinétique et de la puissance cinétique dans un référentiel galiléen, dans le cas d'un système modélisé par un point matériel.	Utiliser le théorème approprié en fonction du contexte.
<b>Champ de force conservative et énergie potentielle</b> Énergie potentielle. Lien entre un champ de force conservative et l'énergie potentielle. Gradient.	Établir et citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur (champ uniforme), de l'énergie potentielle gravitationnelle (champ créé par un astre ponctuel), de l'énergie potentielle élastique. Déterminer l'expression d'une force à partir de l'énergie potentielle, l'expression du gradient étant fournie. Dédire qualitativement, en un point du graphe d'une fonction énergie potentielle, le sens et l'intensité de la force associée.
<b>Énergie mécanique</b> Énergie mécanique. Théorème de l'énergie mécanique. Mouvement conservatif.	Distinguer force conservative et force non conservative. Reconnaître les cas de conservation de l'énergie mécanique. Utiliser les conditions initiales.
Mouvement conservatif à une dimension.	Identifier sur un graphe d'énergie potentielle une barrière et un puits de potentiel. Dédire d'un graphe d'énergie potentielle le comportement qualitatif : trajectoire bornée ou non, mouvement périodique, positions de vitesse nulle.
Positions d'équilibre. Stabilité.	Dédire d'un graphe d'énergie potentielle l'existence de positions d'équilibre. Analyser qualitativement la nature, stable ou instable, de ces positions.
Petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre stable, approximation locale par un puits de potentiel harmonique.	Établir l'équation différentielle du mouvement au voisinage d'une position d'équilibre.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre numériquement une équation différentielle du deuxième ordre non-linéaire et faire apparaître l'effet des termes non-linéaires.

La partie 2.4. « **Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires** » introduit l'expression de la force de Lorentz ainsi que deux situations de base sur lesquelles les étudiants doivent être autonomes dans la résolution, attestant en cela de l'acquisition d'une certaine aisance à ce stade de leur formation. Des situations physiques variées sont en capacité d'illustrer concrètement cette partie qui ne doit pas se réduire à des développements calculatoires ou des illustrations graphiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.4. Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires</b>	
Force de Lorentz exercée sur une charge ponctuelle ; champs électrique et magnétique.	Évaluer les ordres de grandeur des forces électrique ou magnétique et les comparer à ceux des forces gravitationnelles.
Puissance de la force de Lorentz.	Justifier qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ

	magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme.	Mettre en équation le mouvement et le caractériser comme un mouvement à vecteur accélération constant. Effectuer un bilan énergétique pour déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiel.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétostatique uniforme dans le cas où le vecteur vitesse initial est perpendiculaire au champ magnétostatique.	Déterminer le rayon de la trajectoire et le sens de parcours.

## Thème 4 : constitution et transformations de la matière (1)

### 4.1. Transformations de la matière

L'objectif de cette partie est d'amener les étudiants à mobiliser de manière autonome les notions et modèles pour décrire, au niveau macroscopique, un système physico-chimique et son évolution. Il convient que les problématiques abordées, les illustrations et les applications prennent largement appui sur des transformations chimiques rencontrées dans la vie courante, au laboratoire, en milieu industriel ou dans le monde du vivant.

Les concepts développés dans la partie **4.1.1. « Description d'un système et de son évolution vers un état final »** permettent d'envisager l'optimisation des transformations ou des analyses. L'étude quantitative de l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique, est réalisée à partir d'une modélisation par une seule réaction chimique symbolisée par une équation de réaction à laquelle est associée une constante thermodynamique d'équilibre. Il s'agit de prévoir le sens d'évolution de systèmes homogènes ou hétérogènes et de déterminer leur composition dans l'état final.

Les compétences relatives à cette partie du programme sont ensuite réinvesties au cours de l'année, plus particulièrement au second semestre lors des transformations en solution aqueuse, et en seconde année, notamment dans le cadre de la thermodynamique chimique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1.1. Description d'un système et de son évolution vers un état final</b>	
<b>Système physico-chimique</b> Espèces physico-chimiques.	Recenser les espèces physico-chimiques présentes dans un système.
Corps purs et mélanges : concentration en quantité de matière, fraction molaire, pression partielle. Composition d'un système physico-chimique	Décrire la composition d'un système à l'aide des grandeurs physiques pertinentes.
Variables intensives et extensives.	Identifier le caractère extensif ou intensif d'une variable.
<b>Transformation chimique d'un système</b> Modélisation d'une transformation par une ou plusieurs réactions chimiques.	Écrire l'équation de la réaction (ou des réactions) qui modélise(nt) une transformation chimique donnée.
Équation de réaction ; constante thermodynamique d'équilibre.	<b>Déterminer une constante d'équilibre.</b>

Évolution d'un système lors d'une transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique : avancement, activité, quotient réactionnel, critère d'évolution.	Décrire qualitativement et quantitativement un système chimique dans l'état initial ou dans un état d'avancement quelconque. Exprimer l'activité d'une espèce chimique pure ou dans un mélange dans le cas de solutions aqueuses très diluées ou de mélanges de gaz parfaits avec référence à l'état standard. Exprimer le quotient réactionnel. Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique.
Composition chimique du système dans l'état final : état d'équilibre chimique, transformation totale.	Identifier un état d'équilibre chimique. Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique ou de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.  <u>Capacité numérique</u> : déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, l'état final d'un système, siège d'une transformation, modélisée par une réaction à partir des conditions initiales et valeur de la constante d'équilibre.

La partie **4.1.2. « Évolution temporelle d'un système chimique »** permet de dégager expérimentalement les facteurs cinétiques concentration et température. Cette mise en évidence est prolongée par les premières modélisations macroscopiques d'évolution des concentrations avec des lois de vitesse d'ordre simple et d'influence de la température avec la loi d'Arrhenius. Les déterminations d'ordre global ou apparent mettent en œuvre la méthode différentielle ou intégrale, et peuvent s'effectuer à l'aide de logiciels dédiés ou de programmes élaborés en langage de programmation, pour l'exploitation des mesures expérimentales dans le cadre d'un réacteur fermé parfaitement agité.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1.2. Évolution temporelle d'un système chimique</b>	
<b>Cinétique en réacteur fermé de composition uniforme</b> Vitesses de consommation d'un réactif et de formation d'un produit. Vitesse de réaction pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique supposée sans accumulation d'intermédiaires.	Relier la vitesse de réaction, dans les cas où elle est définie, à la vitesse de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit.

<p>Lois de vitesse : réactions sans ordre, réactions avec ordre simple (0, 1, 2), ordre global, ordre apparent. Temps de demi-vie d'un réactif, temps de demi-réaction.</p>	<p>Exprimer la loi de vitesse si la réaction chimique admet un ordre et déterminer la valeur de la constante cinétique à une température donnée. Déterminer la vitesse de réaction à différentes dates en utilisant une méthode numérique ou graphique. Déterminer un ordre de réaction à l'aide de la méthode différentielle ou à l'aide des temps de demi-réaction. Confirmer la valeur d'un ordre par la méthode intégrale, en se limitant strictement à une décomposition d'ordre 0, 1 ou 2 d'un unique réactif, ou se ramenant à un tel cas par dégénérescence de l'ordre ou conditions initiales stœchiométriques.</p> <p><b>Établir une loi de vitesse à partir du suivi temporel d'une grandeur physique.</b></p>
<p>Loi d'Arrhenius ; énergie d'activation.</p>	<p>Déterminer la valeur de l'énergie d'activation d'une réaction chimique à partir de valeurs de la constante cinétique à différentes températures.</p> <p><b>Déterminer l'énergie d'activation d'une réaction chimique.</b></p>

#### 4.2. Relations entre la structure des entités chimiques et les propriétés physiques macroscopiques

Décrivant la matière au niveau macroscopique par des espèces chimiques aux propriétés physiques et chimiques caractéristiques, le chimiste la modélise au niveau microscopique par des entités chimiques dont les structures électroniques et géométriques permettent d'interpréter et de prévoir ces propriétés.

La partie 4.2.1 « **Structure des entités chimiques** » aborde l'étude de la constitution de la matière au niveau microscopique en s'appuyant sur le tableau périodique des éléments, outil essentiel du chimiste, dans l'objectif de développer progressivement les compétences relatives à l'utilisation des informations qu'il contient pour prévoir, dans cette partie, le nombre de liaisons d'un atome et la nature (polaire, ionique) des liaisons chimiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2.1 Structure des entités chimiques</b>	
<p><b>Modèle de la liaison covalente</b> Liaison covalente localisée. Schéma de Lewis d'une molécule ou d'un ion monoatomique ou d'un ion polyatomique pour les éléments des blocs s et p.</p>	<p>Citer les ordres de grandeur de longueurs et d'énergies de liaisons covalentes. Déterminer, pour les éléments des blocs s et p, le nombre d'électrons de valence d'un atome à partir de la position de l'élément dans le tableau périodique. Établir un schéma de Lewis pertinent pour une molécule ou un ion. Identifier les écarts à la règle de l'octet.</p>
<p><b>Géométrie et polarité des entités chimiques</b> Électronégativité : liaison polarisée, moment dipolaire, molécule polaire.</p>	<p>Associer qualitativement la géométrie d'une entité à une minimisation de son énergie. Comparer les électronégativités de deux atomes à partir de données ou de leurs positions dans le tableau périodique.</p>



	Prévoir la polarisation d'une liaison à partir des électronégativités comparées des deux atomes mis en jeu. Relier l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent à la structure géométrique donnée d'une molécule. Déterminer direction et sens du vecteur moment dipolaire d'une liaison ou d'une molécule de géométrie donnée.
--	---

La partie 4.2.2. « Relations structure des entités - propriétés physiques macroscopiques » a pour objectif de permettre l'identification des interactions entre entités moléculaires ou ioniques afin d'interpréter, de prévoir ou de comparer certaines propriétés physiques : température de changement d'état, miscibilité, solubilité.

De nombreuses illustrations et applications dans la vie courante, au niveau du laboratoire ou dans le domaine du vivant peuvent être proposées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2.2. Relations structure des entités - propriétés physiques macroscopiques</b>	
<b>Interaction entre entités</b> Interactions de van der Waals. Liaison hydrogène ou interaction par pont hydrogène.	Citer les ordres de grandeur énergétiques des interactions de van der Waals et de liaisons hydrogène. Interpréter l'évolution de températures de changement d'état de corps purs moléculaires à l'aide de l'existence d'interactions de van der Waals ou par pont hydrogène.
<b>Solubilité ; miscibilité.</b> Grandeurs caractéristiques et propriétés de solvants moléculaires : moment dipolaire, permittivité relative, caractère protogène. Mise en solution d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.	Associer une propriété d'un solvant moléculaire à une ou des grandeurs caractéristiques. Interpréter la miscibilité ou la non-miscibilité de deux solvants. Interpréter la solubilité d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.

## B. Second semestre

### Thème 2 : mouvements et interactions (2)

Au second semestre, le thème « **Mouvements et interactions** » est structuré en trois parties : moment cinétique, mouvements dans un champ de force centrale conservatif et mouvement d'un solide.

La partie 2.5. « **Moment cinétique** » est l'occasion d'introduire les notions de moment cinétique et de moment d'une force. L'un des objectifs visés est que les étudiants disposent de représentations concrètes qui permettent de donner du sens aux grandeurs vectorielles et scalaires utilisées ; c'est notamment pour cela que le bras de levier est introduit. L'accent est mis sur l'identification des situations où le moment cinétique est conservé.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.5. Moment cinétique</b>	
Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un point et par rapport à un axe orienté.	Relier la direction et le sens du vecteur moment cinétique aux caractéristiques du mouvement.
Moment cinétique d'un système discret de points par rapport à un axe orienté.	Utiliser le caractère algébrique du moment cinétique scalaire.
Moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté.	Calculer le moment d'une force par rapport à un axe orienté en utilisant le bras de levier.
Théorème du moment cinétique en un point fixe dans un référentiel galiléen. Conservation du moment cinétique.	Identifier les cas de conservation du moment cinétique.

La partie **2.6. « Mouvements dans un champ de force centrale conservatif »** est notamment motivée par ses nombreuses applications possibles. On discute la nature de la trajectoire sur un graphe donnant l'énergie potentielle effective et, dans le cas d'un champ newtonien (lois de Kepler), on ne poursuit l'étude que dans le cas d'une trajectoire circulaire. Le caractère elliptique des trajectoires associées à un état lié est affirmé sans qu'aucune étude géométrique des ellipses ne soit prévue ; on utilise dans ce cas les constantes du mouvement (moment cinétique et énergie mécanique) pour exprimer l'énergie de la trajectoire elliptique en fonction du demi-grand axe.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.6. Mouvements dans un champ de force centrale conservatif</b>	
Point matériel soumis à un champ de force centrale.	Établir la conservation du moment cinétique à partir du théorème du moment cinétique. Établir les conséquences de la conservation du moment cinétique : mouvement plan, loi des aires.
<b>Point matériel soumis à un champ de force centrale conservatif</b> Conservation de l'énergie mécanique. Énergie potentielle effective. État lié et état de diffusion.	Exprimer l'énergie mécanique d'un système conservatif ponctuel à partir de l'équation du mouvement. Exprimer la conservation de l'énergie mécanique et construire une énergie potentielle effective. Décrire qualitativement le mouvement radial à l'aide de l'énergie potentielle effective. Relier le caractère borné du mouvement radial à la valeur de l'énergie mécanique.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, obtenir des trajectoires d'un point matériel soumis à un champ de force centrale conservatif.
<b>Cas particulier du champ newtonien</b> Lois de Kepler.	Énoncer les lois de Kepler pour les planètes et les transposer au cas des satellites terrestres.
Cas particulier du mouvement circulaire : satellite, planète.	Établir que le mouvement est uniforme et déterminer sa période. Établir la troisième loi de Kepler dans le cas particulier de la trajectoire circulaire. Exploiter sans démonstration sa généralisation au cas d'une trajectoire elliptique.

Énergie mécanique dans le cas du mouvement circulaire et dans le cas du mouvement elliptique.	Exprimer l'énergie mécanique pour le mouvement circulaire. Exprimer l'énergie mécanique pour le mouvement elliptique en fonction du demi-grand axe.
<b>Satellites terrestres</b> Satellites géostationnaire, de localisation et de navigation, météorologique.	Différencier les orbites des satellites terrestres en fonction de leurs missions. Déterminer l'altitude d'un satellite géostationnaire et justifier sa localisation dans le plan équatorial.

Concernant le solide en rotation autour d'un axe fixe dans la partie **2.7. « Mouvement d'un solide »**, il s'agit de définir le mouvement en remarquant que tout point du solide décrit un cercle autour de l'axe avec une même vitesse angulaire et de déterminer la vitesse de chaque point en fonction de celle-ci et de la distance à l'axe de rotation.

Des exemples de dynamique du solide sont introduits (translation et rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen), avec toutefois des limitations strictes : l'étude générale d'un mouvement composé d'une translation dans un référentiel galiléen et d'une rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel barycentrique ne figure pas au programme. L'étude du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe gardant une direction fixe dans un référentiel galiléen mais pour lequel l'axe de rotation est en mouvement est exclue.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.7. Mouvement d'un solide</b>	
<b>Description du mouvement d'un solide dans deux cas particuliers</b> Définition d'un solide.	Différencier un solide d'un système déformable.
Translation.	Reconnaître et décrire une translation rectiligne ainsi qu'une translation circulaire.
Rotation autour d'un axe fixe.	Décrire la trajectoire d'un point quelconque du solide et exprimer sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.
<b>Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide mobile autour d'un axe fixe</b> Moment cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe : moment d'inertie.	Exploiter, pour un solide, la relation entre le moment cinétique scalaire, la vitesse angulaire de rotation et le moment d'inertie fourni. Relier qualitativement le moment d'inertie à la répartition des masses.
Couple.	Définir un couple.
Liaison pivot.	Définir une liaison pivot et justifier le moment qu'elle peut produire.
Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.	Exploiter le théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.

Pendule pesant.	Établir l'équation du mouvement. Établir une intégrale première du mouvement.  <b>Réaliser l'étude énergétique d'un pendule pesant et mettre en évidence une diminution de l'énergie mécanique.</b>  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, mettre en évidence le non isochronisme des oscillations.
<b>Approche énergétique du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté, dans un référentiel galiléen</b> Énergie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Utiliser l'expression de l'énergie cinétique, l'expression du moment d'inertie étant fournie.
Théorème de l'énergie cinétique pour un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Établir, dans ce cas, l'équivalence entre le théorème scalaire du moment cinétique et celui de l'énergie cinétique.

### Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts

Après avoir mis l'accent sur le passage fondamental d'une réalité microscopique à des grandeurs mesurables macroscopiques, la partie propose, en s'appuyant sur des exemples concrets, de poursuivre la description et l'étude de la matière à l'échelle macroscopique, et d'aborder les deux principes fondamentaux de la thermodynamique. Les capacités identifiées doivent être introduites en s'appuyant dès que possible sur des dispositifs expérimentaux qui permettent ainsi leur acquisition progressive et authentique.

On utilise les notations suivantes : pour une grandeur extensive « A », « a » sera la grandeur massique associée et « A<sub>m</sub> » la grandeur molaire associée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre</b>	
Échelles microscopique, mésoscopique, et macroscopique. Libre parcours moyen.	Définir l'échelle mésoscopique et en expliquer la nécessité. Citer quelques ordres de grandeur de libres parcours moyens.
État microscopique et état macroscopique.	Préciser les paramètres nécessaires à la description d'un état microscopique et d'un état macroscopique sur un exemple.
Distribution des vitesses moléculaires d'un gaz (homogénéité et isotropie). Vitesse quadratique moyenne. Température cinétique. Exemple du gaz parfait monoatomique : $E_c = 3/2kT$ .	Calculer l'ordre de grandeur d'une vitesse quadratique moyenne dans un gaz parfait.
Système thermodynamique.	Identifier un système ouvert, un système fermé, un système isolé.

État d'équilibre d'un système soumis aux seules forces de pression. Pression, température, volume, équation d'état. Grandeur extensive, grandeur intensive. Exemples du gaz parfait et d'une phase condensée indilatable et incompressible.	Calculer une pression à partir d'une condition d'équilibre mécanique. Déduire une température d'une condition d'équilibre thermique. Citer quelques ordres de grandeur de volumes molaires ou massiques dans les conditions usuelles de pression et de température. Citer et utiliser l'équation d'état des gaz parfaits.
Énergie interne d'un système. Capacité thermique à volume constant dans le cas du gaz parfait.	Exprimer l'énergie interne d'un gaz parfait monoatomique à partir de l'interprétation microscopique de la température.  Exploiter la propriété $U_m=U_m(T)$ pour un gaz parfait.
Énergie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée considérée incompressible et indilatable.	Exploiter la propriété $U_m=U_m(T)$ pour une phase condensée incompressible et indilatable.
Approximation des phases condensées peu compressibles et peu dilatables.	Interpréter graphiquement la différence de compressibilité entre un liquide et un gaz à partir d'isothermes expérimentales.
Du gaz réel au gaz parfait.	Comparer le comportement d'un gaz réel au modèle du gaz parfait sur des réseaux d'isothermes expérimentales en coordonnées de Clapeyron ou d'Amagat.
Corps pur diphasé en équilibre. Diagramme de phases (P,T). Cas de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme de Clapeyron (P,v), titre en vapeur.	Analyser un diagramme de phase expérimental (P,T). Proposer un jeu de variables d'état suffisant pour caractériser l'état d'équilibre d'un corps pur diphasé soumis aux seules forces de pression. Positionner les phases dans les diagrammes (P,T) et (P,v). Déterminer la composition d'un mélange diphasé en un point d'un diagramme (P,v).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Énergie échangée par un système au cours d'une transformation</b>	
Transformation thermodynamique subie par un système. Évolutions isochore, isotherme, isobare, monobare, monotherme.	Définir un système adapté à une problématique donnée. Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final.
Travail des forces de pression. Transformations isochore, monobare.	Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron.
Transferts thermiques. Transformation adiabatique. Thermostat, transformations monotherme et isotherme.	Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement. Identifier dans une situation expérimentale le ou les systèmes modélisables par un thermostat.

Concernant les bilans d'énergie abordés dans la partie **3.3. « Premier principe. Bilans d'énergie »**, les expressions des fonctions d'état  $U_m(T, V_m)$  et  $H_m(T, P)$  sont données si le système ne relève pas du modèle gaz parfait ou du modèle de la phase condensée incompressible et indilatable.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.3. Premier principe. Bilans d'énergie</b>	
Premier principe de la thermodynamique.	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail et transfert thermique. Utiliser le premier principe de la thermodynamique entre deux états voisins. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne. Distinguer le statut de la variation de l'énergie interne du statut des termes d'échange. Calculer le transfert thermique sur un chemin donné connaissant le travail et la variation de l'énergie interne.
Enthalpie d'un système. Capacité thermique à pression constante dans le cas du gaz parfait et d'une phase condensée incompressible et indilatable.	Exprimer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final. Exprimer l'enthalpie $H_m(T)$ du gaz parfait à partir de l'énergie interne. Justifier que l'enthalpie $H_m$ d'une phase condensée peu compressible et peu dilatable peut être considérée comme une fonction de l'unique variable $T$ . Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.
Enthalpie associée à une transition de phase : enthalpie de fusion, enthalpie de vaporisation, enthalpie de sublimation.	Exploiter l'extensivité de l'enthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phases.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie de fusion, etc.).</b>

Concernant la partie **3.4. « Deuxième principe. Bilans d'entropie »**, l'expression de la fonction d'état entropie est systématiquement donnée et sa construction n'est pas une capacité visée. On cite sans aucun développement quantitatif son interprétation en termes de désordre statistique, de façon à faciliter une interprétation intuitive des bilans d'entropie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.4. Deuxième principe. Bilans d'entropie</b>	
Fonction d'état entropie.	Interpréter qualitativement l'entropie en termes de désordre statistique à l'aide de la formule de Boltzmann fournie.
Deuxième principe de la thermodynamique : entropie créée, entropie échangée. $\Delta S = S_{\text{ech}} + S_{\text{créé}}$ avec $S_{\text{ech}} = \sum Q_i / T_i$ .	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan entropique. Relier la création d'entropie à une ou plusieurs causes physiques de l'irréversibilité. Analyser le cas particulier d'un système en évolution adiabatique.

Variation d'entropie d'un système.	Utiliser l'expression fournie de la fonction d'état entropie. Exploiter l'extensivité de l'entropie.
Loi de Laplace.	Citer et utiliser la loi de Laplace et ses conditions d'application.
Cas particulier d'une transition de phase.	Citer et utiliser la relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie associées à une transition de phase : $\Delta h_{12}(T) = T \Delta s_{12}(T)$

Dans la partie **3.5. « Machines thermiques »**, l'enseignement de la thermodynamique est orienté vers des applications industrielles réelles et motivantes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.5. Machines thermiques</b>	
Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.	Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Définir un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Justifier et utiliser le théorème de Carnot. Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération.  <b>Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.</b>

## Thème 1 : Onde et signaux (2)

La partie **1.7. « Induction et forces de Laplace »** s'appuie sur les nombreuses applications présentes dans notre environnement immédiat : boussole, moteur électrique, alternateur, transformateur, haut-parleur, plaques à induction, carte RFID... Il s'agit de restituer toute la richesse de ces applications dans un volume horaire modeste, ce qui limite les géométries envisagées et le formalisme utilisé. Le point de vue adopté cherche à mettre l'accent sur les phénomènes et sur la modélisation sommaire de leurs applications. Toute étude du champ électromoteur est exclue. L'induction et les forces de Laplace dans un circuit mobile sont introduites dans le cas d'un champ uniforme et stationnaire, soit dans le modèle des rails de Laplace, soit dans celui d'un cadre rectangulaire en rotation. Ce dernier modèle permet d'introduire la notion de dipôle magnétique et une analogie de comportement permet de l'étendre au cas de l'aiguille d'une boussole.

Le succès de cet enseignement suppose le respect de ces limitations : il ne s'agit pas d'une étude générale des phénomènes d'induction. Corrélativement, l'enseignement de cette partie doit impérativement s'appuyer sur une démarche expérimentale authentique, qu'il s'agisse d'expériences de cours ou d'activités expérimentales.

La partie **1.7.1 « Champ magnétique »** vise à relier le champ magnétique et ses sources ; l'accent est mis sur le concept de champ vectoriel, l'analyse des symétries et des invariances, l'exploitation des représentations graphiques et la connaissance d'ordres de grandeur.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.1. Champ magnétique</b>	
Sources de champ magnétique ; cartes de champ magnétique.	Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible et l'emplacement des sources. Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme. Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.
Symétries et invariances des distributions de courant.	Exploiter les propriétés de symétrie et d'invariance des sources pour prévoir des propriétés du champ créé.
Lien entre le champ magnétique et l'intensité du courant.	Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.
Moment magnétique.	Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. Associer à un aimant un moment magnétique par analogie avec une boucle de courant. Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

Dans la partie **1.7.2 « Actions d'un champ magnétique »**, l'enseignant est libre d'introduire la force de Laplace avec ou sans référence à la force de Lorentz. Il s'agit ici de se doter d'expressions opérationnelles pour étudier le mouvement dans un champ uniforme et stationnaire (soit d'une barre en translation, soit d'un moment magnétique en rotation modélisé par un cadre rectangulaire).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.2. Actions d'un champ magnétique</b>	
Densité linéique de la force de Laplace dans le cas d'un élément de courant filiforme.	Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.
Résultante et puissance des forces de Laplace.	Établir et citer l'expression de la résultante des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire. Exprimer la puissance des forces de Laplace.
Couple et puissance des actions mécaniques de Laplace dans le cas d'une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.	Établir et exploiter l'expression du moment du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique. Exprimer la puissance des actions mécaniques de Laplace.
Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.	<b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'action d'un champ magnétique uniforme sur une boussole.</b>



Effet moteur d'un champ magnétique tournant.	<b>Créer un champ magnétique tournant à l'aide de deux ou trois bobines et mettre en rotation une aiguille aimantée.</b>
--	--

La partie **1.7.3 « Lois de l'induction »** repose sur la loi de Faraday qui se prête parfaitement à une introduction expérimentale et qui constitue un bel exemple d'illustration de l'histoire des sciences. On évoque, à ce sujet, les différents points de vue possibles sur le même phénomène selon le référentiel dans lequel on se place.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.3. Lois de l'induction</b>	
<b>Flux d'un champ magnétique</b> Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
<b>Loi de Faraday</b> Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.	<b>Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.</b>
Loi de modulation de Lenz.	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Force électromotrice induite, loi de Faraday.	Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algrébrisation.

La partie **1.7.4 « Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps »** aborde le phénomène d'auto-induction puis le couplage par mutuelle inductance entre deux circuits fixes. Elle traite du modèle du transformateur de tensions.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps</b>	
<b>Auto-induction</b> Flux propre et inductance propre.	Différencier le flux propre des flux extérieurs. Utiliser la loi de modulation de Lenz. Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.  <b>Mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine.</b>
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.
<b>Cas de deux bobines en interaction</b> Inductance mutuelle entre deux bobines.	Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale »
Circuits électriques à une maille couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.	Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.

La partie **1.7.5 « Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire »** est centrée sur la conversion de puissance. Des situations géométriques simples permettent de dégager les paramètres physiques pertinents afin de modéliser, par exemple, un dispositif de freinage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.5. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire</b>	
<b>Conversion de puissance mécanique en puissance électrique</b> Rail de Laplace. Spire rectangulaire soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et en rotation uniforme autour d'un axe fixe orthogonal au champ magnétique.	Interpréter qualitativement les phénomènes observés. Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Effectuer un bilan énergétique. Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
Freinage par induction.	Expliquer l'origine des courants de Foucault et en citer des exemples d'utilisation.  <b>Mettre en évidence qualitativement les courants de Foucault.</b>

La partie **1.8. « Introduction à la physique quantique »** est structurée autour de la présentation d'expériences réalisées depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. Cette partie vise à questionner la représentation classique du monde proposée dans les autres parties du programme. Les concepts essentiels abordés sont la dualité onde-particule, l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde, l'inégalité de Heisenberg spatiale et la quantification de l'énergie dans les atomes. La réflexion sur les thèmes abordés ici est avant tout qualitative ; toute dérivation calculatoire exploitant les concepts propres à la physique quantique doit être évitée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.8. Introduction à la physique quantique</b>	
<b>Dualité onde-particule pour la lumière et la matière</b> Photon : énergie et impulsion.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.
Onde de matière associée à une particule. Relation de de Broglie.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire de la matière. Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.
<b>Introduction au formalisme quantique</b> Fonction d'onde : introduction qualitative, interprétation probabiliste.	Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes.
Inégalité de Heisenberg spatiale.	Établir par analogie avec la diffraction des ondes lumineuses, l'inégalité en ordre de grandeur : $\Delta p \Delta x \geq \hbar$ .
<b>Quantification de l'énergie</b> Modèle planétaire de Bohr. Limites.	Exploiter l'hypothèse de quantification du moment cinétique orbital pour obtenir l'expression des niveaux d'énergie électronique de l'atome d'hydrogène.

## Thème 4 : constitution et transformations de la matière (2)

Les modèles de description microscopique des solides sont présentés dans la partie 4.3. « **Structure et propriétés physiques des solides** » à partir de l'observation et des propriétés macroscopiques de différents solides cristallisés que l'enseignant est libre de choisir. L'introduction du modèle du cristal parfait se fait sur l'exemple de la maille cubique à faces centrées (CFC), seule maille dont la connaissance est exigible ; l'ensemble des notions associées à cette première étude est réinvesti pour étudier d'autres structures cristallines dont la constitution est alors fournie.

L'objectif principal de l'étude des cristaux métalliques, covalents et ioniques est d'aborder une nouvelle fois la notion de modèle : les allers-retours entre le niveau macroscopique (solides de différentes natures) et la modélisation microscopique (cristal parfait) permettent de montrer les limites du modèle du cristal parfait et de confronter les prédictions faites par ce modèle aux valeurs expérimentales mesurées sur le solide réel (distances internucléaires et interatomiques, masse volumique, etc.). Ce chapitre constitue une occasion de revenir sur les positions relatives des éléments dans le tableau périodique, en lien avec la nature des interactions assurant la cohésion des édifices présentés, ainsi que sur les interactions intermoléculaires et la notion de solubilisation pour les solides ioniques et moléculaires. Une réflexion sur les modèles conduisant à la détermination des différents types de rayons à partir des méthodes expérimentales d'analyse des structures des solides peut être proposée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.3. Structure et propriétés physiques des solides</b>	
<b>Modèle du cristal parfait</b> Solide amorphe, solide cristallin, solide semi-cristallin ; variétés allotropiques.	<b>Illustrer l'influence des conditions expérimentales sur la formation de solides et de solides cristallins.</b>
Description du cristal parfait ; population, coordinence, compacité, masse volumique. Rayons métallique, covalent, de van der Waals ou ionique.	Décrire un cristal parfait comme un assemblage de mailles parallélépipédiques. Déterminer la population, la coordinence et la compacité pour une structure fournie. Déterminer la valeur de la masse volumique d'un matériau cristallisé selon une structure cristalline fournie. Relier le rayon métallique, covalent, de van der Waals ou ionique, selon le cas, aux paramètres d'une maille donnée.
Description des modèles d'empilement compact de sphères identiques.	Localiser les interstices tétraédriques et octaédriques entre les plans d'empilement.
Maille conventionnelle CFC et ses sites interstitiels.	Localiser, dénombrer les sites tétraédriques et octaédriques d'une maille CFC et déterminer leur habitabilité.
Limites du modèle du cristal parfait.	Confronter des données expérimentales aux prévisions du modèle.
<b>Métaux</b> Cohésion et propriétés physiques des métaux.	Positionner dans le tableau périodique et reconnaître les métaux et non métaux. Relier les caractéristiques de la liaison métallique (ordre de grandeur énergétique, non directionnalité) aux propriétés macroscopiques des métaux.

<b>Solides covalents et moléculaires</b> Cohésion et propriétés physiques des solides covalents et moléculaires.	Relier les caractéristiques des liaisons covalentes, des interactions de van der Waals et des interactions par pont hydrogène (directionnalité ou non, ordre de grandeur des énergies mises en jeu) et les propriétés macroscopiques des solides correspondants.
<b>Solides ioniques</b> Cohésion et propriétés physiques des solides ioniques.	Relier les caractéristiques de l'interaction ionique dans le cadre du modèle du solide ionique parfait (ordre de grandeur de l'énergie d'interaction, non directionnalité, charge localisée) avec les propriétés macroscopiques des solides ioniques.

#### 4.4. Transformations chimiques en solution aqueuse

Les transformations chimiques en solution aqueuse jouent un rôle essentiel en chimie, en biochimie, dans le domaine du vivant et dans les procédés industriels. Un nombre considérable de développements technologiques et d'analyses environnementales (traitement des eaux, méthodes d'analyse, extraction d'ions métalliques des minerais, générateurs électrochimiques, lutte contre la corrosion, etc) repose sur des transformations acido-basiques, de solubilisation-précipitation et d'oxydo-réduction en solution aqueuse dont la maîtrise est importante pour prévoir, interpréter et optimiser les phénomènes mis en jeu.

L'objectif de cette partie est donc de présenter différents types de réactions susceptibles d'intervenir en solution aqueuse, d'en déduire des diagrammes de prédominance ou d'existence d'espèces chimiques, notamment des diagrammes potentiel-pH, et de les utiliser comme outil de prévision et d'interprétation des transformations chimiques quel que soit le milieu donné. Les conventions de tracé seront toujours précisées.

Les choix pédagogiques relatifs au contenu des séances de travail expérimental permettront de contextualiser ces enseignements. Les dosages par titrage sont étudiés exclusivement en travaux pratiques. L'analyse des conditions choisies ou la réflexion conduisant à une proposition de protocole expérimental pour atteindre un objectif donné constituent des mises en situation des enseignements évoqués précédemment. Ces séances de travail expérimental constituent une nouvelle occasion d'aborder qualité et précision de la mesure.

Les différentes transformations en solution aqueuse abordées dans la partie **4.4.1. « Réactions acide-base et de précipitation »** constituent des illustrations de l'évolution des systèmes chimiques introduites au premier semestre, les étudiants étant amenés à déterminer l'état final d'un système en transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique. On montrera qu'il est ainsi possible d'analyser et de simplifier une situation complexe pour parvenir à la décrire rigoureusement et quantitativement, en l'occurrence dans le cas des solutions aqueuses par une seule réaction. Il est cependant important de noter qu'on évite tout calcul inutile de concentration, en privilégiant l'utilisation des diagrammes pour valider le choix de la réaction mise en jeu. Dans ce cadre, aucune formule de calcul de pH n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4.1. Réactions acide-base et de précipitation</b>	
<b>Réactions acido-basiques</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante d'acidité ;</li> <li>- diagramme de prédominance, de distribution ;</li> <li>- exemples usuels d'acides et bases : nom, formule et nature – faible ou forte – des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, acétique, de la soude, l'ion</li> </ul>	Identifier le caractère acido-basique d'une réaction en solution aqueuse. Écrire l'équation de la réaction modélisant une transformation en solution aqueuse en tenant compte des caractéristiques du milieu réactionnel (nature des espèces chimiques en présence, pH...) et des observations expérimentales.

<p>hydrogénocarbonate, l'ammoniac.</p> <p><b>Réactions de dissolution ou de précipitation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante de l'équation de dissolution, produit de solubilité <math>K_s</math> ;</li> <li>- solubilité et condition de précipitation ;</li> <li>- domaine d'existence ;</li> <li>- facteurs influençant la solubilité.</li> </ul>	<p>Déterminer la valeur de la constante d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques sont connues.</p> <p>Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p>Prévoir l'état de saturation ou de non saturation d'une solution.</p> <p>Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.</p> <p>Exploiter des courbes d'évolution de la solubilité d'un solide en fonction d'une variable.</p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction acide-base et une réaction de précipitation pour réaliser une analyse quantitative en solution aqueuse.</b></p> <p><b>Illustrer un procédé de retraitement, de recyclage, de séparation en solution aqueuse.</b></p>
--	--

L'analyse de transformations mettant en jeu des oxydants et réducteurs usuels et des piles permettent d'aborder, dans la partie **4.4.2. « Réactions d'oxydo-réduction »** les différents concepts associés aux phénomènes d'oxydo-réduction en solution aqueuse. La relation de Nernst (admise en première année) ainsi que la relation entre la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction et les potentiels standard permettent de prévoir l'évolution des systèmes et le caractère favorisé des transformations.

Afin de pouvoir étudier l'influence du milieu sur les espèces oxydantes ou réductrices présentes, les acquis sur les réactions acido-basiques et de précipitation-solubilisation en solution aqueuse sont réinvestis.

Enfin, les diagrammes potentiel-pH sont présentés puis superposés pour prévoir ou interpréter thermodynamiquement des transformations chimiques ; la confrontation avec la réalité amenant à aborder éventuellement des blocages cinétiques en lien avec l'évolution temporelle des systèmes étudiée au premier semestre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4.2. Réactions d'oxydo-réduction</b>	
<p><b>Oxydants et réducteurs, réactions d'oxydo-réduction</b></p> <p>Nombre d'oxydation.</p> <p>Exemples d'oxydants et de réducteurs minéraux usuels : nom, nature et formule des ions thiosulfate, permanganate, hypochlorite, du peroxyde d'hydrogène.</p>	<p>Relier la position d'un élément dans le tableau périodique et le caractère oxydant ou réducteur du corps simple correspondant.</p> <p>Prévoir les nombres d'oxydation extrêmes d'un élément à partir de sa position dans le tableau périodique.</p> <p>Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple.</p>
<p>Pile, tension à vide, potentiel d'électrode, formule de Nernst, électrodes de référence.</p>	<p>Décrire le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode.</p>
<p>Diagrammes de prédominance ou d'existence.</p>	<p>Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.</p>

<p>Aspect thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction. Dismutation et médiامتutation.</p>	<p>Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples.</p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction d'oxydo-réduction pour réaliser une analyse quantitative en solution aqueuse.</b></p> <p><b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement.</b></p>
<p><b>Diagrammes potentiel-pH</b> Principe de construction, lecture et utilisation d'un diagramme potentiel-pH.</p>	<p>Identifier les différents domaines d'un diagramme fourni associés à des espèces chimiques données. Déterminer la valeur de la pente d'une frontière dans un diagramme potentiel-pH. Justifier la position d'une frontière verticale. Prévoir le caractère thermodynamiquement favorisé ou non d'une transformation par superposition de diagrammes.</p>
<p>Diagramme potentiel-pH de l'eau</p>	<p>Prévoir la stabilité des espèces dans l'eau. Prévoir une dismutation ou médiامتutation en fonction du pH du milieu. Confronter les prévisions à des données expérimentales et interpréter d'éventuels écarts en termes cinétiques.</p> <p><b>Mettre en œuvre des réactions d'oxydo-réduction en s'appuyant sur l'utilisation de diagrammes potentiel-pH.</b></p>

### Annexe 1 : matériel

La liste ci-dessous regroupe le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée fournie sous forme de version papier ou numérique. Une utilisation de matériel hors de cette liste lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une introduction guidée suffisamment détaillée.

#### 1. Domaine optique

- Goniomètre
- Viseur à frontale fixe
- Lunette auto-collimatrice
- Spectromètre à fibre optique
- Laser à gaz
- Lampes spectrales
- Source de lumière blanche à condenseur

#### 2. Domaine électrique

- Oscilloscope numérique
- Carte d'acquisition et logiciel dédié
- Générateur de signaux Basse Fréquence
- Multimètre numérique
- Multiplieur analogique

- <b>Risques liés à la pression et à la température</b>	Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.
<b>2. Prévention de l'impact environnemental</b> Traitement et rejet des espèces chimiques.	Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

## Contenus thématiques

Les contenus de la formation sont organisés autour de neuf thèmes.

### 1. Mécanique

- 1.1. Référentiels non galiléens
- 1.2. Lois du frottement solide

### 2. Éléments de traitement du signal

- 2.1. Signaux périodiques
- 2.2. Électronique numérique

### 3. Optique

- 3.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses
- 3.2. Superposition d'ondes lumineuses
- 3.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young
- 3.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue

### 4. Électromagnétisme

- 4.1. Électrostatique
- 4.2. Magnétostatique
- 4.3. Équations de Maxwell
- 4.4. Énergie du champ électromagnétique
- 4.5. Propagation et rayonnement

### 5. Thermodynamique

- 5.1. Principes de la thermodynamique
- 5.2. Transferts thermiques

### 6. Physique quantique

- 6.1. Fonction d'onde et équation de Schrödinger
- 6.2. Particule libre
- 6.3. États stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux
- 6.4. États non stationnaires d'une particule dans un puits de potentiel infini

### 7. Éléments de thermodynamique statistique

- 7.1. Facteur de Boltzmann
- 7.2. Système à spectres discrets d'énergie
- 7.3. Capacités thermiques classiques des gaz et des solides

**8. Transformations chimiques de la matière : aspects thermodynamiques**

- 8.1. Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques
- 8.2. Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques

**9. Aspects thermodynamique et cinétique de l'électrochimie**

- 9.1. Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction
- 9.2. Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction : courbe courant-potentiel
- 9.3. Stockage et conversion d'énergie chimique dans des dispositifs électrochimiques
- 9.4. Corrosion humide et électrochimique

**1. Mécanique**

Le programme de mécanique de MP vise à compléter les acquis de mécanique du cours de MPSI. Il est structuré en deux sous-parties : la première est consacrée aux changements de référentiels, la seconde aux conséquences mécaniques des actions de frottements entre solides.

La partie intitulée « **Référentiels non galiléens** » est organisée autour de deux situations : la translation et la rotation uniforme autour d'un axe fixe. L'accent est mis sur la compréhension qualitative des effets observés, l'évaluation des ordres de grandeurs et les conséquences expérimentales.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Référentiels non galiléens</b>	
Mouvement d'un référentiel par rapport à un autre dans les cas du mouvement de translation et du mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe.	Reconnaître et caractériser un mouvement de translation et un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe d'un référentiel par rapport à un autre.
Vecteur rotation d'un référentiel par rapport à un autre.	Exprimer le vecteur rotation d'un référentiel par rapport à un autre.
Composition des vitesses et des accélérations dans le cas d'une translation, et dans le cas d'une rotation uniforme autour d'un axe fixe : vitesse d'entraînement, accélérations d'entraînement et de Coriolis.	Relier les dérivées d'un vecteur dans des référentiels différents par la relation de la dérivation composée. Citer et utiliser les expressions de la vitesse d'entraînement et des accélérations d'entraînement et de Coriolis.
Dynamique du point en référentiel non galiléen dans le cas où le référentiel entraîné est en translation, ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen. Forces d'inertie.	Exprimer les forces d'inerties, dans les seuls cas où le référentiel entraîné est en translation, ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen. Décrire et interpréter les effets des forces d'inertie dans des cas concrets : sens de la force d'inertie d'entraînement dans un mouvement de translation ; caractère centrifuge de la force d'inertie d'entraînement dans le cas où le référentiel est en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen. Utiliser les lois de la dynamique en référentiel non galiléen dans les seuls cas où le référentiel entraîné est en translation, ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen.



Caractère galiléen approché d'un référentiel. Exemple du référentiel de Copernic, du référentiel géocentrique et du référentiel terrestre.	Citer quelques manifestations du caractère non galiléen du référentiel terrestre. Estimer, en ordre de grandeur, la contribution de la force d'inertie de Coriolis dans un problème de dynamique terrestre.
--	---

La partie « **Lois du frottement solide** », est limitée au seul cas de la translation ; elle permet de mettre en œuvre un mode de raisonnement spécifique et particulièrement formateur, sans pour autant omettre les conséquences expérimentales.

<b>1.2. Lois du frottement solide</b>	
Contact entre deux solides. Aspects microscopiques. Lois de Coulomb du frottement de glissement dans le seul cas d'un solide en translation. Aspect énergétique.	Utiliser les lois de Coulomb dans les trois situations : équilibre, mise en mouvement, freinage. Formuler une hypothèse (quant au glissement ou non) et la valider. Effectuer un bilan énergétique.  <b>Effectuer une mesure d'un coefficient de frottement.</b>  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler une situation mécanique dans laquelle intervient au moins un changement de mode de glissement.

## 2. Éléments de traitement du signal

Ce thème du programme, décomposé en deux parties, complète l'étude des circuits électriques linéaires menée dans la partie « **Ondes et signaux** » du programme de MPSI. La composante expérimentale est forte et les capacités exigibles ont vocation à être principalement développées au cours de séances de travaux pratiques.

Dans la première partie intitulée « **Signaux périodiques** », l'accent est mis sur l'action d'un filtre linéaire sur un signal périodique, l'objectif étant de comprendre le rôle central de la linéarité des systèmes pour interpréter ou prévoir la forme du signal résultant d'un filtrage.

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<b>2.1. Signaux périodiques</b>	
Signaux périodiques.	Commenter le spectre d'un signal périodique : relier la décomposition spectrale et l'allure du signal dans le domaine temporel.
Action d'un filtre linéaire du premier ou du second ordre sur un signal périodique.	Prévoir l'effet d'un filtrage linéaire sur la composition spectrale d'un signal périodique. Expliciter les conditions pour obtenir un comportement intégrateur ou dérivateur.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'action d'un filtre sur un signal périodique.</b>

La seconde partie intitulée « **Électronique numérique** » est à vocation uniquement expérimentale ; elle constitue une initiation au traitement numérique des signaux à travers les

points suivants : l'échantillonnage et le repliement de spectre, la conversion analogique/numérique et le filtrage numérique. Le phénomène de repliement de spectre est présenté qualitativement au moyen d'illustrations démonstratives, l'objectif étant de mettre en place la condition de Nyquist-Shannon afin de réaliser convenablement une acquisition numérique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Électronique numérique</b>	
Échantillonnage, fréquence d'échantillonnage. Conséquences expérimentales du théorème de Nyquist-Shannon.	<p><b>Réaliser l'échantillonnage d'un signal. Choisir la fréquence d'échantillonnage afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon.</b></p> <p><b>Commenter la structure du spectre du signal obtenu après échantillonnage.</b></p> <p><b>Mettre en évidence le phénomène de repliement de spectre au moyen d'un oscilloscope numérique ou d'un logiciel de calcul numérique.</b></p>
Filtrage numérique.	<p><b>Mettre en œuvre un convertisseur analogique/numérique et un traitement numérique afin de réaliser un filtre passe-bas ; utiliser un convertisseur numérique/analogique pour restituer un signal analogique.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler un filtrage numérique et visualiser son action sur un signal périodique.</p>

### 3. Optique

Le programme d'optique de la filière MP s'inscrit dans le prolongement du thème « **Ondes et signaux** » du programme de MPSI. Il s'agit pour les étudiants d'approfondir l'étude des phénomènes d'interférences lumineuses, dans le cadre du modèle ondulatoire de la lumière. L'approche reste centrée sur l'expérience, mais la modélisation doit permettre d'analyser de façon raisonnée les conditions optimales d'observation d'interférences lumineuses, et leur exploitation quantitative. L'enseignant ne manquera pas de rappeler que ces phénomènes, étudiés ici dans le cadre de l'optique, sont généralisables à tout comportement ondulatoire.

La partie « **Modèle scalaire des ondes lumineuses** » introduit les outils nécessaires pour décrire les phénomènes d'interférences. Le programme utilise le mot « intensité » pour décrire la grandeur détectée mais on peut utiliser indifféremment les mots « intensité » ou « éclaircissement » sans chercher à les distinguer à ce niveau. L'intensité lumineuse est introduite comme une puissance par unité de surface. Le théorème de Malus (orthogonalité des rayons de lumière et des surfaces d'ondes) est admis.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses</b>	
Modèle de propagation dans l'approximation de l'optique géométrique.	Utiliser une grandeur scalaire pour décrire un signal lumineux.

Chemin optique. Déphasage dû à la propagation. Surfaces d'ondes. Théorème de Malus (admis). Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	Exprimer le retard de phase en un point (par rapport à un autre) en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique. Associer une description de la formation des images en termes de rayon lumineux et en termes de surfaces d'onde. Utiliser la propriété énonçant que le chemin optique séparant deux points conjugués est indépendant du rayon lumineux choisi.
Modèle d'émission. Relation (admise) entre le temps de cohérence et la largeur spectrale.	Citer l'ordre de grandeur du temps de cohérence $\Delta t$ de quelques radiations visibles. Utiliser la relation $\Delta f \cdot \Delta t \sim 1$ pour relier le temps de cohérence à la largeur spectrale $\Delta \lambda$ de la radiation.
Récepteurs. Intensité de la lumière.	Relier l'intensité à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique. Citer l'ordre de grandeur du temps de réponse de quelques récepteurs de lumière.  <b>Mettre en œuvre des expériences utilisant un capteur photographique numérique.</b>

Dans la partie « **Superposition d'ondes lumineuses** », la formule de Fresnel, admise en classe de première année, est démontrée. L'étude de la superposition de N ondes cohérentes ne doit pas donner lieu à des développements calculatoires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Superposition d'ondes lumineuses</b>	
Superposition de deux ondes incohérentes entre elles.	Justifier et utiliser l'additivité des intensités.
Superposition de deux ondes monochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel. Facteur de contraste.	Citer les principales conditions pour que le phénomène d'interférences apparaisse (ondes quasi synchrones, déphasage constant dans le temps ou très lentement variable). Établir et utiliser la formule de Fresnel. Associer un bon contraste à des ondes d'intensités voisines.
Superposition de N ondes monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique.	Établir la relation fondamentale des réseaux liant la condition d'interférences constructives à l'expression de la différence de marche entre deux ondes issues de motifs consécutifs. Établir, par le calcul, la demi-largeur $2\pi/N$ des pics principaux de la courbe d'intensité en fonction du déphasage.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant un phénomène d'interférences à N ondes.</b>

Dans la partie « **Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young** », les trous d'Young permettent de confronter théorie et expérience. Les fentes d'Young peuvent être abordées mais de manière exclusivement expérimentale. Aucune connaissance sur un autre diviseur du front d'onde n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young</b>	
Trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source ponctuelle à distance finie et observation à grande distance. Champ d'interférences. Ordre d'interférences.	Définir, exprimer et utiliser l'interfrange et l'ordre d'interférences. Justifier que les franges ne sont pas localisées.
Variations de l'ordre d'interférences avec la position du point d'observation ; franges d'interférences.	Interpréter la forme des franges observées.
Variations de l'ordre d'interférences avec la position d'un point source. Perte de contraste par élargissement angulaire de la source.	Utiliser un critère de brouillage des franges portant sur l'ordre d'interférence.
Variations de l'ordre d'interférence avec la longueur d'onde. Perte de contraste par élargissement spectral de la source.	Utiliser un critère de brouillage des franges portant sur l'ordre d'interférence.

Dans la partie « **Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue** », l'étude de l'interféromètre de Michelson en lame d'air permet de confronter théorie et expérience. L'étude de l'interféromètre de Michelson en coin d'air est abordée de manière exclusivement expérimentale. Pour la modélisation d'un interféromètre de Michelson, on suppose la séparatrice infiniment mince.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue</b>	
Interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (admise) des franges.	Citer les conditions d'éclairage et d'observation en lame d'air et en coin d'air.
Lame d'air : franges d'égale inclinaison.	Établir et utiliser l'expression de la différence de marche en fonction de l'épaisseur de la lame d'air équivalente et de l'angle d'incidence des rayons.  <b>Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue à l'aide d'un protocole proposé. Mettre en œuvre un protocole pour accéder au profil spectral d'une raie ou d'un doublet à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</b>
Coin d'air : franges d'égale épaisseur.	Utiliser l'expression admise de la différence de marche en fonction de l'épaisseur.  <b>Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson. Interpréter qualitativement les observations en lumière blanche.</b>

## 4. Électromagnétisme

Le programme d'électromagnétisme de la classe de MP s'inscrit dans le prolongement du thème « **Ondes et signaux** » du programme de MPSI. Il s'agit pour les étudiants de découvrir les lois locales et intégrales qui gouvernent les champs électrique et magnétique et les phénomènes que ces lois permettent de modéliser, notamment dans le domaine des ondes électromagnétiques. L'étude des champs électrostatique et magnétostatique est présentée en deux parties distinctes ; l'enseignant est libre, s'il le souhaite, de procéder à une présentation unifiée de la notion de champ statique. Pour les calculs de champs, l'accent est mis sur les situations à haut degré de symétrie qui permettent l'utilisation efficace des propriétés de flux ou de circulation. Les équations locales des champs statiques sont introduites comme cas particuliers des équations de Maxwell. La loi de Biot et Savart, les notions de potentiel vecteur et d'angle solide ne relèvent pas du programme. Les relations de passage relatives au champ électromagnétique peuvent être exploitées mais doivent être systématiquement rappelées.

La partie « **Électrostatique** » constitue un approfondissement des lois quantitatives qui régissent le champ électrostatique. Les notions abordées sont donc centrées sur l'essentiel : distributions de charges, champ et potentiel. Pour le champ électrostatique et le potentiel, on se limite aux expressions dans le cas de charges ponctuelles.

L'accent est mis sur les propriétés intégrales du champ et sur le théorème de Gauss pour des situations présentant un haut degré de symétrie ; ce dernier est admis.

Des capacités sur la lecture des lignes de champ et des surfaces équipotentielles sont développées.

Le condensateur plan est introduit mais l'étude des conducteurs en équilibre électrostatique ne relève pas du programme.

Une approche énergétique est conduite dans un cas simple : une charge ponctuelle placée dans un champ électrostatique extérieur.

Le dipôle est traité, l'accent est mis sur les effets qualitatifs.

Les analogies avec la gravitation sont centrées sur l'application du théorème de Gauss.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1. Électrostatique</b>	
Loi de Coulomb. Champ électrostatique. Champ électrostatique créé par un ensemble de charges ponctuelles. Principe de superposition.	Exprimer le champ électrostatique créé par une distribution discrète de charges. Citer quelques ordres de grandeur de valeurs de champs électrostatiques.
Distributions continues de charges : volumique, surfacique, linéique.	Choisir un type de distribution continue adaptée à la situation modélisée. Relier les densités de charges de deux types de distributions modélisant une même situation. Déterminer la charge totale d'une distribution continue dans des situations simples.
Symétries et invariances du champ électrostatique.	Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de charges. Identifier les invariances d'une distribution de charges. Exploiter les symétries et les invariances d'une distribution de charges pour caractériser le champ électrostatique créé.

<p>Circulation du champ électrostatique. Potentiel électrostatique. Opérateur gradient.</p>	<p>Relier le champ électrostatique au potentiel. Exprimer le potentiel créé par une distribution discrète de charges. Citer l'expression de l'opérateur gradient en coordonnées cartésiennes. Déterminer un champ électrostatique à partir du potentiel, l'expression de l'opérateur gradient étant fournie dans le cas des coordonnées sphériques et cylindriques. Déterminer une différence de potentiel par circulation du champ électrostatique dans des cas simples.</p>
<p>Flux du champ électrostatique. Théorème de Gauss.</p>	<p>Identifier les situations pour lesquelles le champ électrostatique peut être calculé à l'aide du théorème de Gauss.</p>
<p>Systèmes modélisés par une sphère, un cylindre infini ou un plan infini.</p>	<p>Établir les expressions des champs électrostatiques créés en tout point de l'espace par une sphère uniformément chargée en volume, par un cylindre infini uniformément chargé en volume et par un plan infini uniformément chargé en surface. Établir et énoncer qu'à l'extérieur d'une distribution à symétrie sphérique, le champ électrostatique créé est le même que celui d'une charge ponctuelle concentrant la charge totale et placée au centre de la distribution. Utiliser le théorème de Gauss pour déterminer le champ électrostatique créé par une distribution présentant un haut degré de symétrie.</p>
<p>Étude du condensateur plan modélisé comme la superposition de deux distributions surfaciques, de charges opposées.</p>	<p>Établir et citer l'expression de la capacité d'un condensateur plan dans le vide.</p>
<p>Lignes de champ, tubes de champ, surfaces équipotentielles.</p>	<p>Orienter les lignes de champ électrostatique créées par une distribution de charges. Représenter les surfaces équipotentielles connaissant les lignes de champ et inversement. Associer les variations de l'intensité du champ électrostatique à la position relative des lignes de champ. Vérifier qu'une carte de lignes de champ est compatible avec les symétries et les invariances d'une distribution.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, tracer quelques lignes de champ pour une distribution donnée.</p>
<p>Énergie potentielle électrostatique d'une charge placée dans un champ électrostatique extérieur.</p>	<p>Établir et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrostatique extérieur.</p>

Notion de dipôle électrostatique, moment dipolaire.	Exprimer le moment dipolaire d'un doublet de charges. Évaluer des ordres de grandeur dans le domaine microscopique.
Champ et potentiel créés par un dipôle électrostatique.	Expliciter l'approximation dipolaire. Représenter l'allure des lignes de champ et des surfaces équipotentielles d'un dipôle électrostatique. Établir et exploiter les expressions du champ et du potentiel créés par un doublet de charges dans l'approximation dipolaire.
Dipôle électrostatique placé dans un champ électrostatique extérieur : actions subies et énergie potentielle d'interaction.	Expliquer qualitativement le comportement d'un dipôle placé dans un champ électrostatique extérieur. Établir et exploiter les expressions des actions mécaniques subies par un doublet de charges dans un champ électrostatique extérieur uniforme. Exploiter l'expression fournie de la force subie par un dipôle placé dans un champ électrostatique extérieur non uniforme. Citer et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'interaction.
Analogies avec la gravitation.	Utiliser le théorème de Gauss de la gravitation.

La partie « **Magnétostatique** » s'appuie sur les différents aspects qualitatifs et quantitatifs vus en première année de la classe de MPSI. Les étudiants sont donc déjà familiarisés avec le concept de champ magnétostatique. La loi de Biot et Savart n'est pas introduite ; l'utilisation de celle-ci pour calculer un champ magnétostatique est donc exclue.

Les distributions de courants surfaciques ne sont pas introduites à ce niveau du programme, elles le sont uniquement à l'occasion de la réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait. L'étude des propriétés des dipôles magnétiques, déjà abordée en classe de MPSI est ici complétée notamment en ce qui concerne les actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique extérieur. On peut, sur ce thème, souligner les analogies avec l'électrostatique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2. Magnétostatique</b>	
Vecteur densité de courant volumique. Intensité du courant. Distributions de courant volumique et linéique.	Relier l'intensité du courant et le flux du vecteur densité de courant volumique.
Symétries et invariances des distributions de courant.	Exploiter les propriétés de symétrie et d'invariance des sources pour prévoir des propriétés du champ créé.

Propriétés de flux et de circulation. Théorème d'Ampère.	Identifier les situations pour lesquelles le champ magnétostatique peut être calculé à l'aide du théorème d'Ampère. Choisir un contour, une surface et les orienter pour appliquer le théorème d'Ampère en vue de déterminer l'expression d'un champ magnétique. Utiliser une méthode de superposition. Citer quelques ordres de grandeur de valeurs de champs magnétostatiques.
Modèles du fil rectiligne infini de section non nulle et du solénoïde infini.	Établir les expressions des champs magnétostatiques créés en tout point de l'espace par un fil rectiligne infini de section non nulle, parcouru par des courants uniformément répartis en volume, par un solénoïde infini en admettant que le champ est nul à l'extérieur.
Lignes de champ, tubes de champ.	Orienter les lignes de champ magnétostatique créées par une distribution de courants. Associer les variations de l'intensité du champ magnétostatique à la position relative des lignes de champ. Vérifier qu'une carte de lignes de champ est compatible avec les symétries et les invariances d'une distribution
Notion de dipôle magnétique. Moment magnétique.	Exprimer le moment magnétique d'une boucle de courant plane. Évaluer des ordres de grandeur dans les domaines macroscopique et microscopique.
Champ créé par un dipôle magnétique.	Expliciter l'approximation dipolaire. Représenter l'allure des lignes de champ d'un dipôle magnétique. Exploiter l'expression fournie du champ créé par un dipôle magnétique.
Dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique extérieur : actions subies et énergie potentielle d'interaction.	Expliquer qualitativement le comportement d'un dipôle passif placé dans un champ magnétostatique extérieur. Exploiter les expressions fournies des actions mécaniques subies par un dipôle magnétique dans un champ magnétostatique extérieur uniforme. Exploiter l'expression fournie de la force subie par un dipôle magnétique dans un champ magnétostatique extérieur non uniforme. Citer et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'interaction.

Dans la partie « **Équations de Maxwell** » une vision unifiée des lois de l'électromagnétisme est présentée. Elle conduit à une première approche quantitative du phénomène de propagation et permet également de revenir sur les lois de l'induction étudiées en première année de MPSI. Les lois locales de l'électrostatique relatives au potentiel constituent un support pertinent pour procéder à une approche numérique de la résolution d'une équation aux dérivées partielles.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.3. Équations de Maxwell</b>	



Principe de la conservation de la charge : formulation locale.	Établir l'équation locale de la conservation de la charge en coordonnées cartésiennes dans le cas à une dimension.
Équations de Maxwell : formulations locale et intégrale.	Associer l'équation de Maxwell-Faraday à la loi de Faraday. Citer, utiliser et interpréter les équations de Maxwell sous forme intégrale. Associer qualitativement le couplage spatio-temporel entre champ électrique et champ magnétique au phénomène de propagation. Vérifier la cohérence des équations de Maxwell avec l'équation locale de la conservation de la charge.
Équations de propagation des champs dans une région vide de charges et de courants.	Établir les équations de propagation à partir des équations de Maxwell.
Cas des champs statiques : équations locales.	Établir les lois locales des champs statiques à partir des équations de Maxwell.
Équation de Poisson et équation de Laplace de l'électrostatique.	Établir les équations de Poisson et de Laplace de l'électrostatique. Exprimer par analogie les équations de Poisson et de Laplace dans le cas de la gravitation.

Dans la partie « **Énergie du champ électromagnétique** », aucun modèle relatif à la loi d'Ohm locale n'est exigible ; l'accent est mis sur les échanges d'énergie entre la matière et le champ électromagnétique, sur l'utilisation du flux du vecteur de Poynting pour évaluer une puissance rayonnée à travers une surface et sur les bilans d'énergie et de puissance.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4. Énergie du champ électromagnétique</b>	
Force électromagnétique volumique. Puissance volumique cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge.	Établir et utiliser l'expression de la puissance volumique cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge.
Loi d'Ohm locale ; puissance volumique dissipée par effet Joule.	Analyser les aspects énergétiques dans le cas particulier d'un milieu ohmique.
Énergie électromagnétique volumique. Vecteur de Poynting. Bilan d'énergie.	Citer des ordres de grandeur de flux énergétiques moyens (flux solaire, laser...) Utiliser le flux du vecteur de Poynting à travers une surface orientée pour évaluer la puissance rayonnée. Effectuer un bilan d'énergie sous forme locale et intégrale. Interpréter chaque terme de l'équation locale de Poynting, celle-ci étant fournie.

La partie « **Propagation et rayonnement** » est l'occasion d'illustrer l'efficacité du formalisme local des équations de Maxwell en insistant sur les aspects qualitatifs et sur la variété des applications qui en découlent.

Si le modèle de l'onde plane est présenté dans le cadre de l'espace vide, les études des ondes électromagnétiques dans un plasma ainsi que dans un milieu ohmique permettent d'illustrer l'importance des couplages entre les champs, les charges et les courants. Elles sont également l'occasion d'enrichir les compétences des étudiants sur les phénomènes de propagation en

abondant, par exemple, l'effet de peau, le phénomène de dispersion, les notions de vitesse de groupe et de phase, de fréquence de coupure ou encore d'onde évanescente.

La réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait permet d'aborder la notion d'onde stationnaire. L'importance des conditions aux limites imposées sur la quantification des solutions est soulignée. La notion de densité de courant surfacique est introduite mais le calcul de l'intensité à travers un segment ne relève pas du programme.

L'étude du rayonnement dipolaire repose sur l'analyse et l'exploitation des expressions des champs, qui sont admises. Elle est l'occasion d'étudier une modélisation du phénomène de diffusion d'une onde électromagnétique par un atome et d'en analyser les conséquences.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.5. Propagation et rayonnement</b>	
Onde plane dans l'espace vide de charge et de courant ; onde plane progressive et aspects énergétiques.	Citer les solutions de l'équation de d'Alembert à une dimension. Décrire la structure d'une onde plane et d'une onde plane progressive dans l'espace vide de charge et de courant.
Onde plane progressive monochromatique. Relation de dispersion.	Expliquer le caractère idéal du modèle de l'onde plane monochromatique. Déterminer la relation de dispersion. Citer les domaines du spectre des ondes électromagnétiques et leur associer des applications. Exprimer le vecteur de Poynting et l'énergie électromagnétique volumique associés à une onde plane progressive monochromatique. Effectuer une étude énergétique dans le cas d'une onde plane progressive monochromatique.
Onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement ou circulairement.	Reconnaître une onde polarisée rectilignement ou circulairement.  <b>Utiliser des polariseurs et étudier quantitativement la loi de Malus.</b>
Onde plane transverse électrique monochromatique dans un plasma dilué. Conductivité complexe du milieu. Pulsation de coupure. Ondes évanescentes.	Exprimer la conductivité complexe du milieu et établir la relation de dispersion. Décrire le phénomène de dispersion. Relier la fréquence de coupure aux caractéristiques du plasma et citer son ordre de grandeur dans le cas de l'ionosphère. Distinguer qualitativement les ondes évanescentes et les ondes progressives du point de vue du transport de l'énergie.
Vitesse de phase, vitesse de groupe. Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu linéaire faiblement dispersif.	Calculer la vitesse de groupe à partir de la relation de dispersion. Associer la vitesse de groupe à la propagation de l'enveloppe du paquet d'ondes.
Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu ohmique en régime lentement variable. Effet de peau.	Établir et interpréter l'expression de la longueur caractéristique d'atténuation de l'onde électromagnétique dans un milieu ohmique.

Réflexion sous incidence normale d'une onde plane, progressive et monochromatique polarisée rectilignement sur un plan conducteur parfait. Onde stationnaire.	Établir l'expression de l'onde réfléchie en exploitant les relations de passage fournies. Interpréter qualitativement la présence de courants localisés en surface. Reconnaître et caractériser une onde stationnaire.
Applications aux cavités à une dimension. Mode d'onde stationnaire.	Établir la condition de quantification des solutions. <b>Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques.</b>
Champ électromagnétique rayonné par un dipôle oscillant dans la zone de rayonnement. Puissance rayonnée.	Justifier l'intérêt du modèle du dipôle oscillant et citer des exemples dans différents domaines. Formuler et commenter les approximations reliant les trois échelles de longueur pertinentes. Analyser la structure du champ électromagnétique rayonné, les expressions des champs étant fournies, en utilisant des arguments généraux : symétrie, conservation de l'énergie et analyse dimensionnelle. Effectuer un bilan énergétique, les expressions des champs étant fournies. Représenter l'indicatrice de rayonnement. <b>Détecter une onde électromagnétique rayonnée.</b>
Diffusion d'une onde électromagnétique polarisée rectilignement par une molécule élastiquement liée. Structure de l'onde diffusée. Puissance diffusée en fonction de la fréquence. Résonance. Domaine de Rayleigh.	Déterminer les caractéristiques du dipôle induit en régime établi, par l'action de l'onde incidente sur la molécule. Identifier les domaines de résonances et de Rayleigh. Citer des illustrations de la diffusion d'une onde électromagnétique par un milieu.

## 5. Thermodynamique

Le programme de thermodynamique de la classe de MP s'inscrit dans le prolongement de celui de MPSI. Les principes de la thermodynamique sont désormais écrits sous forme infinitésimale  $dU+dE = \delta W+\delta Q$  et  $dS = \delta S_e + \delta S_c$ . Le premier principe écrit sous forme infinitésimale est réinvesti dans l'étude des transferts thermiques.

La partie intitulée « **Principes de la thermodynamique** » est principalement consacrée à l'étude des systèmes ouverts limitée au cas d'un écoulement unidimensionnel.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.1. Principes de la thermodynamique</b>	
Formulation des principes de la thermodynamique pour une transformation élémentaire.	Utiliser avec rigueur les notations $d$ et $\delta$ en leur attachant une signification.

Premier et deuxième principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire, dans le seul cas d'un écoulement unidimensionnel dans la section d'entrée et la section de sortie.	Établir les relations $\Delta h + \Delta e = w_u + q$ et $\Delta s = s_e + s_c$ et les utiliser pour étudier des machines thermiques réelles à l'aide du diagramme (P,h).
---	---

Dans la partie « **Transferts thermiques** », l'établissement de l'équation de la diffusion thermique est limitée au cas des solides ; il est possible d'utiliser les résultats établis dans d'autres situations, notamment dans le cas de l'étude des fluides, en affirmant la généralisation des équations obtenues dans le cas des solides. Les mises en équations locales sont faites exclusivement sur des géométries où une seule variable d'espace intervient. On admet ensuite les formes générales des équations en utilisant les opérateurs d'analyse vectorielle. Enfin, aucune connaissance spécifique sur les solutions d'une équation de diffusion ne figure au programme.

La loi de Newton à l'interface entre un solide et un fluide est introduite.

<b>5.2. Transferts thermiques</b>	
Conduction, convection et rayonnement.	Identifier un mode de transfert thermique.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.</b>
Flux thermique. Vecteur densité de flux thermique.	Calculer un flux thermique à travers une surface orientée et interpréter son signe.
Premier principe de la thermodynamique.	Effectuer un bilan local d'énergie interne pour un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique.
Loi de Fourier.	Interpréter et utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, verre, acier.  <b>Mesurer la conductivité thermique d'un matériau.</b>
Équation de la diffusion thermique.	Établir l'équation de la diffusion thermique sans terme de source au sein d'un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique. Utiliser une généralisation de l'équation de la diffusion en présence d'un terme de source. Utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur Laplacien et son expression fournie. Analyser une équation de diffusion thermique en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion thermique à une dimension par une méthode des différences finies dérivée de la méthode d'Euler explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.

Régime stationnaire. Résistance thermique.	Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique. Déterminer l'expression de la résistance thermique d'un solide dans le cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Exploiter les lois d'association de résistances thermiques.
Coefficient de transfert thermique de surface ; loi de Newton.	Utiliser la loi de Newton comme condition aux limites à une interface solide-fluide.

## 6. Physique quantique

Cette partie s'inscrit dans le prolongement du programme de la classe de MPSI. Il s'agit cependant de dépasser l'approche descriptive et qualitative et de donner aux étudiants leurs premiers outils quantitatifs d'analyse. Le cœur de cet enseignement est construit sur la mécanique ondulatoire de Schrödinger et propose des résolutions d'exemples simples mais fondamentaux pour la bonne compréhension de problèmes plus complexes : particule dans une marche de potentiel et effet tunnel, particule dans un puits de potentiel infini et quantification de l'énergie d'une particule confinée. On se limite à l'introduction heuristique de la dualité onde-particule et de la densité de courant de probabilité pour une particule libre sans développer la notion de paquet d'ondes.

L'accent doit être mis sur l'interprétation et l'exploitation des résultats et non pas sur les calculs, non exigibles pour l'exemple plus délicat de la barrière de potentiel. Le professeur peut au contraire, s'il le souhaite, proposer des analyses de graphes, des exploitations de formules analytiques fournies, des estimations numériques, des simulations... afin d'aborder des modélisations plus réalistes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.1. Fonction d'onde et équation de Schrödinger</b>	
Fonction d'onde $\psi$ d'une particule sans spin et densité de probabilité de présence.	Interpréter en termes de probabilité l'amplitude d'une onde associée à une particule.
Équation de Schrödinger à une dimension dans un potentiel $V(x)$ .	Utiliser le caractère linéaire de l'équation (principe de superposition).
États stationnaires de l'équation de Schrödinger.	Procéder à la séparation des variables temps et espace. Distinguer l'onde associée à un état stationnaire en mécanique quantique d'une onde stationnaire au sens usuel de la physique des ondes. Relier l'énergie de la particule à l'évolution temporelle de sa fonction d'onde et faire le lien avec la relation de Planck-Einstein. Identifier le terme associé à l'énergie cinétique.
<b>6.2. Particule libre</b>	
Fonction d'onde d'une particule libre non localisée.	Établir les solutions. Interpréter la difficulté de normalisation de cette fonction d'onde.
Relation de de Broglie.	Relier l'énergie de la particule et le vecteur d'onde de l'onde plane associée.

Inégalité d'Heisenberg spatiale et paquet d'ondes.	Expliquer, en s'appuyant sur l'inégalité d'Heisenberg spatiale, que la localisation de la particule peut s'obtenir par superposition d'ondes planes.
Densité de courant de probabilité associée à une particule libre.	Utiliser l'expression admise du courant de probabilité associée à une particule libre ; l'interpréter comme un produit densité*vitesse.
<b>6.3. États stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux</b>	
États stationnaires d'une particule dans le cas d'une marche de potentiel. Cas $E > V$ : probabilité de transmission et de réflexion. Cas $E < V$ : évanescente.	Citer des exemples physiques illustrant cette problématique. Exploiter les conditions de continuité (admisses) relatives à la fonction d'onde. Établir la solution dans le cas d'une particule incidente sur une marche de potentiel. Expliquer les différences de comportement par rapport à une particule classique Déterminer les coefficients de transmission et de réflexion en utilisant les courants de probabilités. Reconnaître l'existence d'une onde évanescente et la caractériser.
Barrière de potentiel et effet tunnel.	Décrire qualitativement l'influence de la hauteur ou de largeur de la barrière de potentiel sur le coefficient de transmission. Exploiter un coefficient de transmission fourni. Citer des applications.
États stationnaires d'une particule dans un puits de potentiel infini.	Établir les solutions et les niveaux d'énergie de la particule confinée. Identifier des analogies avec d'autres domaines de la physique.
Énergie de confinement.	Estimer l'énergie d'une particule confinée dans son état fondamental pour un puits non rectangulaire. Associer l'analyse à l'inégalité d'Heisenberg.
<b>6.4. États non stationnaires d'une particule dans un puits de potentiel infini</b>	
Combinaison linéaire d'états stationnaires.	Expliquer qu'une superposition de deux états stationnaires engendre une évolution au cours du temps de l'état de la particule. Établir l'expression de la densité de probabilité de présence de la particule dans le cas d'une superposition de deux états stationnaires ; interpréter le résultat.

## 7. Éléments de thermodynamique statistique

L'objectif de cette partie est de relier certaines propriétés macroscopiques d'un système constitué d'un grand nombre de particules avec celles des constituants microscopiques. Le facteur de Boltzmann est introduit de manière inductive à partir du modèle d'atmosphère isotherme. L'étude des systèmes à spectre discret d'énergies est l'occasion de montrer, qu'à température donnée l'énergie fluctue et que les fluctuations relatives diminuent avec la taille du système. L'étude des systèmes à deux niveaux, conduite de manière plus exhaustive, permet une analyse plus fine des phénomènes.

L'étude de l'énergie d'un ensemble de particules libres dans une boîte unidimensionnelle à une température donnée établit un lien entre la physique quantique et les propriétés macroscopiques de la matière

Le théorème d'équipartition de l'énergie est l'occasion de procéder à une évaluation des capacités thermiques des gaz et des solides.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>7.1. Facteur de Boltzmann</b>	
Modèle de l'atmosphère isotherme.	Établir la variation de la pression avec l'altitude dans l'hypothèse d'une atmosphère isotherme.
Poids de Boltzmann d'une particule indépendante à l'équilibre avec un thermostat.	Interpréter la loi du nivellement barométrique avec le poids de Boltzmann. Identifier un facteur de Boltzmann. Comparer $kT$ à des écarts d'énergie et estimer les conséquences d'une variation de température.
<b>7.2. Systèmes à spectre discret d'énergies</b>	
Probabilité d'occupation d'un état d'énergie non dégénéré par une particule indépendante.	Exprimer la probabilité d'occupation d'un état d'énergie en utilisant la condition de normalisation. Exploiter un rapport de probabilités entre deux états.
Énergie moyenne et écart quadratique moyen.	Exprimer sous forme d'une somme sur ses états l'énergie moyenne et l'écart-quadratique énergétique d'un système.
Cas d'un système à $N$ particules indépendantes.	Expliquer pourquoi les fluctuations relatives d'énergie régressent quand la taille du système augmente et associer cette régression au caractère quasi-certain des grandeurs thermodynamiques.
Système à deux niveaux non dégénérés d'énergies $\pm \varepsilon$ .	Citer des exemples de systèmes modélisables par un système à deux niveaux. Déterminer l'énergie moyenne et la capacité thermique d'un système à deux niveaux. Interpréter l'évolution de l'énergie moyenne avec la température, notamment les limites basse et haute température. Relier les fluctuations d'énergies à la capacité thermique.
Énergie moyenne d'équilibre à la température $T$ d'un ensemble de $N$ particules dans un puits de potentiel infini.	Déterminer l'énergie moyenne d'un ensemble de particules à une température donnée, dans la limite où l'énergie de confinement est faible devant l'énergie d'agitation thermique. Relier l'expression de l'énergie moyenne en fonction de la température au théorème de l'équipartition de l'énergie.
<b>7.3. Capacités thermiques classiques des gaz et des solides</b>	
Théorème d'équipartition pour un degré de liberté énergétique indépendant quadratique.	Exploiter la contribution $kT/2$ par degré quadratique à l'énergie moyenne.

Capacité thermique molaire des gaz classiques dilués monoatomiques et diatomiques. Capacité thermique molaire des solides dans le modèle d'Einstein classique : loi de Dulong et Petit.	Dénombrer des degrés de libertés énergétiques quadratiques indépendants et en déduire la capacité thermique molaire d'un système.
--	---

### 8. Transformations chimiques de la matière : aspects thermodynamiques

Les transformations chimiques de la matière ont été abordées dès le début de la classe de MPSI ; le critère d'évolution spontanée d'un système chimique en transformation y a été présenté sans être démontré. Ce dernier a été remobilisé lors de l'étude des transformations chimiques en solution aqueuse.

Le but de cette partie est d'une part d'aborder les transferts thermiques et d'autre part d'établir puis exploiter le critère d'évolution spontanée d'un système engagé dans une transformation physico-chimique, ce qui nécessite l'introduction de la fonction enthalpie libre  $G$  et du potentiel chimique.

Dans la partie « **Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques** », l'étude des transferts thermiques, abordée en première année dans le cadre du cours de physique relatif aux transformations physiques du corps pur, est ici généralisée aux transformations physico-chimiques. Les enthalpies standard de réaction sont considérées comme indépendantes de la température.

Les notions et contenus sont illustrés à travers des applications liées à la vie quotidienne (contenu calorique des aliments, pouvoirs calorifiques des carburants, etc.), à la recherche (apports des techniques calorimétriques modernes, etc.) ou au domaine industriel.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>8.1. Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques</b>	
État standard. Enthalpie standard de réaction. Loi de Hess. Enthalpie standard de formation, état standard de référence d'un élément.	Déterminer l'enthalpie standard de réaction à l'aide de tables de données thermodynamiques. Associer le signe de l'enthalpie standard de réaction au caractère endothermique ou exothermique de la réaction.



<p>Effets thermiques pour une transformation monobare :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- transfert thermique associé à la transformation chimique en réacteur monobare, isotherme ;</li> <li>- variation de température en réacteur adiabatique, monobare.</li> </ul>	<p>Prévoir, à partir de données thermodynamiques, le sens et une estimation de la valeur du transfert thermique entre un système, siège d'une transformation physico-chimique et le milieu extérieur. Évaluer la température atteinte par un système siège d'une transformation chimique supposée monobare et réalisée dans un réacteur adiabatique.</p> <p><u>Capacité numérique</u> : simuler, à l'aide d'un langage de programmation, l'évolution temporelle de la température pour un système siège d'une transformation adiabatique modélisée par une seule réaction chimique dont les caractéristiques cinétiques et l'enthalpie standard de réaction sont données.</p> <p><b>Déterminer une enthalpie standard de réaction.</b></p>
---	--

Dans la partie « **Second principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques** », on adopte pour les potentiels chimiques une expression générale :  $\mu_i = \mu_{i,\text{réf}} + RT \ln(a_i)$  qui fait référence aux activités  $a_i$  introduites en première année. L'établissement de cette expression est hors programme. L'influence de la pression sur le potentiel chimique d'un constituant en phase condensée pure n'est pas abordée. On se limite aux cas d'une espèce chimique pure, d'une espèce en solution aqueuse très diluée et d'une espèce en mélange de gaz parfaits avec référence à l'état standard.

Pour le calcul des grandeurs standard de réaction, les enthalpies et entropies standard de réaction sont supposées indépendantes de la température. Les grandeurs standard de réaction permettent la détermination de la valeur, à une température donnée, de la constante thermodynamique d'équilibre  $K^\circ$  caractéristique d'une réaction, valeur qui était systématiquement fournie en première année. C'est ainsi l'occasion de revenir sur la détermination de la composition d'un système physico-chimique en fin d'évolution.

La notion d'affinité chimique n'est pas utilisée, le sens d'évolution spontanée d'un système hors d'équilibre, à température et pression fixées, est déterminé par le signe de l'enthalpie libre de réaction  $\Delta_r G$ .

Enfin, l'étude de l'influence de la modification d'un paramètre (pression, température ou composition) sur un système chimique permet d'aborder la problématique de l'optimisation des conditions opératoires d'un procédé chimique.

Les illustrations et applications sont choisis dans le domaine industriel, dans la vie courante et au niveau du laboratoire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>8.2. Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques</b>	
Potentiel chimique ; enthalpie libre d'un système chimique. Activité.	Définir le potentiel chimique à l'aide de la fonction enthalpie libre et donner l'expression (admise) du potentiel chimique d'un constituant en fonction de son activité. Exprimer l'enthalpie libre d'un système chimique en fonction des potentiels chimiques.

<p>Enthalpie de réaction, entropie de réaction, enthalpie libre de réaction et grandeurs standard associées. Relation entre enthalpie libre de réaction et quotient de réaction ; évolution d'un système chimique.</p>	<p>Justifier qualitativement ou prévoir le signe de l'entropie standard de réaction. Relier création d'entropie et enthalpie libre de réaction lors d'une transformation d'un système physico-chimique à pression et température fixées. Prévoir le sens d'évolution à pression et température fixées d'un système physico-chimique dans un état donné à l'aide de l'enthalpie libre de réaction. Déterminer les grandeurs standard de réaction à partir des tables de données thermodynamiques et de la loi de Hess. Déterminer les grandeurs standard de réaction d'une réaction dont l'équation est combinaison linéaire d'autres équations de réaction.</p>
<p>Constante thermodynamique d'équilibre ; relation de Van 't Hoff.</p>	<p>Citer et exploiter la relation de Van 't Hoff. Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à une température quelconque.</p> <p><b>Déterminer l'évolution de la valeur d'une constante thermodynamique d'équilibre en fonction de la température.</b></p>
<p>État final d'un système : équilibre chimique ou transformation totale.</p>	<p>Déterminer la composition chimique d'un système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p>
<p>Optimisation thermodynamique d'un procédé chimique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- par modification de la valeur de <math>K^\circ</math> ;</li> <li>- par modification de la valeur du quotient de réaction.</li> </ul>	<p>Identifier les paramètres d'influence et leur contrôle pour optimiser une synthèse ou minimiser la formation d'un produit secondaire indésirable.</p>

### 9. Aspects thermodynamique et cinétique de l'électrochimie.

Les aspects thermodynamiques et cinétiques des réactions d'oxydo-réduction sont appliqués notamment à la corrosion d'une part et aux dispositifs électrochimiques que sont les piles et les accumulateurs d'autre part. L'illustration des notions gagne à s'appuyer sur des applications concrètes comme par exemple la mise en œuvre de capteurs électrochimiques dans l'analyse de l'eau, de l'air ou d'effluents.

L'approche de l'électrochimie proposée ici privilégie les raisonnements qualitatifs et les aspects expérimentaux, plutôt que les développements théoriques et formels.

La partie « **Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction** » se fonde sur les acquis de première année relatifs à l'étude des réactions d'oxydo-réduction et des piles, ainsi que sur la partie de thermodynamique chimique de seconde année pour relier les grandeurs thermodynamiques aux potentiels.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>9.1. Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction</b>	
Relation entre enthalpie libre de réaction et potentiels des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.	Citer et exploiter la relation entre l'enthalpie libre de réaction et les potentiels des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.
Relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard des couples impliqués.	Déterminer l'enthalpie libre standard d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples. Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple d'oxydo-réduction à partir de données thermodynamiques.

La partie « **Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction : courbe courant-potentiel** » se fonde sur les acquis de cinétique chimique de première année et les prolongent par le tracé et l'exploitation de courbes courant-potentiel

Les courbes courant-potentiel, dont le tracé est proposé en capacité expérimentale, sont un outil essentiel dans la compréhension et la modélisation des systèmes électrochimiques.

L'écart entre le potentiel d'une électrode et son potentiel d'équilibre est appelé surpotentiel plutôt que surtension pour des raisons pédagogiques, en cohérence avec le vocabulaire anglo-saxon correspondant.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>9.2. Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction : courbe courant-potentiel</b>	
<p>Courbes courant-potentiel sur une électrode en régime stationnaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- surpotentiel ;</li> <li>- systèmes rapides et systèmes lents ;</li> <li>- nature de l'électrode ;</li> <li>- courant de diffusion limite ;</li> <li>- vagues successives ;</li> <li>- domaine d'inertie électrochimique du solvant.</li> </ul>	<p>Décrire le montage à trois électrodes permettant de tracer des courbes courant-potentiel.</p> <p>Relier vitesse de réaction électrochimique et intensité du courant.</p> <p>Identifier le caractère lent ou rapide d'un système à partir des courbes courant-potentiel.</p> <p>Identifier les espèces électroactives pouvant donner lieu à une limitation en courant par diffusion.</p> <p>Relier qualitativement ou quantitativement, à partir de relevés expérimentaux, l'intensité du courant de diffusion limite à la concentration du réactif et à la surface immergée de l'électrode.</p> <p>Tracer l'allure de courbes courant-potentiel de branches d'oxydation ou de réduction à partir de données fournies, de potentiels standard, concentrations et surpotentiels.</p> <p><b>Tracer et exploiter des courbes courant-potentiel.</b></p>

La partie « **Stockage et conversion d'énergie dans des dispositifs électrochimiques** » s'appuie sur les courbes courant-potentiel pour étudier le fonctionnement des piles et leur recharge, ainsi que les électrolyseurs. Ces courbes permettent en effet de déterminer différentes caractéristiques : réactions aux électrodes, tension à vide, tension à imposer pour une recharge, etc.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>9.3. Stockage et conversion d'énergie chimique dans des dispositifs électrochimiques</b>	
<p><b>Conversion d'énergie chimique en énergie électrique : fonctionnement des piles.</b></p> <p>Transformations spontanées et réaction modélisant le fonctionnement d'une pile électrochimique.</p>	<p>Établir l'inégalité reliant la variation d'enthalpie libre et le travail électrique. Relier la tension à vide d'une pile et l'enthalpie libre de la réaction modélisant son fonctionnement. Déterminer la capacité électrique d'une pile.</p>
<p>Courbes courant-potentiel et fonctionnement d'une pile électrochimique.</p>	<p>Exploiter les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'une pile électrochimique et tracer sa caractéristique. Citer les paramètres influençant la résistance interne d'une pile électrochimique.</p>
<p><b>Conversion d'énergie électrique en énergie chimique.</b></p> <p>Transformations forcées lors d'une électrolyse et de la recharge d'un accumulateur.</p>	<p>Exploiter les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'un électrolyseur et prévoir la valeur de la tension minimale à imposer. Exploiter les courbes courant-potentiel pour justifier les contraintes (purification de la solution électrolytique, choix des électrodes) dans la recharge d'un accumulateur. Déterminer la masse de produit formé pour une durée et des conditions données d'électrolyse. Déterminer un rendement faradique à partir d'informations fournies concernant le dispositif étudié.</p>
<p>Stockage et conversion d'énergie chimique.</p>	<p><b>Étudier le fonctionnement d'une pile ou d'un électrolyseur pour effectuer des bilans de matière et des bilans électriques.</b></p>

La lutte contre la corrosion est un enjeu économique et la compréhension des phénomènes de corrosion et des facteurs influençant cette corrosion est essentielle pour effectuer des choix de méthodes de protection. La partie « **Corrosion humide ou électrochimique** » exploite les courbes courant-potentiel pour interpréter les phénomènes de corrosion, de protection et de passivation. On se limite à la corrosion uniforme et à la corrosion galvanique de deux métaux en contact. Les tracés de diagrammes de Tafel ou d'Evans sont hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>9.4. Corrosion humide ou électrochimique</b>	

Corrosion uniforme en milieu acide ou en milieu neutre oxygéné : potentiel de corrosion, courant de corrosion. Corrosion d'un système de deux métaux en contact.	Positionner un potentiel de corrosion sur un tracé de courbes courant-potentiel. Interpréter le phénomène de corrosion uniforme d'un métal ou de deux métaux en contact en utilisant des courbes courant-potentiel ou d'autres données expérimentales, thermodynamiques et cinétiques. Citer des facteurs favorisant la corrosion.
Protection contre la corrosion : - revêtement ; - anode sacrificielle ; - protection électrochimique par courant imposé.	Exploiter des tracés de courbes courant-potentiel pour expliquer qualitativement : - la qualité de la protection par un revêtement métallique ; - le fonctionnement d'une anode sacrificielle.
Passivation.	Interpréter le phénomène de passivation sur une courbe courant-potentiel.  <b>Mettre en évidence le phénomène de corrosion et de protection et des facteurs l'influençant.</b>

### Annexe 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en annexe 1 du programme de physique-chimie de la classe de MPSI. À elles deux, ces listes regroupent le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée. Une utilisation de matériel hors de ces listes lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une aide.

#### 1. Domaine optique

- Polariseur.
- Interféromètre de Michelson motorisé.
- Capteur photographique numérique.
- Spectromètre à fibre optique.

#### 2. Domaine électrique

- Oscilloscope numérique avec analyseur de spectre.
- Carte d'acquisition dont l'API est publiée.
- Microcontrôleur.
- Émetteur et récepteur dans le domaine des ondes centimétriques.

#### 3. Domaine de la chimie

- Calorimètre.
- Électrode de référence.
- Électrolyseur et électrodes.

### Annexe 2 : outils mathématiques

Les outils mathématiques dont la maîtrise est nécessaire à la mise en œuvre du programme de physique de la classe de MP sont d'une part ceux qui figurent dans l'annexe 2 du programme de la classe de MPSI et d'autre part ceux qui figurent dans la liste ci-dessous.

- <b>Risques liés à la pression et à la température</b>	Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.
---	--

**Pour les étudiants suivant l'option sciences de l'ingénieur au deuxième semestre.**

Les étudiants doivent prendre conscience du risque lié à la manipulation et au rejet des produits chimiques. L'apprentissage et le respect des règles de sécurité chimique, leur permettent de prévenir et de minimiser ce risque.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Prévention des risques au laboratoire</b>	Adopter une attitude responsable et adaptée au travail en laboratoire. Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.
- <b>Risque chimique</b> Règles de sécurité au laboratoire. Classes et catégories de danger. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Mentions de danger (H) et conseils de prudence (P). Fiches de sécurité.	Relever les indications sur le risque associé au prélèvement, au mélange et au stockage des produits chimiques et adopter une attitude responsable lors de leur utilisation.
<b>2. Prévention de l'impact environnemental</b> Traitement et rejet des espèces chimiques.	Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

## Contenus thématiques

L'organisation des semestres est la suivante.

### Premier semestre MP2I

#### Thème 1 : ondes et signaux (1)

- 1.1. Formation des images
- 1.2. Signaux et composants électriques
- 1.3. Circuit linéaire du premier ordre et du deuxième ordre
- 1.4. Propagation d'un signal

#### Thème 2 : mouvements et interactions (1)

- 2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point
- 2.2. Lois de Newton
- 2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel
- 2.4. Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires

**Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts (1)**

- 3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système : modèle du gaz parfait et de la phase condensée incompressible indilatable
- 3.2. Bilan d'énergie pour un système thermodynamique

**Deuxième semestre MPII options sciences informatiques et sciences de l'ingénieur****Thème 1 : ondes et signaux (2)**

- 1.5. Régime sinusoïdal forcé
- 1.6. Filtrage linéaire

**Thème 2 : mouvements et interactions (2)**

- 2.5. Moment cinétique d'un point matériel
- 2.6. Mouvements dans un champ de gravitation newtonien
- 2.7. Mouvement d'un solide

**Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts (2)**

- 3.3. Deuxième principe. Bilans d'entropie
- 3.4. Transitions de phases
- 3.5. Machines thermiques

**Thème 1 : ondes et signaux (2)**

- 1.7. Induction et forces de Laplace
  - 1.7.1. Champ magnétique
  - 1.7.2. Actions d'un champ magnétique
  - 1.7.3. Lois de l'induction
  - 1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps
  - 1.7.5. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire
- 1.8. Introduction à la physique quantique

**Deuxième semestre MPII option sciences de l'ingénieur****Thème 4 : constitution et transformations de la matière**

- 4.1. Relations entre la structure des entités chimiques et les propriétés physiques macroscopiques
  - 4.1.1. Structure des entités chimiques
  - 4.1.2. Relations entre la structure des entités et les propriétés physiques macroscopiques
- 4.2. Transformations de la matière
  - 4.2.1. Description d'un système et de son évolution vers un état final lors d'une transformation chimique
  - 4.2.2. Évolution temporelle d'un système chimique

**A. Premier semestre MPII****Thème 1 : ondes et signaux (1)**

La partie 1.1. « **Formation des images** » traite de la formation des images et propose une ouverture sur la notion de guidage de la lumière par une fibre optique. Cette partie est l'occasion d'interroger le concept de modèle en physique et d'en identifier les limites de validité. Elle permet également d'aborder de nombreuses applications technologiques ; certaines sont précisées par le programme, d'autres sont laissées à l'appréciation des enseignants (appareil photographique, microscope, optique d'un smartphone, etc.). L'approche expérimentale doit être privilégiée dans ce domaine de la physique qui s'y prête particulièrement bien.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Formation des images</b>	
<b>Sources lumineuses</b> Modèle de la source ponctuelle monochromatique. Spectre.	Caractériser une source lumineuse par son spectre. Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
<b>Modèle de l'optique géométrique</b> Modèle de l'optique géométrique. Notion de rayon lumineux. Indice d'un milieu transparent.	Définir le modèle de l'optique géométrique. Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.
Réflexion, réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Établir la condition de réflexion totale.
La fibre optique à saut d'indice.	Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.
<b>Image d'un objet</b>	
Miroir plan.	Construire l'image d'un objet par un miroir plan.
Lentilles minces.	Exploiter les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence. Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux, identifier sa nature réelle ou virtuelle. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et de Newton. Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.
Stigmatisme approché.	<b>Former l'image d'un objet dans des situations variées.</b> <u>Capacité numérique</u> : tester, à l'aide d'un langage de programmation, le stigmatisme approché d'une lentille demi-boule pour les rayons proches de l'axe optique.
<b>Modèles de quelques dispositifs optiques</b> L'œil.	Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur plan fixe. Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.
Lunette astronomique avec objectif et oculaire convergents. Grossissement.	Représenter le schéma d'une lunette afocale modélisée par deux lentilles minces convergentes ; identifier l'objectif et l'oculaire. Représenter le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » et traversant une lunette afocale. Établir l'expression du grossissement d'une lunette afocale. Exploiter les données caractéristiques d'une lunette commerciale.



	<b>Étudier une maquette de lunette astronomique ou une lunette commerciale pour en déterminer le grossissement.</b>
--	---

La partie 1.2. « **Signaux électriques** » pose les bases nécessaires à l'étude des circuits électriques. Le programme se concentre sur l'étude des comportements résistifs, capacitifs et inductifs.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Signaux et composants électriques</b>	
<b>Grandeurs électriques</b> Charge électrique, intensité du courant électrique. Régime variable et régime continu. Potentiel, référence de potentiel, tension. Puissance électrique.	Relier l'intensité d'un courant électrique au débit de charges. Utiliser la loi des nœuds et la loi des mailles. Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur. Citer les ordres de grandeur d'intensités, de tensions et de puissances dans différents domaines d'application.
<b>Dipôles électriques usuels</b> Source de tension.	Modéliser une source en utilisant la représentation de Thévenin. <b>Évaluer la résistance de sortie d'une source de tension réelle.</b>
Système à comportement résistif.	Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance.
Associations de deux résistances. Ponts diviseurs de tension et de courant.	Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente. Exploiter des ponts diviseurs de tension ou de courant. <b>Mettre en évidence l'influence de la résistance d'entrée d'un voltmètre ou d'un ampèremètre sur les valeurs mesurées.</b>
Système à comportement capacitif : modèle du condensateur idéal. Relation entre charge et tension ; capacité d'un condensateur. Énergie stockée.	Établir l'expression de l'énergie stockée dans un condensateur. Exploiter l'expression fournie de la capacité d'un condensateur en fonction de ses caractéristiques.
Système à comportement inductif : modèle de la bobine idéale. Relation entre intensité et tension ; inductance d'une bobine.	Établir l'expression de l'énergie stockée dans une bobine.

La partie 1.3 « **Circuit linéaire du premier et du deuxième ordre** » aborde l'étude temporelle de circuits linéaires du premier et du second ordre. Il s'agit avant tout de comprendre les principes des méthodes mises en œuvre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3. Circuits linéaires du premier et du deuxième ordre</b>	
Modèle du circuit RC série alimenté par une source idéale de tension.	Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur.

<p>Charge d'un condensateur par une source de tension constante, décharge d'un condensateur, temps caractéristique. Capteurs capacitifs.</p>	<p>Déterminer en fonction du temps la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge et de sa décharge. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire. <b>Mettre en œuvre un capteur capacitif à l'aide d'un microcontrôleur.</b></p>
<p>Stockage et dissipation d'énergie.</p>	<p>Réaliser un bilan énergétique sur le circuit RC série.</p>
<p>Modèle du circuit RL série. Capteurs inductifs.</p>	<p>Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par l'intensité du courant dans le circuit. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire. Réaliser un bilan énergétique sur le circuit RL série.</p>
<p>Circuit du premier ordre.</p>	<p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un circuit linéaire du premier ordre dans un circuit comportant une ou deux mailles et analyser ses caractéristiques.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : mettre en œuvre la méthode d'Euler à l'aide d'un langage de programmation pour simuler la réponse d'un système linéaire du premier ordre à une excitation de forme quelconque.</p>
<p>Modèle du circuit LC. Oscillations harmoniques. Pulsation, fréquence et période propres d'oscillations. Amplitude, phase.</p>	<p>Établir l'équation différentielle qui caractérise l'évolution d'une grandeur électrique ; la résoudre compte-tenu des conditions initiales. Réaliser un bilan énergétique pour le circuit LC.</p>
<p>Modèle du circuit RLC série.</p>	<p>Écrire sous forme canonique l'équation différentielle qui caractérise l'évolution d'une grandeur électrique afin d'identifier la pulsation propre et le facteur de qualité. Identifier la nature de la réponse libre en fonction de la valeur du facteur de qualité. Déterminer la réponse dans le cas d'un régime libre ou indiciel en recherchant les racines du polynôme caractéristique et en tenant compte des conditions initiales. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire selon la valeur du facteur de qualité. Réaliser un bilan énergétique pour un circuit RLC série.</p> <p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire du deuxième ordre et analyser ses caractéristiques.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler la réponse d'un système linéaire du deuxième ordre à une excitation de forme quelconque.</p>

Dans la partie **1.4.** consacrée à la « **Propagation d'un signal** », il est recommandé de s'appuyer sur une approche expérimentale ou sur des logiciels de simulation pour permettre aux étudiants de faire le lien entre l'observation de signaux qui se propagent et la traduction mathématique de cette propagation, sans qu'aucune référence ne soit faite à une équation d'onde. L'étude de la somme de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence et du phénomène d'interférences associé permet de mettre en évidence le rôle essentiel joué par le déphasage entre les deux signaux dans le signal résultant. L'étude des interférences lumineuses est l'occasion d'introduire la notion de différence de chemin optique et de la relier au déphasage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Propagation d'un signal</b>	
Exemples de signaux.	Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.
<b>Propagation d'un signal dans un milieu illimité, non dispersif et transparent</b> Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle non dispersive. Célérité, retard temporel.	Écrire les signaux sous la forme $f(x-ct)$ ou $g(x+ct)$ . Écrire les signaux sous la forme $f(t-x/c)$ ou $g(t+x/c)$ . Prévoir, dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle à position fixée et l'évolution spatiale à différents instants.
Modèle de l'onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle. Vitesse de phase, déphasage, double périodicité spatiale et temporelle.	Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique, mécanique et électromagnétique. Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de phase. Relier le déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation.  <b>Mesurer la vitesse de phase, la longueur d'onde et le déphasage dû à la propagation d'un phénomène ondulatoire.</b>
<b>Phénomène de diffraction</b> Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques. Angle caractéristique de diffraction.	Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture.  <b>Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées.</b>
<b>Phénomène d'interférences</b> Interférences de deux ondes de même fréquence. Interférences constructives, Interférences destructives	Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène.

<p>Interférences de deux ondes lumineuses de même fréquence, différence de chemin optique, conditions d'interférences constructives ou destructives. Exemple du dispositif des trous d'Young éclairé par une source monochromatique.</p>	<p>Déterminer les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young.  Relier le déphasage entre les deux ondes à la différence de chemin optique. Établir l'expression littérale de la différence de chemin optique linéarisée entre les deux ondes. Établir l'expression de l'interfrange.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser le phénomène d'interférences de deux ondes.</b></p>
--	--

## Thème 2 : mouvements et interactions (1)

La partie 2.1 « **Description et paramétrage du mouvement d'un point** » vise notamment à mettre en place les principaux systèmes de coordonnées : cartésiennes, polaires, cylindriques et sphériques. Le but est de permettre aux étudiants de disposer d'outils efficaces pour décrire une grande variété de mouvements de points. Pour atteindre cet objectif, il convient de les familiariser progressivement avec les projections et dérivations de vecteurs ainsi qu'avec l'algébrisation des grandeurs dans un contexte relevant de la physique. Enfin, cette partie est l'occasion de procéder à des analyses qualitatives des comportements cinématiques de systèmes réels assimilés à un point, notamment sur les exemples simples des mouvements rectilignes et circulaires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point</b>	
<p><b>Repérage dans l'espace et dans le temps</b> Espace et temps classiques. Notion de référentiel. Caractère relatif du mouvement. Caractère absolu des distances et des intervalles de temps.</p>	<p>Citer une situation où la description classique de l'espace ou du temps est prise en défaut.</p>
<p><b>Cinématique du point</b> Description du mouvement d'un point. Vecteurs position, vitesse et accélération. Systèmes de coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques.</p>	<p>Exprimer à partir d'un schéma le déplacement élémentaire dans les différents systèmes de coordonnées, construire le trièdre local associé et en déduire géométriquement les composantes du vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes et cylindriques. Établir les expressions des composantes des vecteurs position, déplacement élémentaire, vitesse et accélération dans les seuls cas des coordonnées cartésiennes et cylindriques.</p>
<p>Mouvement rectiligne uniformément accéléré.</p>	<p>Caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : rectiligne, rectiligne uniforme, rectiligne uniformément accéléré.</p>
<p>Mouvement à vecteur accélération constant.</p>	<p>Exprimer le vecteur vitesse et le vecteur position en fonction du temps. Établir l'expression de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.</p>

Mouvement circulaire uniforme et non uniforme.	Exprimer les composantes du vecteur position, du vecteur vitesse et du vecteur accélération en coordonnées polaires planes.
Coordonnées des vecteurs vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour un mouvement circulaire.	Caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : circulaire, circulaire uniforme. Faire le lien avec les composantes polaires de l'accélération.  <b>Réaliser et exploiter quantitativement un enregistrement vidéo d'un mouvement : évolution temporelle des vecteurs vitesse et accélération.</b>

Dans la partie **2.2.** intitulée « **Lois de Newton** », on cherche d'abord à renforcer les compétences des étudiants relatives à la mise en équations d'un problème, qu'il s'agisse des étapes de bilans de forces ou de projection de la deuxième loi de Newton sur la base choisie. On cherche par ailleurs, sur l'exemple de quelques mouvements simples, à renforcer les compétences d'analyse qualitative d'une équation différentielle : stabilité des solutions, positions d'équilibre, type d'évolution, durée ou période typique d'évolution, etc. Cette pratique s'articule avec l'utilisation d'un langage de programmation pour résoudre des équations différentielles. Enfin, il s'agit aussi de confronter les étudiants aux limites de validité de certains modèles de forces, et ainsi de donner toute leur importance aux étapes de modélisation et de validation d'un modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Lois de Newton</b>	
<b>Quantité de mouvement</b> Masse d'un système. Centre de masse d'un système.	Justifier qualitativement la position du centre de masse d'un système, cette position étant donnée.
Quantité de mouvement d'un point matériel et d'un système de points.	Utiliser la relation entre la quantité de mouvement d'un système et la vitesse de son centre de masse.
<b>Lois de Newton</b> Première loi de Newton : principe d'inertie. Référentiels galiléens.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens. Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié.
Notion de force. Troisième loi de Newton.	Établir un bilan des forces sur un système ou sur plusieurs systèmes en interaction et en rendre compte sur un schéma.
Deuxième loi de Newton. Équilibre d'un système.	Utiliser la deuxième loi de Newton dans des situations variées. Exploiter une équation différentielle sans la résoudre analytiquement, par exemple : analyse en ordres de grandeur, existence d'une vitesse limite, écriture adimensionnée, utilisation des résultats obtenus par simulation numérique.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier une loi de force à l'aide d'un microcontrôleur ou de l'analyse d'un mouvement enregistré.</b>
Modèle du champ de pesanteur uniforme au voisinage de la surface d'une planète. Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme.	Établir et exploiter les équations horaires du mouvement. Établir l'équation de la trajectoire.

Modèle linéaire d'une force de frottement fluide. Influence de la résistance de l'air sur un mouvement de chute. Vitesse limite.	<b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides.</b>
Système modèle masse-ressort sans frottement.	Déterminer et résoudre l'équation différentielle du mouvement. Exploiter les analogies avec un oscillateur harmonique électrique.
Tension d'un fil. Pendule simple.	Établir l'équation du mouvement du pendule simple. Justifier le caractère harmonique des oscillations de faible amplitude.

La partie 2.3. « **Approche énergétique du mouvement d'un point matériel** » vise à construire une démarche alternative et complémentaire pour l'étude d'une situation relevant de la mécanique – et plus généralement de la physique – fondée sur la conservation de certaines grandeurs – ici, l'énergie mécanique. Cette approche est l'occasion d'illustrer la capacité prédictive des analyses graphiques et numériques, par exemple pour pouvoir décrire un comportement à partir d'une représentation graphique de l'énergie potentielle dans le cas d'un mouvement conservatif.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel</b>	
<b>Puissance, travail et énergie cinétique</b> Puissance et travail d'une force dans un référentiel.	Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force.
Théorème de l'énergie cinétique dans un référentiel galiléen, dans le cas d'un système modélisé par un point matériel.	Exploiter le théorème de l'énergie cinétique.
<b>Champ de force conservative et énergie potentielle</b> Énergie potentielle. Lien entre un champ de force conservative et l'énergie potentielle.	Établir et citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur (champ uniforme), de l'énergie potentielle gravitationnelle (champ créé par un astre ponctuel), de l'énergie potentielle élastique. Dédire qualitativement du graphe d'une fonction énergie potentielle le sens et l'intensité de la force associée pour une situation à un degré de liberté.
<b>Énergie mécanique</b> Énergie mécanique. Théorème de l'énergie mécanique. Mouvement conservatif.	Exploiter la conservation de l'énergie mécanique pour analyser un mouvement.
Mouvement conservatif à une dimension. Cas d'une situation modélisable par un système masse-ressort et d'un système soumis à un champ de force uniforme.	Identifier sur un graphe d'énergie potentielle une barrière et un puits de potentiel. Dédire d'un graphe d'énergie potentielle le comportement qualitatif : trajectoire bornée ou non, mouvement périodique, positions de vitesse nulle.
Positions d'équilibre. Stabilité.	Dédire d'un graphe d'énergie potentielle l'existence de positions d'équilibre. Analyser qualitativement la nature, stable ou instable, de ces positions.
Petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre stable, approximation locale par un puits de potentiel harmonique.	Établir l'équation différentielle linéarisée du mouvement au voisinage d'une position d'équilibre.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre numériquement une

	équation différentielle du deuxième ordre non-linéaire et faire apparaître l'effet des termes non-linéaires.
--	--

La partie 2.4. « **Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires** » introduit l'expression de la force de Lorentz ainsi que deux situations de base sur lesquelles les étudiants doivent être autonomes dans la résolution, attestant en cela de l'acquisition d'une certaine aisance à ce stade de leur formation. Des situations physiques variées sont en capacité d'illustrer concrètement cette partie qui ne doit pas se réduire à des développements calculatoires ou des illustrations graphiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.4. Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires</b>	
Force de Lorentz exercée sur une charge ponctuelle ; champs électrique et magnétique.	Évaluer les ordres de grandeur des forces électrique ou magnétique et les comparer à ceux des forces gravitationnelles.
Puissance de la force de Lorentz.	Justifier qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme.	Mettre en équation le mouvement et le caractériser comme un mouvement à vecteur accélération constant. Effectuer un bilan énergétique pour déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiel.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétostatique uniforme dans le cas où le vecteur vitesse initial est perpendiculaire au champ magnétostatique.	Déterminer le rayon de la trajectoire sans calcul en admettant que celle-ci est circulaire.

### Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts (1)

Après avoir mis l'accent sur le passage fondamental d'une réalité microscopique à des grandeurs mesurables macroscopiques, cette partie propose, en s'appuyant sur des exemples concrets, de poursuivre la description et l'étude de la matière à l'échelle macroscopique, et d'aborder les bilans d'énergie en thermodynamique.

On utilise les notations suivantes : pour une grandeur extensive « A », « a » sera la grandeur massique associée et «  $A_m$  » la grandeur molaire associée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système : modèles du gaz parfait et de la phase condensée incompressible indilatable</b>	
État microscopique et état macroscopique.	Préciser les paramètres nécessaires à la description d'un état microscopique et d'un état macroscopique sur un exemple. Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques aux propriétés du système à l'échelle microscopique.

Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température thermodynamique, pression. Équation d'état du gaz parfait.	Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz.
Énergie interne du gaz parfait monoatomique. Capacité thermique à volume constant du gaz parfait monoatomique. Capacité thermique à volume constant d'un gaz considéré comme parfait.	Exploiter l'expression de la variation de l'énergie interne d'un gaz considéré comme parfait.
Modèle de la phase condensée incompressible et indilatable. Énergie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée considérée incompressible et indilatable.	Exploiter l'expression de la variation de l'énergie interne d'un système considéré incompressible et indilatable en fonction de sa température.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Bilan d'énergie pour un système thermodynamique</b>	
Énergie interne d'un système. Aspects microscopiques. Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.	Citer les différentes contributions microscopiques et macroscopiques à l'énergie d'un système. Analyser qualitativement les différents termes intervenant dans l'écriture du premier principe.
Modes de transfert thermique.	Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement.
Flux thermique. Résistance thermique.	Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.
Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système incompressible au contact d'un thermostat.	Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible et indilatable en contact avec un thermostat : établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la température du système.
Transformation thermodynamique subie par un système. Évolutions isochore, isotherme, isobare, monobare, monotherme.	Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final.
Travail des forces de pression. Transformation isochore. Transformation monobare.	Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron.
Bilans d'énergie.	Conduire un bilan d'énergie sur un système modélisé par un gaz parfait ou par une phase condensée incompressible et indilatable.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une capacité thermique.</b>



Enthalpie d'un système. Capacité thermique à pression constante dans le cas du gaz parfait et d'une phase condensée incompressible et indilatable.	Exprimer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final. Exprimer l'enthalpie $H_m(T)$ du gaz parfait à partir de l'énergie interne. Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.
--	---

## Second semestre options sciences informatiques et sciences de l'ingénieur

### Thème 1 : Ondes et signaux (2)

La partie 1.5 « Régime sinusoïdal forcé », est l'occasion d'introduire les notions d'impédance et de résonance. Sans en faire un objet d'étude spécifique, l'existence d'analogies comportementales avec des situations relevant du domaine de la mécanique mérite d'être signalée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.5 Régime sinusoïdal forcé</b>	
Signal sinusoïdal. Description du comportement d'un dipôle en régime sinusoïdal forcé. Impédances complexes. Cas d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine.	Établir l'expression de l'impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine.
Association de deux impédances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux impédances par une impédance équivalente.
Oscillateurs électrique soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance.	Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé. Relier l'acuité d'une résonance au facteur de qualité. Déterminer la pulsation propre et le facteur de qualité à partir de graphes expérimentaux d'amplitude et de phase.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental visant à caractériser un phénomène de résonance.</b>

L'objectif principal de la partie 1.6. « Filtrage linéaire » n'est pas de former les étudiants aux aspects techniques des calculs des fonctions de transfert et des tracés de diagrammes de Bode mais de mettre l'accent sur l'interprétation des propriétés du signal de sortie connaissant celles du signal d'entrée et d'appréhender le rôle central de la linéarité des systèmes utilisés.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.6. Filtrage linéaire</b>	
Signaux périodiques.	Définir la valeur moyenne et la valeur efficace d'un signal périodique. Calculer la valeur efficace d'un signal sinusoïdal. Analyser la décomposition fournie d'un signal périodique en une somme de fonctions sinusoïdales.

Fonction de transfert harmonique. Diagramme de Bode.	<p>Tracer le diagramme de Bode (amplitude et phase) associé à une fonction de transfert d'ordre 1.</p> <p>Utiliser une fonction de transfert donnée d'ordre 1 ou 2 (ou ses représentations graphiques) pour étudier la réponse d'un système linéaire à une excitation sinusoïdale, à une somme finie d'excitations sinusoïdales, à un signal périodique.</p> <p>Utiliser les échelles logarithmiques et interpréter les comportements asymptotiques des diagrammes de Bode en amplitude d'après l'expression de la fonction de transfert.</p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental exploitant les propriétés des fonctions de transfert d'un système linéaire.</b></p>
Modèles de filtres passifs d'ordre 1 : passe-bas et passe-haut.	<p>Choisir un modèle de filtre en fonction d'un cahier des charges.</p> <p><b>Étudier le filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal à partir d'une analyse spectrale.</b></p>
Filtre passe-bande.	<p><u>Capacité numérique</u> : simuler, à l'aide d'un langage de programmation, l'action d'un filtre d'ordre 1 ou 2 sur un signal périodique dont le spectre est fourni. Mettre en évidence l'influence des caractéristiques du filtre sur l'opération de filtrage.</p>

## Thème 2 : mouvements et interactions (2)

Au second semestre, le thème « **Mouvements et interactions** » est structuré en trois parties : moment cinétique d'un point matériel, mouvements dans un champ de gravitation newtonien et mouvement d'un solide.

La partie **2.5. « Moment cinétique d'un point matériel »** est l'occasion d'introduire les notions de moment cinétique et de moment d'une force. L'un des objectifs visés est que les étudiants disposent de représentations concrètes qui permettent de donner du sens aux grandeurs vectorielles et scalaires utilisées ; c'est notamment pour cela que le bras de levier est introduit. L'accent est mis sur l'identification des situations où le moment cinétique est conservé.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.5. Moment cinétique d'un point matériel</b>	
Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un point et par rapport à un axe orienté.	Relier la direction et le sens du vecteur moment cinétique aux caractéristiques du mouvement.
Moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté.	Calculer le moment d'une force par rapport à un axe orienté en utilisant le bras de levier.
Théorème du moment cinétique en un point fixe dans un référentiel galiléen. Conservation du moment cinétique.	Identifier les cas de conservation du moment cinétique.

La partie **2.6. « Mouvements dans un champ de gravitation newtonien »** est notamment motivée par ses nombreuses applications possibles. On discute la nature de la trajectoire sur un graphe donnant

l'énergie potentielle effective et on ne poursuit l'étude que dans le cas d'une trajectoire circulaire. Le caractère elliptique des trajectoires associées à un état lié est affirmé sans qu'aucune étude géométrique des ellipses ne soit exigible ; on utilise, dans ce cas, les constantes du mouvement (moment cinétique et énergie mécanique) pour exprimer l'énergie de la trajectoire elliptique en fonction du demi-grand axe.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.6. Mouvement dans un champ de gravitation newtonien</b>	
Point matériel soumis à un champ de gravitation newtonien. Conservation du moment cinétique et conséquences.	Établir la conservation du moment cinétique à partir du théorème du moment cinétique. Établir les conséquences de la conservation du moment cinétique : mouvement plan, loi des aires.
Conservation de l'énergie mécanique. Énergie potentielle effective. État lié et état de diffusion.	Exprimer l'énergie mécanique d'un système conservatif ponctuel à partir de l'équation du mouvement. Exprimer la conservation de l'énergie mécanique et construire une énergie potentielle effective. Décrire qualitativement le mouvement radial à l'aide de l'énergie potentielle effective. Relier le caractère borné du mouvement radial à la valeur de l'énergie mécanique.
Mouvement des satellites et des planètes. Lois de Kepler. Période de révolution. Satellite géostationnaire.	Déterminer les caractéristiques des vecteurs vitesse et accélération du centre de masse d'un système en mouvement circulaire dans un champ de gravitation newtonien. Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas du mouvement circulaire.  <u>Capacité numérique</u> : exploiter, à l'aide d'un langage de programmation, des données astronomiques ou satellitaires pour tester les deuxième et troisième lois de Kepler.

Concernant le solide en rotation autour d'un axe fixe dans la partie **2.7. « Mouvement d'un solide »**, il s'agit de définir le mouvement en remarquant que tout point du solide décrit un cercle autour de l'axe avec une même vitesse angulaire et de déterminer la vitesse de chaque point en fonction de celle-ci et de la distance à l'axe de rotation.

Des exemples de dynamique du solide sont introduits (translation et rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen), avec toutefois des limitations strictes : l'étude générale d'un mouvement composé d'une translation dans un référentiel galiléen et d'une rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel barycentrique ne figure pas au programme. En particulier, l'étude du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe gardant une direction fixe dans un référentiel galiléen mais pour lequel l'axe de rotation est en mouvement est exclue.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.7. Mouvement d'un solide</b>	
<b>Description du mouvement d'un solide dans deux cas particuliers</b> Définition d'un solide.	Différencier un solide d'un système déformable.
Translation.	Reconnaître et décrire une translation rectiligne ainsi qu'une translation circulaire.
Rotation autour d'un axe fixe.	Décrire la trajectoire d'un point quelconque du solide et exprimer sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.

<p><b>Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide mobile autour d'un axe fixe</b></p> <p>Moment cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe : moment d'inertie.</p>	<p>Exploiter, pour un solide, la relation entre le moment cinétique scalaire, la vitesse angulaire de rotation et le moment d'inertie fourni.</p> <p>Relier qualitativement le moment d'inertie à la répartition des masses.</p>
Couple.	Définir un couple.
Liaison pivot.	Définir une liaison pivot et justifier le moment qu'elle peut produire.
Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.	Exploiter le théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.
<p><b>Approche énergétique du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté, dans un référentiel galiléen</b></p> <p>Énergie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.</p>	<p>Utiliser l'expression de l'énergie cinétique, l'expression du moment d'inertie étant fournie.</p> <p><b>Réaliser l'étude énergétique d'un pendule pesant et mettre en évidence une diminution de l'énergie mécanique.</b></p>
Théorème de l'énergie cinétique pour un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Établir, dans ce cas, l'équivalence entre le théorème scalaire du moment cinétique et celui de l'énergie cinétique.

### Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts (2)

Dans le cadre de la mise en œuvre de la partie 3.3. « **Deuxième principe. Bilans d'entropie** », l'expression de la fonction d'état entropie est systématiquement donnée et sa construction n'est pas une capacité visée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.3. Deuxième principe. Bilans d'entropie</b>	
<p>Deuxième principe de la thermodynamique : entropie, entropie créée, entropie échangée.</p> <p><math>\Delta S = S_{\text{ech}} + S_{\text{créé}}</math> avec <math>S_{\text{ech}} = \sum Q_i / T_i</math>.</p>	<p>Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan entropique.</p> <p>Relier la création d'entropie à une ou plusieurs causes physiques de l'irréversibilité.</p> <p>Analyser le cas particulier d'un système en évolution adiabatique.</p>
Variation d'entropie d'un système.	<p>Utiliser l'expression fournie de la fonction d'état entropie.</p> <p>Exploiter l'extensivité de l'entropie.</p>
Loi de Laplace.	Citer et utiliser la loi de Laplace et ses conditions d'application.

La partie 3.4. « **Transitions de phases** » est l'occasion, d'une part, d'utiliser un diagramme de représentation des différents états d'un système et, d'autre part, de conduire des bilans d'enthalpie et d'entropie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.4. Transitions de phase</b>	
Corps pur diphasé en équilibre. Diagramme de phases (P,T). Cas de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme de Clapeyron (P,v), titre en vapeur.	Analyser un diagramme de phase expérimental (P,T). Proposer un jeu de variables d'état suffisant pour caractériser l'état d'équilibre d'un corps pur diphasé soumis aux seules forces de pression. Positionner les phases dans les diagrammes (P,T) et (P,v). Déterminer la composition d'un mélange diphasé en un point d'un diagramme (P,v).
Enthalpie associée à une transition de phase : enthalpie de fusion, enthalpie de vaporisation, enthalpie de sublimation. Variation d'entropie associée à une transition de phase.	Exploiter l'extensivité de l'enthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phases. Exploiter la relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie associées à une transition de phase.

Dans la partie **3.5.** intitulée « **Machines thermiques** », il s'agit d'appliquer les principes de la thermodynamique aux machines thermiques en citant des applications industrielles.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.5. Machines thermiques</b>	
Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.	Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Définir un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Justifier et utiliser le théorème de Carnot. Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération.  <b>Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.</b>

## Thème 1 : Onde et signaux (2)

La partie **1.7. « Induction et forces de Laplace »** s'appuie sur les nombreuses applications présentes dans notre environnement immédiat : boussole, moteur électrique, alternateur, transformateur, haut-parleur, plaques à induction, carte RFID... Il s'agit de restituer toute la richesse de ces applications dans un volume horaire modeste, ce qui limite les géométries envisagées et le formalisme utilisé. Le point de vue adopté cherche à mettre l'accent sur les phénomènes et sur la modélisation sommaire de leurs applications. Toute étude du champ électromoteur est exclue. L'induction et les forces de Laplace dans un circuit mobile sont introduites dans le cas d'un champ uniforme et stationnaire, soit dans le modèle des rails de Laplace, soit dans celui d'un cadre rectangulaire en rotation. Ce dernier modèle permet d'introduire la notion de dipôle magnétique et une analogie de comportement permet de l'étendre au cas de l'aiguille d'une boussole.

Le succès de cet enseignement suppose le respect de ces limitations : il ne s'agit pas d'une étude générale des phénomènes d'induction. Corrélativement, l'enseignement de cette partie doit impérativement s'appuyer sur une démarche expérimentale authentique, qu'il s'agisse d'expériences de cours ou d'activités expérimentales.

La partie **1.7.1 « Champ magnétique »** vise à relier le champ magnétique et ses sources ; l'accent est mis sur le concept de champ vectoriel et l'exploitation des représentations graphiques et la connaissance d'ordres de grandeur.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.1. Champ magnétique</b>	
Sources de champ magnétique ; cartes de champ magnétique.	Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible et l'emplacement des sources. Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme. Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.
Lien entre le champ magnétique et l'intensité du courant.	Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.
Moment magnétique.	Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. Associer à un aimant un moment magnétique par analogie avec une boucle de courant. Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

Dans la partie **1.7.2 « Actions d'un champ magnétique »**, l'enseignant est libre d'introduire la force de Laplace avec ou sans référence à la force de Lorentz. Il s'agit ici de se doter d'expressions opérationnelles pour étudier le mouvement dans un champ uniforme et stationnaire (soit d'une barre en translation, soit d'un moment magnétique en rotation modélisé par un cadre rectangulaire).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.2. Actions d'un champ magnétique</b>	
Densité linéique de la force de Laplace dans le cas d'un élément de courant filiforme.	Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.
Résultante et puissance des forces de Laplace.	Établir et exploiter l'expression de la résultante et de la puissance des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire. Exprimer la puissance des forces de Laplace.
Couple et puissance des actions mécaniques de Laplace dans le cas d'une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.	Établir et exploiter l'expression du moment du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique. Exprimer la puissance des actions mécaniques de Laplace.
Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.	<b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'action d'un champ magnétique uniforme sur une boussole.</b>

Effet moteur d'un champ magnétique tournant.	<b>Créer un champ magnétique tournant à l'aide de deux ou trois bobines et mettre en rotation une aiguille aimantée.</b>
--	--

La partie **1.7.3 « Lois de l'induction »** repose sur la loi de Faraday qui se prête parfaitement à une introduction expérimentale et qui constitue un bel exemple d'illustration de l'histoire des sciences. On évoque, à ce sujet, les différents points de vue possibles sur le même phénomène selon le référentiel dans lequel on se place.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.3. Lois de l'induction</b>	
<b>Flux d'un champ magnétique</b> Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
<b>Loi de Faraday</b> Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.	<b>Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.</b>
Loi de modération de Lenz.	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Force électromotrice induite, loi de Faraday.	Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

La partie **1.7.4 « Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps »** aborde le phénomène d'auto-induction puis le couplage par mutuelle inductance entre deux circuits fixes. Elle traite du modèle du transformateur de tensions.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps</b>	
<b>Auto-induction</b> Flux propre et inductance propre.	Différencier le flux propre des flux extérieurs. Utiliser la loi de modération de Lenz. Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.  <b>Mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine.</b>
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.
<b>Cas de deux bobines en interaction</b> Inductance mutuelle entre deux bobines.	Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale ». <b>Mesurer la valeur de l'inductance mutuelle entre deux bobines et étudier l'influence de la géométrie.</b>
Circuits électriques à une maille couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.	Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.

Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.
--------------------	--

La partie **1.7.5 « Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire »** est centrée sur la conversion de puissance. Des situations géométriques simples permettent de dégager les paramètres physiques pertinents afin de modéliser, par exemple, un dispositif de freinage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.5. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire</b>	
<b>Conversion de puissance mécanique en puissance électrique</b> Rail de Laplace. Spire rectangulaire soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et en rotation uniforme autour d'un axe fixe orthogonal au champ magnétique.	Interpréter qualitativement les phénomènes observés. Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Effectuer un bilan énergétique. Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
Freinage par induction.	Expliquer l'origine des courants de Foucault et en connaître des exemples d'utilisation.  <b>Mettre en évidence qualitativement les courants de Foucault.</b>

La partie **1.8. « Introduction à la physique quantique »** vise à présenter un premier questionnement de la représentation classique du monde proposée dans les autres parties du programme. Les notions essentielles abordées sont le photon et la dualité onde-particule dans une approche essentiellement qualitative sauf dans l'étude des relations d'Einstein et de de Broglie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.8. Introduction à la physique quantique</b>	
<b>Dualité onde-particule pour la lumière et la matière</b> Le photon : énergie, vitesse, masse, impulsion.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.
Effet photoélectrique.	Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière. Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence. Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.
Absorption et émission de photons.	Citer quelques applications actuelles mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR, etc.)
Onde de matière associée à une particule. Relation de de Broglie.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire de la matière. Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques. Interpréter une expérience illustrant la dualité onde-particule.



## Second semestre option sciences de l'ingénieur

### Thème 4 : constitution et transformation de la matière

#### 4.1. Relations entre structure des entités chimiques et propriétés physiques macroscopiques

Le chimiste modélise la matière au niveau microscopique par des entités chimiques dont les structures électroniques et géométriques permettent d'interpréter et de prévoir certaines des propriétés physiques et chimiques de la matière au niveau macroscopique.

La partie 4.1.1 « **Structure des entités chimiques** » aborde l'étude de la constitution de la matière au niveau microscopique en s'appuyant sur le tableau périodique des éléments, outil essentiel du chimiste, dans l'objectif de développer progressivement les compétences relatives à l'utilisation des informations qu'il contient pour prévoir, dans cette partie, le nombre de liaisons d'un atome et la nature (polaire, ionique) des liaisons chimiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1.1. Structure des entités chimiques</b>	
<b>Modèle de la liaison covalente</b> Liaison covalente localisée ; longueurs et énergies de liaisons.	Citer les ordres de grandeur de longueurs et d'énergies de liaisons covalentes.
Schéma de Lewis d'une molécule ou d'un ion monoatomique ou d'un ion polyatomique pour les éléments des blocs s et p.	Déterminer, pour les éléments des blocs s et p, le nombre d'électrons de valence d'un atome à partir de la position de l'élément dans le tableau périodique. Établir un schéma de Lewis pertinent pour une molécule ou un ion. Identifier les écarts à la règle de l'octet.
<b>Géométrie et polarité des entités chimiques</b> Électronégativité : liaison polarisée, moment dipolaire, molécule polaire.	Associer qualitativement la géométrie d'une entité à une minimisation de son énergie. Comparer les électronégativités de deux atomes à partir de données ou de leurs positions dans le tableau périodique. Prévoir la polarisation d'une liaison à partir des électronégativités comparées des deux atomes mis en jeu. Relier l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent à la structure géométrique donnée d'une molécule. Déterminer direction et sens du vecteur moment dipolaire d'une liaison ou d'une molécule de géométrie donnée.

La partie 4.1.2. « **Relations entre la structure des entités et les propriétés physiques macroscopiques** » a pour objectif l'identification d'interactions entre entités moléculaires ou ioniques afin d'interpréter, de prévoir ou de comparer certaines propriétés physiques : température de changement d'état, miscibilité, solubilité. De nombreuses illustrations et applications dans la vie courante, au niveau du laboratoire ou dans le domaine du vivant peuvent être proposées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1.2. Relations entre la structure des entités et les propriétés physiques macroscopiques</b>	
<b>Interaction entre entités</b> Interactions de van der Waals. Liaison hydrogène ou interaction par pont hydrogène.	Citer les ordres de grandeur énergétiques des interactions de van der Waals et des interactions par pont hydrogène.

	Interpréter l'évolution des valeurs de températures de changement d'état de différents corps purs moléculaires à l'aide de l'existence d'interactions de van der Waals ou par pont hydrogène.
<b>Solubilité ; miscibilité.</b> Grandeurs caractéristiques et propriétés de solvants moléculaires : moment dipolaire, permittivité relative, caractère protogène. Mise en solution d'une espèce chimique moléculaire ou ionique. Solubilité.	Associer une propriété d'un solvant moléculaire à une ou des grandeurs caractéristiques. Interpréter la miscibilité ou la non-miscibilité de deux solvants. Interpréter la solubilité d'une espèce chimique moléculaire ou ionique dans un solvant donné.

#### 4.2. Transformations de la matière

L'objectif de cette partie est d'amener les étudiants à mobiliser de manière autonome les notions et modèles pour décrire, au niveau macroscopique, un système physico-chimique et son évolution. Il convient que les problématiques abordées, les illustrations et les applications prennent largement appui sur des transformations chimiques rencontrées dans la vie courante, au laboratoire, en milieu industriel ou dans le monde du vivant.

Les concepts développés dans la partie **4.2.1. « Description d'un système et de son évolution vers un état final »** permettent l'étude quantitative de l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique, à partir d'une modélisation par une seule réaction chimique symbolisée par une équation de réaction à laquelle est associée une constante thermodynamique d'équilibre. Il s'agit de prévoir le sens d'évolution de systèmes homogènes ou hétérogènes et de déterminer leur composition dans l'état final. Ces études porteront notamment sur les transformations chimiques en solutions aqueuses, notamment sur des transformations modélisées par des réactions acido-basiques et d'oxydo-réduction qui interviennent dans un nombre considérable de développements technologiques et d'analyses environnementales (traitement des eaux, méthodes d'analyse, générateurs électrochimiques, lutte contre la corrosion, etc.). Il est important de noter qu'on évitera tout calcul inutile de concentration, en privilégiant l'utilisation des diagrammes pour valider le choix de la réaction mise en jeu. Aucune formule de calcul de pH n'est exigible. La relation de Nernst ainsi que la relation entre la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction et les potentiels standard permettent de prévoir l'évolution des systèmes et le caractère favorisé des transformations.

Les choix pédagogiques relatifs au contenu des séances de travail expérimental permettront de contextualiser ces enseignements. Les dosages par étalonnage et les titrages sont étudiés exclusivement en travaux pratiques. Ces séances de travail expérimental constituent une nouvelle occasion d'aborder la problématique mesures et incertitudes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2.1. Description d'un système et de son évolution vers un état final lors d'une transformation chimique</b>	
<b>Transformation chimique d'un système</b> Espèces physico-chimiques.	Recenser les espèces physico-chimiques présentes dans un système chimique.
Équation de réaction ; constante thermodynamique d'équilibre.	Écrire l'équation de la réaction (ou des réactions) qui modélise(nt) une transformation chimique donnée.

<p>Évolution d'un système lors d'une transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique : avancement, activité, quotient réactionnel, critère d'évolution.</p>	<p>Décrire qualitativement et quantitativement un système chimique dans l'état initial ou dans un état d'avancement quelconque. Exprimer l'activité d'une espèce chimique pure ou dans un mélange dans le cas de solutions aqueuses très diluées. Exprimer le quotient réactionnel. Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique.</p>
<p>Composition chimique du système dans l'état final : état d'équilibre chimique, transformation totale.</p>	<p>Identifier un état d'équilibre chimique. Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p><b>Réaliser une solution de concentration donnée en soluté apporté à partir d'un solide, d'un liquide ou d'une solution de composition connue.</b></p> <p><b>Déterminer une constante d'équilibre.</b></p>
<p>Conductance, conductivité ; loi de Kohlrausch.</p>	<p><b>Mesurer une conductance et tracer une courbe d'étalonnage pour déterminer une concentration</b></p>
<p><b>Acides et bases, réactions acide-base</b> Transformation modélisée par une réaction acide-base, pH. Couples acide-base, constante d'acidité ; acides et bases fort(e)s ou faibles ; diagramme de prédominance et courbes de distribution.</p>	<p>Identifier le caractère acido-basique d'une réaction. Écrire l'équation d'une réaction acide-base et déterminer la valeur de sa constante thermodynamique d'équilibre à partir des pKa des couples acide-base mis en jeu. Associer le caractère fort d'un acide (d'une base) à la transformation quasi-totale de cet acide (cette base) avec l'eau. Utiliser un diagramme de prédominance pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires. Retrouver les valeurs de constantes d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance (et réciproquement).</p> <p><b>Mettre en œuvre les suivis pH-métrique et conductimétrique d'un titrage ayant pour support une réaction acide-base.</b></p>
<p><b>Oxydants et réducteurs, réactions d'oxydo-réduction</b> Transformation modélisée par une réaction d'oxydo-réduction. Couple oxydant-réducteur. Nombre d'oxydation.</p>	<p>Identifier une réaction d'oxydo-réduction. Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple.</p>

Pile, tension à vide, potentiel d'électrode, potentiel standard, formule de Nernst, électrode standard à hydrogène.	Décrire le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode.  <b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement.</b>
Aspect thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction.	Écrire l'équation d'une réaction d'oxydoréduction. Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples.  <b>Mettre en œuvre une réaction d'oxydo-réduction pour réaliser une analyse quantitative en solution aqueuse.</b>

La partie **4.2.2. « Évolution temporelle d'un système chimique »** permet de dégager expérimentalement les facteurs cinétiques, concentration et température. Cette mise en évidence est prolongée par les premières modélisations macroscopiques d'évolution des concentrations avec des lois de vitesse d'ordre simple et d'influence de la température avec la loi d'Arrhenius. Les déterminations d'ordre mettent en œuvre la méthode différentielle ou intégrale, et peuvent s'effectuer à l'aide de logiciels dédiés ou de programmes élaborés en langage de programmation, pour l'exploitation des mesures expérimentales dans le cadre d'un réacteur fermé.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2.2. Évolution temporelle d'un système chimique</b>	
<b>Cinétique en réacteur fermé de composition uniforme</b> Transformations lentes et rapides. Facteurs cinétiques : concentrations des réactifs, température Vitesses de consommation d'un réactif et de formation d'un produit. Vitesse de réaction pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique supposée sans accumulation d'intermédiaires. Lois de vitesse : réactions sans ordre, réactions avec ordre simple (0, 1, 2).	<b>Établir une loi de vitesse de formation d'un produit ou de consommation d'un réactif à partir du suivi temporel d'une grandeur physique.</b>
Loi d'Arrhenius ; énergie d'activation.	<b>Déterminer l'énergie d'activation d'une réaction chimique.</b>

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Prévention des risques au laboratoire</b>	Adopter une attitude responsable et adaptée au travail en laboratoire. Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.
- <b>Risque chimique</b> Règles de sécurité au laboratoire. Classes et catégories de danger. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Mentions de danger (H) et conseils de prudence (P). Fiches de sécurité.	Relever les indications sur le risque associé au prélèvement, au mélange et au stockage des produits chimiques et adopter une attitude responsable lors de leur utilisation.
- <b>Risque électrique</b>	Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
- <b>Risque optique</b>	Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.
- <b>Risques liés à la pression et à la température</b>	Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.
<b>2. Prévention de l'impact environnemental</b> Traitement et rejet des espèces chimiques.	Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

## Contenus thématiques

Les contenus de la formation sont organisés autour de sept thèmes.

### 1. Mécanique

- 1.1. Référentiels non galiléens
- 1.2. Lois du frottement solide

### 2. Éléments de traitement du signal

- 2.1. Signaux périodiques
- 2.2. Électronique numérique
- 2.3. Portes logiques
- 2.4. Logique séquentielle et stabilité

**3. Optique**

- 3.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses
- 3.2. Superposition d'ondes lumineuses
- 3.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young
- 3.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue

**4. Électromagnétisme**

- 4.1. Électrostatique
- 4.2. Magnétostatique
- 4.3. Équations de Maxwell
- 4.4. Énergie du champ électromagnétique
- 4.5. Propagation et rayonnement

**5. Thermodynamique : transferts thermiques****6. Physique quantique**

- 6.1. Fonction d'onde et équation de Schrödinger
- 6.2. Particule libre
- 6.3. États stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux
- 6.4. États non stationnaires d'une particule dans un puits de potentiel infini

**7. Transformation de la matière**

- 7.1 Transformations chimiques d'un système
- 7.2 Acides et bases, réactions acide-base
- 7.3 Oxydants et réducteurs, réactions d'oxydo-réduction

**1. Mécanique**

Le programme de mécanique de MPI vise à compléter les acquis de mécanique de la classe de MP1I, option sciences informatiques. Il est structuré en deux sous-parties : la première est consacrée aux changements de référentiels, la seconde aux conséquences mécaniques des actions de frottements entre solides.

La partie « **Référentiels non galiléens** » est organisée autour de deux situations : la translation et la rotation uniforme autour d'un axe fixe. L'accent est mis sur la compréhension qualitative des effets observés, l'évaluation des ordres de grandeurs et les conséquences expérimentales.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Référentiels non galiléens</b>	
Mouvement d'un référentiel par rapport à un autre dans les cas du mouvement de translation et du mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe.	Identifier et caractériser un mouvement de translation et un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe d'un référentiel par rapport à un autre.
Vecteur rotation d'un référentiel par rapport à un autre.	Exprimer le vecteur rotation d'un référentiel par rapport à un autre.

Composition des vitesses et des accélérations dans le cas d'une translation, et dans le cas d'une rotation uniforme autour d'un axe fixe : vitesse d'entraînement, accélérations d'entraînement et de Coriolis.	Relier les dérivées d'un vecteur dans des référentiels différents par la relation de la dérivation composée. Citer et utiliser les expressions de la vitesse d'entraînement et des accélérations d'entraînement et de Coriolis.
Dynamique du point en référentiel non galiléen dans le cas où le référentiel entraîné est en translation, ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen. Forces d'inertie.	Exprimer les forces d'inerties, dans les seuls cas où le référentiel entraîné est en translation, ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen. Décrire et interpréter les effets des forces d'inertie dans des cas concrets : sens de la force d'inertie d'entraînement dans un mouvement de translation ; caractère centrifuge de la force d'inertie d'entraînement dans le cas où le référentiel est en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen. Utiliser les lois de la dynamique en référentiel non galiléen dans les seuls cas où le référentiel entraîné est en translation, ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen.
Caractère galiléen approché d'un référentiel. Exemple du référentiel de Copernic, du référentiel géocentrique et du référentiel terrestre.	Citer quelques manifestations du caractère non galiléen du référentiel terrestre. Estimer, en ordre de grandeur, la contribution de la force d'inertie de Coriolis dans un problème de dynamique terrestre.

La partie « **Lois du frottement solide** », est limitée au seul cas de la translation ; elle permet de mettre en œuvre un mode de raisonnement spécifique et particulièrement formateur, sans pour autant omettre les conséquences expérimentales

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Lois du frottement solide</b>	
Contact entre deux solides. Aspects microscopiques. Lois de Coulomb du frottement de glissement dans le seul cas d'un solide en translation. Aspect énergétique.	Utiliser les lois de Coulomb dans les trois situations : équilibre, mise en mouvement, freinage. Formuler une hypothèse (quant au glissement ou non) et la valider. Effectuer un bilan énergétique.  <b>Effectuer une mesure d'un coefficient de frottement.</b>  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler une situation mécanique dans laquelle intervient au moins un changement de mode de glissement.

## 2. Éléments de traitement du signal

Ce thème du programme, décomposé en quatre parties, complète l'étude des circuits électriques linéaires menée dans la partie « **Ondes et signaux** » du programme de MPII, option sciences informatiques. Les capacités exigibles ont vocation à être principalement développées au cours de séances de travaux pratiques.

Dans la première partie intitulée « **Signaux périodiques** », l'accent est mis sur l'action d'un filtre linéaire sur un signal périodique, l'objectif étant de comprendre le rôle central de la linéarité des systèmes pour interpréter la forme du signal de sortie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1. Signaux périodiques</b>	
Signaux périodiques.	Commenter le spectre d'un signal périodique : selon leur rang, attribuer aux différents harmoniques le rôle qu'elles jouent dans la forme du signal analysé.
Action d'un filtre linéaire du premier ou du second ordre sur un signal périodique.	Prévoir l'effet d'un filtrage linéaire sur la composition spectrale d'un signal périodique. Expliciter les conditions pour obtenir un comportement intégrateur ou dérivateur.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'action d'un filtre sur un signal périodique.</b>

La partie « **Électronique numérique** » est à vocation uniquement expérimentale ; elle constitue une initiation au traitement numérique des signaux à travers les points suivants : l'échantillonnage et le repliement de spectre, la conversion analogique/numérique et le filtrage numérique. Le phénomène de repliement de spectre est présenté qualitativement au moyen d'illustrations démonstratives, l'objectif étant de mettre en place la condition de Nyquist-Shannon afin de réaliser convenablement une acquisition numérique. Un filtrage numérique, du type passe-bas, est réalisé à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique et d'un traitement numérique, un convertisseur numérique/analogique restitue ensuite un signal de sortie analogique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Électronique numérique</b>	
Échantillonnage : fréquence d'échantillonnage. Conséquences expérimentales du théorème de Nyquist-Shannon.	<b>Réaliser l'échantillonnage d'un signal. Choisir la fréquence d'échantillonnage afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon.</b> <b>Commenter la structure du spectre du signal obtenu après échantillonnage.</b> <b>Mettre en évidence le phénomène de repliement de spectre au moyen d'un oscilloscope numérique ou d'un logiciel de calcul numérique.</b>  <u>Capacité numérique</u> : calculer, à l'aide d'un langage de programmation, la transformée de Fourier discrète d'un signal numérique.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Physique-chimie MPI



Filtrage numérique.	<p><b>Mettre en œuvre un convertisseur analogique/numérique et un traitement numérique afin de réaliser un filtre passe-bas ; utiliser un convertisseur numérique/analogique pour restituer un signal analogique.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler un filtrage numérique et visualiser son action sur un signal périodique.</p>
---------------------	---

Les deux dernières parties intitulées « **Portes logiques** » et « **Logique séquentielle et stabilité** » visent à étudier les composants fondamentaux des circuits logiques ainsi que quelques propriétés de tels circuits permettant la réalisation de dispositifs fréquemment mis en œuvre dans les matériels informatiques.

On se limite à des systèmes comportant un nombre raisonnable de composants. La connaissance des circuits électroniques constituant les portes et bascules est hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.3 Portes logiques</b>	
Interrupteurs commandés par une tension. Porte logique NOT. Portes logiques AND, OR, NAND, NOR à deux ou plusieurs entrées. Porte logique XOR.	Déterminer la table de vérité d'une association d'interrupteurs commandés par une tension. Identifier par sa table de vérité la porte logique réalisée par une association d'interrupteurs commandés par une tension.

<b>2.4 Logique séquentielle et stabilité</b>	
États stables. Circuits astable, monostable, bistable.	Déterminer les états stables d'un circuit contenant des portes logiques, avec rétroaction.  <b>Réaliser un oscillateur à l'aide d'un circuit astable à portes logiques.</b> <b>Réaliser un convertisseur fréquence tension utilisant un circuit monostable à porte logique.</b>
Bascule RS à portes NAND ou NOR.	Décrire le fonctionnement d'une bascule RS dont le schéma est fourni. Expliquer comment réaliser une mémoire à l'aide d'un circuit bistable.
Chronogramme.	Déterminer le chronogramme des grandeurs électriques pertinentes d'un circuit comportant des portes logiques.

### 3. Optique

Le programme d'optique de la filière MPI s'inscrit dans le prolongement du thème « **Ondes et signaux** » du programme de MP11, option sciences informatiques. Il s'agit pour les étudiants d'approfondir l'étude des phénomènes d'interférences lumineuses, dans le cadre du modèle ondulatoire de la lumière. L'approche reste centrée sur l'expérience, mais la modélisation doit permettre d'analyser de façon raisonnée les conditions optimales d'observation d'interférences lumineuses, et leur exploitation quantitative. L'enseignant ne manquera pas de rappeler que ces phénomènes, étudiés ici dans le cadre de l'optique, sont généralisables à tout comportement ondulatoire.

La partie « **Modèle scalaire des ondes lumineuses** » introduit les outils nécessaires pour décrire les phénomènes d'interférences. Le programme utilise le mot « intensité » pour décrire la grandeur détectée mais on peut utiliser indifféremment les mots « intensité » ou « éclaircissement » sans chercher à les distinguer à ce niveau. L'intensité lumineuse est introduite comme une puissance par unité de surface. Le théorème de Malus (orthogonalité des rayons de lumière et des surfaces d'ondes) est admis.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses</b>	
Modèle de propagation dans l'approximation de l'optique géométrique.	Utiliser une grandeur scalaire pour décrire un signal lumineux.
Chemin optique. Déphasage dû à la propagation. Surfaces d'ondes. Théorème de Malus (admis). Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	Exprimer le retard de phase en un point (par rapport à un autre) en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique. Associer une description de la formation des images en termes de rayon lumineux et en termes de surfaces d'onde. Utiliser la propriété énonçant que le chemin optique séparant deux points conjugués est indépendant du rayon lumineux choisi.
Modèle d'émission. Relation (admise) entre le temps de cohérence et la largeur spectrale.	Citer l'ordre de grandeur du temps de cohérence $\Delta t$ de quelques radiations visibles. Utiliser la relation $\Delta f \cdot \Delta t \sim 1$ pour relier le temps de cohérence à la largeur spectrale $\Delta \lambda$ de la radiation.
Récepteurs. Intensité de la lumière.	Relier l'intensité à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique. Citer l'ordre de grandeur du temps de réponse de quelques récepteurs de lumière.  <b>Mettre en œuvre des expériences utilisant un capteur photographique numérique.</b>

Dans la partie « **Superposition d'ondes lumineuses** », la formule de Fresnel, admise en classe de première année, est démontrée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Superposition d'ondes lumineuses</b>	
Superposition de deux ondes incohérentes entre elles.	Justifier et utiliser l'additivité des intensités.

Superposition de deux ondes monochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel. Facteur de contraste.	Citer les principales conditions pour que le phénomène d'interférences apparaisse (ondes quasi synchrones, déphasage constant dans le temps ou très lentement variable). Établir et utiliser la formule de Fresnel. Associer un bon contraste à des ondes d'intensités voisines.
---	--

Dans la partie « **Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young** », les trous d'Young permettent de confronter théorie et expérience. Les fentes d'Young peuvent être abordées mais de manière exclusivement expérimentale. Aucune connaissance sur un autre diviseur du front d'onde n'est exigible.

<b>3.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young</b>	
Trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source ponctuelle à distance finie et observation à grande distance. Champ d'interférences. Ordre d'interférences.	Définir, exprimer et utiliser l'interfrange et l'ordre d'interférences. Justifier que les franges ne sont pas localisées.
Variations de l'ordre d'interférences avec la position du point d'observation ; franges d'interférences.	Interpréter la forme des franges observées.
Variations de l'ordre d'interférences avec la position d'un point source. Perte de contraste par élargissement angulaire de la source.	Utiliser un critère de brouillage des franges portant sur l'ordre d'interférence.
Variations de l'ordre d'interférence avec la longueur d'onde. Perte de contraste par élargissement spectral de la source.	Utiliser un critère de brouillage des franges portant sur l'ordre d'interférence.

Dans la partie « **Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue** », l'étude de l'interféromètre de Michelson en lame d'air permet de confronter théorie et expérience. L'étude de l'interféromètre de Michelson en coin d'air est abordée de manière exclusivement expérimentale. Pour la modélisation d'un interféromètre de Michelson, on suppose la séparatrice infiniment mince.

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<b>3.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue</b>	
Interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (admise) des franges.	Citer les conditions d'éclairage et d'observation en lame d'air et en coin d'air.

Lame d'air : franges d'égale inclinaison.	Établir et utiliser l'expression de la différence de marche en fonction de l'épaisseur de la lame d'air équivalente et de l'angle d'incidence des rayons.  <b>Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue à l'aide d'un protocole proposé.</b> <b>Mettre en œuvre un protocole pour accéder au profil spectral d'une raie ou d'un doublet à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</b>
Coin d'air : franges d'égale épaisseur.	Utiliser l'expression admise de la différence de marche en fonction de l'épaisseur.  <b>Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</b>

#### 4. Électromagnétisme

Le programme d'électromagnétisme de la filière MPI s'inscrit dans le prolongement du thème « Ondes et signaux » du programme de MPII, option systèmes informatiques. Il s'agit pour les étudiants de découvrir les lois locales et intégrales qui gouvernent les champs électrique et magnétique et les phénomènes que ces lois permettent de modéliser, notamment dans le domaine des ondes électromagnétiques.

L'étude des champs électrostatique et magnétostatique est présentée en deux parties distinctes ; l'enseignant est libre, s'il le souhaite, de procéder à une présentation unifiée de la notion de champ statique. Pour les calculs de champs, l'accent est mis sur les situations à haut degré de symétrie qui permettent l'utilisation efficace des propriétés de flux ou de circulation. Les équations locales des champs statiques sont introduites comme cas particuliers des équations de Maxwell.

La loi de Biot et Savart, les notions de potentiel vecteur et d'angle solide ne relèvent pas du programme.

Les relations de passage relatives au champ électromagnétique peuvent être exploitées mais doivent être systématiquement rappelées.

La partie « **Électrostatique** » constitue un approfondissement des lois quantitatives qui régissent le champ électrostatique. Les notions abordées sont donc centrées sur l'essentiel : distributions de charges, champ et potentiel. Pour le champ électrostatique et le potentiel, on se limite aux expressions dans le cas de charges ponctuelles.

L'accent est mis sur les propriétés intégrales du champ et sur le théorème de Gauss pour des situations présentant un haut degré de symétrie ; ce dernier est admis.

Des capacités sur la lecture des lignes de champ et des surfaces équipotentielles sont développées.

Le condensateur plan est introduit mais l'étude des conducteurs en équilibre électrostatique ne relève pas du programme.

Une approche énergétique est conduite dans un cas simple : une charge ponctuelle placée dans un champ électrostatique extérieur.

Le dipôle est traité, l'accent est mis sur les effets qualitatifs.

Les analogies avec la gravitation sont centrées sur l'application du théorème de Gauss.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Physique-chimie MPI

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1. Électrostatique</b>	
Loi de Coulomb. Champ électrostatique. Champ électrostatique créé par un ensemble de charges ponctuelles. Principe de superposition.	Exprimer le champ électrostatique créé par une distribution discrète de charges. Citer quelques ordres de grandeur de champs électrostatiques.
Distributions continues de charges : volumique, surfacique, linéique.	Choisir un type de distribution continue adaptée à la situation modélisée. Relier les densités de charges de deux types de distributions modélisant une même situation. Déterminer la charge totale d'une distribution continue dans des situations simples.
Symétries et invariances du champ électrostatique.	Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de charges. Identifier les invariances d'une distribution de charges. Exploiter les symétries et les invariances d'une distribution de charges pour caractériser le champ électrostatique créé.
Circulation du champ électrostatique. Potentiel électrostatique. Opérateur gradient.	Relier le champ électrostatique au potentiel. Exprimer le potentiel créé par une distribution discrète de charges. Citer l'expression de l'opérateur gradient en coordonnées cartésiennes. Déterminer un champ électrostatique à partir du potentiel, l'expression de l'opérateur gradient étant fournie dans le cas des coordonnées sphériques et cylindriques. Déterminer une différence de potentiel par circulation du champ électrostatique dans des cas simples.
Flux du champ électrostatique. Théorème de Gauss.	Reconnaître les situations pour lesquelles le champ électrostatique peut être calculé à l'aide du théorème de Gauss.
Systèmes modélisés par une sphère, un cylindre infini ou un plan infini.	Établir les expressions des champs électrostatiques créés en tout point de l'espace par une sphère uniformément chargée en volume, par un cylindre infini uniformément chargé en volume et par un plan infini uniformément chargé en surface. Établir et énoncer qu'à l'extérieur d'une distribution à symétrie sphérique, le champ électrostatique créé est le même que celui d'une charge ponctuelle concentrant la charge totale et placée au centre de la distribution. Utiliser le théorème de Gauss pour déterminer le champ électrostatique créé par une distribution présentant un haut degré de symétrie.

Étude du condensateur plan modélisé comme la superposition de deux distributions surfaciques, de charges opposées.	Établir et citer l'expression de la capacité d'un condensateur plan dans le vide.
Lignes de champ, tubes de champ, surfaces équipotentielles.	Orienter les lignes de champ électrostatique créées par une distribution de charges. Représenter les surfaces équipotentielles connaissant les lignes de champ et inversement. Associer les variations de l'intensité du champ électrostatique à la position relative des lignes de champ. Vérifier qu'une carte de lignes de champ est compatible avec les symétries et les invariances d'une distribution.
Énergie potentielle électrostatique d'une charge placée dans un champ électrostatique extérieur.	Établir et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrostatique extérieur.
Notion de dipôle électrostatique, moment dipolaire.	Exprimer le moment dipolaire d'un doublet de charges. Évaluer des ordres de grandeur dans le domaine microscopique.
Champ et potentiel créés par un dipôle électrostatique.	Expliciter l'approximation dipolaire. Représenter l'allure des lignes de champ et des surfaces équipotentielles d'un dipôle électrostatique. Établir et exploiter les expressions du champ et du potentiel créés par un doublet de charges dans l'approximation dipolaire.
Dipôle électrostatique placé dans un champ électrostatique extérieur : actions subies et énergie potentielle d'interaction.	Expliquer qualitativement le comportement d'un dipôle placé dans un champ électrostatique extérieur. Établir et exploiter les expressions des actions mécaniques subies par un doublet de charges dans un champ électrostatique extérieur uniforme. Exploiter l'expression fournie de la force subie par un dipôle placé dans un champ électrostatique extérieur non uniforme. Citer et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'interaction.
Analogies avec la gravitation.	Utiliser le théorème de Gauss de la gravitation.

La partie « **Magnétostatique** » s'appuie sur les différents aspects qualitatifs et quantitatifs vus en première année de la classe de MPII option sciences informatiques. Les étudiants sont déjà familiarisés avec le concept de champ magnétostatique lors de l'étude des phénomènes d'induction. Il s'agit ici de préciser les propriétés de ce champ, avec l'analyse des symétries et des invariances de la distribution, ainsi qu'avec l'utilisation du théorème d'Ampère pour la détermination d'un champ magnétique.

La loi de Biot et Savart n'est pas introduite ; l'utilisation de celle-ci pour calculer un champ magnétostatique est donc exclue.

Les distributions de courants surfaciques ne sont pas introduites à ce niveau du programme, elles le sont uniquement à l'occasion de la réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Physique-chimie MPI

Les propriétés des dipôles magnétiques, sont précisées, notamment en ce qui concerne le champ magnétostatique créé et les actions subies lorsque le dipôle magnétique est placé dans un champ magnétostatique extérieur. On peut, sur ce thème, souligner les analogies avec l'électrostatique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2. Magnétostatique</b>	
Courant électrique. Vecteur densité de courant volumique. Distributions de courant électrique filiformes.	Déterminer l'intensité du courant électrique traversant une surface orientée.
Symétries et invariances du champ magnétostatique.	Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de courants. Identifier les invariances d'une distribution de courants. Exploiter les symétries et les invariances d'une distribution de courants pour caractériser le champ magnétostatique créé.
Propriétés de flux et de circulation. Théorème d'Ampère.	Identifier les situations pour lesquelles le champ magnétostatique peut être calculé à l'aide du théorème d'Ampère. Citer quelques ordres de grandeur de champs magnétostatiques.
Applications au fil rectiligne « infini » de section non nulle et au solénoïde « infini ».	Établir les expressions des champs magnétostatiques créés en tout point de l'espace par un fil rectiligne infini de section non nulle, parcouru par des courants uniformément répartis en volume, par un solénoïde infini en admettant que le champ est nul à l'extérieur. Utiliser le théorème d'Ampère pour déterminer le champ magnétostatique créé par une distribution présentant un haut degré de symétrie.
Lignes de champ, tubes de champ.	Orienter les lignes de champ magnétostatique créées par une distribution de courants. Associer les variations de l'intensité du champ magnétostatique à la position relative des lignes de champ. Vérifier qu'une carte de lignes de champ est compatible avec les symétries et les invariances d'une distribution.
Notion de dipôle magnétique. Moment magnétique.	Exprimer le moment magnétique d'une boucle de courant plane. Évaluer des ordres de grandeur dans les domaines macroscopique et microscopique.
Champ créé par un dipôle magnétique.	Expliciter l'approximation dipolaire. Représenter l'allure des lignes de champ d'un dipôle magnétique. Exploiter l'expression fournie du champ créé par un dipôle magnétique.

Dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique extérieur : actions subies et énergie potentielle d'interaction.	<p>Expliquer qualitativement le comportement d'un dipôle passif placé dans un champ magnétostatique extérieur.</p> <p>Exploiter les expressions fournies des actions mécaniques subies par un dipôle magnétique dans un champ magnétostatique extérieur uniforme.</p> <p>Exploiter l'expression fournie de la force subie par un dipôle magnétique dans un champ magnétostatique extérieur non uniforme.</p> <p>Citer et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'interaction.</p>
--	---

Dans la partie « **Équations de Maxwell** » une vision unifiée des lois de l'électromagnétisme est présentée. Elle conduit à une première approche quantitative du phénomène de propagation et permet également de revenir sur les lois de l'induction étudiées en classe de MP11, option sciences informatiques.

Les lois locales de l'électrostatique relatives au potentiel constituent un support pertinent pour procéder à une approche numérique de la résolution d'une équation aux dérivées partielles.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.3. Équations de Maxwell</b>	
Principe de la conservation de la charge : formulation locale.	Établir l'équation locale de la conservation de la charge en coordonnées cartésiennes dans le cas à une dimension.
Équations de Maxwell : formulations locale et intégrale.	<p>Associer l'équation de Maxwell-Faraday à la loi de Faraday.</p> <p>Citer, utiliser et interpréter les équations de Maxwell sous forme intégrale.</p> <p>Associer qualitativement le couplage spatio-temporel entre champ électrique et champ magnétique au phénomène de propagation.</p> <p>Vérifier la cohérence des équations de Maxwell avec l'équation locale de la conservation de la charge.</p>
Équations de propagation des champs dans une région vide de charges et de courants.	Établir les équations de propagation à partir des équations de Maxwell.
Cas des champs statiques : équations locales.	Établir les lois locales des champs statiques à partir des équations de Maxwell.
Équation de Poisson et équation de Laplace de l'électrostatique.	<p>Établir les équations de Poisson et de Laplace de l'électrostatique.</p> <p>Exprimer par analogie les équations de Poisson et de Laplace dans le cas de la gravitation.</p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation résoudre numériquement l'équation de Laplace à une ou deux dimensions, les conditions aux limites étant fixées.</p>

Dans la partie « **Énergie du champ électromagnétique** », aucun modèle relatif à la loi d'Ohm locale n'est exigible ; l'accent est mis sur les échanges d'énergie entre la matière et le champ



électromagnétique, sur l'utilisation du flux du vecteur de Poynting pour évaluer une puissance rayonnée à travers une surface et sur les bilans d'énergie et de puissance.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4. Énergie du champ électromagnétique</b>	
Force électromagnétique volumique. Puissance volumique cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge.	Établir et utiliser l'expression de la puissance volumique cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge.
Loi d'Ohm locale ; puissance volumique dissipée par effet Joule.	Analyser les aspects énergétiques dans le cas particulier d'un milieu ohmique.
Énergie électromagnétique volumique. Vecteur de Poynting. Bilan d'énergie.	Citer des ordres de grandeur de flux énergétiques moyens (flux solaire, laser...). Utiliser le flux du vecteur de Poynting à travers une surface orientée pour évaluer la puissance rayonnée. Effectuer un bilan d'énergie sous forme locale et intégrale. Interpréter chaque terme de l'équation locale de Poynting, celle-ci étant fournie.

La partie « **Propagation et rayonnement** » est l'occasion d'illustrer l'efficacité du formalisme local des équations de Maxwell en insistant sur les aspects qualitatifs et sur la variété des applications qui en découlent.

Si le modèle de l'onde plane est présenté dans le cadre de l'espace vide, les études des ondes électromagnétiques dans un plasma ainsi que dans un milieu ohmique permettent d'illustrer l'importance des couplages entre les champs, les charges et les courants. Elles sont également l'occasion d'enrichir les compétences des étudiants sur les phénomènes de propagation en abordant, par exemple, l'effet de peau, le phénomène de dispersion, les notions de vitesse de groupe et de phase, de fréquence de coupure ou encore d'onde évanescente.

La réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait permet d'aborder la notion d'onde stationnaire. L'importance des conditions aux limites imposées sur la quantification des solutions est soulignée. La notion de densité de courant surfacique est introduite mais le calcul de l'intensité à travers un segment ne relève pas du programme.

L'étude du rayonnement dipolaire repose sur l'analyse et l'exploitation des expressions des champs, qui sont admises.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.5. Propagation et rayonnement</b>	
Onde plane dans l'espace vide de charge et de courant ; onde plane progressive et aspects énergétiques.	Citer les solutions de l'équation de d'Alembert à une dimension. Décrire la structure d'une onde plane et d'une onde plane progressive dans l'espace vide de charge et de courant.

Onde plane progressive monochromatique. Relation de dispersion.	Expliquer le caractère idéal du modèle de l'onde plane monochromatique. Déterminer la relation de dispersion. Citer les domaines du spectre des ondes électromagnétiques et leur associer des applications. Exprimer le vecteur de Poynting et l'énergie électromagnétique volumique associés à une onde plane progressive monochromatique. Effectuer une étude énergétique dans le cas d'une onde plane progressive monochromatique.
Onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement ou circulairement.	Reconnaître une onde polarisée rectilignement ou circulairement.  <b>Utiliser des polariseurs et étudier quantitativement la loi de Malus.</b>
Onde plane transverse électrique monochromatique dans un plasma dilué. Conductivité complexe du milieu. Pulsation de coupure. Ondes évanescentes.	Exprimer la conductivité complexe du milieu et établir la relation de dispersion. Décrire le phénomène de dispersion. Relier la fréquence de coupure aux caractéristiques du plasma et citer son ordre de grandeur dans le cas de l'ionosphère. Distinguer qualitativement les ondes évanescentes et les ondes progressives du point de vue du transport de l'énergie.
Vitesse de phase, vitesse de groupe.	Calculer la vitesse de groupe à partir de la relation de dispersion. Citer une interprétation de la vitesse de groupe en s'appuyant sur l'analyse qualitative d'un exemple.
Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu ohmique en régime lentement variable. Effet de peau.	Établir et interpréter l'expression de la longueur caractéristique d'atténuation de l'onde électromagnétique dans un milieu ohmique.
Réflexion sous incidence normale d'une onde plane, progressive et monochromatique polarisée rectilignement sur un plan conducteur parfait. Onde stationnaire.	Établir l'expression de l'onde réfléchie en exploitant les relations de passage fournies. Interpréter qualitativement la présence de courants localisés en surface. Reconnaître et caractériser une onde stationnaire.
Applications aux cavités à une dimension. Mode d'onde stationnaire.	Établir la condition de quantification des solutions.  <b>Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques.</b>
Champ électromagnétique rayonné par un dipôle oscillant dans la zone de rayonnement. Puissance rayonnée.	Justifier l'intérêt du modèle du dipôle oscillant et citer des exemples dans différents domaines. Formuler et commenter les approximations reliant les trois échelles de longueur pertinentes. Analyser la structure du champ électromagnétique rayonné, les expressions des champs étant fournies, en utilisant des arguments généraux : symétrie, conservation de l'énergie et

	analyse dimensionnelle. Effectuer un bilan énergétique, les expressions des champs étant fournies. Représenter l'indicatrice de rayonnement.  <b>Détecter une onde électromagnétique rayonnée.</b>
--	---

## 5. Thermodynamique : transferts thermiques

Le programme de thermodynamique de la classe de MPI est consacré à l'étude des transferts thermiques.

Dans le cas de la diffusion thermique, la mise en équation est limitée au cas des solides ; on peut utiliser les résultats ainsi établis dans d'autres situations, notamment dans des fluides, en affirmant la généralisation des équations obtenues dans les solides. Les mises en équations locales sont faites exclusivement sur des géométries où une seule variable d'espace intervient. On admet ensuite les formes générales des équations en utilisant les opérateurs d'analyse vectorielle. Enfin, aucune connaissance spécifique sur les solutions d'une équation de diffusion ne figure au programme.

La loi de Newton à l'interface entre un solide et un fluide est introduite.

Les transferts thermiques par rayonnement sont abordés sans formalisme excessif, la loi de Planck n'étant pas exigible. L'effet de serre est étudié quantitativement dans un modèle simple à une couche, dont les limites peuvent être soulignées quand il est appliqué à l'atmosphère terrestre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Conduction, convection et rayonnement.	Reconnaître un mode de transfert thermique.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.</b>
Flux thermique. Vecteur densité de flux thermique.	Calculer un flux thermique à travers une surface orientée et interpréter son signe.
Premier principe de la thermodynamique.	Effectuer un bilan local d'énergie interne pour un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique.
Loi de Fourier.	Interpréter et utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, verre, acier.  <b>Mesurer la conductivité thermique d'un matériau.</b>

Équation de la diffusion thermique.	<p>Établir l'équation de la diffusion thermique sans terme de source au sein d'un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique. Utiliser une généralisation de l'équation de la diffusion en présence d'un terme de source. Utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur Laplacien et son expression fournie. Analyser une équation de diffusion thermique en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.</p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion thermique à une dimension par une méthode des différences finies dérivée de la méthode d'Euler explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.</p>
Régime stationnaire. Résistance thermique.	<p>Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique. Déterminer l'expression de la résistance thermique d'un solide dans le cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Exploiter les lois d'association de résistances thermiques.</p>
Coefficient de transfert thermique de surface, loi de Newton.	Utiliser la loi de Newton comme condition aux limites à une interface solide-fluide.
Approche descriptive du rayonnement thermique dans le cas d'un corps noir. Loi de Wien. Loi de Stefan. Effet de serre.	<p>Exploiter les expressions fournies des lois de Wien et de Stefan. Analyser quantitativement l'effet de serre en s'appuyant sur un bilan énergétique sur un modèle à une couche.</p>

## 6. Physique quantique

Cette partie s'inscrit dans le prolongement de l'introduction à la physique quantique traitée en classe de MP11, option sciences informatiques. Il s'agit cependant de dépasser l'approche descriptive et qualitative et de donner aux étudiants leurs premiers outils quantitatifs d'analyse. Le cœur de cet enseignement est construit sur la mécanique ondulatoire de Schrödinger et propose des résolutions d'exemples simples mais fondamentaux pour la bonne compréhension de problèmes plus complexes : particule dans une marche de potentiel et effet tunnel, particule dans un puits de potentiel infini et quantification de l'énergie d'une particule confinée. L'accent doit être mis sur l'interprétation et l'exploitation des résultats et non pas sur les calculs, non exigibles pour l'exemple plus délicat de la barrière de potentiel. Le professeur peut au contraire, s'il le souhaite, proposer des analyses de graphes, des exploitations de formules analytiques fournies, des estimations numériques, des simulations... afin d'aborder des modélisations plus réalistes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.1. Fonction d'onde et équation de Schrödinger</b>	
Fonction d'onde $\psi$ d'une particule sans spin et densité de probabilité de présence.	Interpréter en termes de probabilité l'amplitude d'une onde associée à une particule.
Équation de Schrödinger à une dimension dans un potentiel $V(x)$ .	Utiliser le caractère linéaire de l'équation (principe de superposition).
États stationnaires de l'équation de Schrödinger.	Procéder à la séparation des variables temps et espace. Distinguer l'onde associée à un état stationnaire en mécanique quantique d'une onde stationnaire au sens usuel de la physique des ondes. Relier l'énergie de la particule à l'évolution temporelle de sa fonction d'onde et faire le lien avec la relation de Planck-Einstein. Identifier le terme associé à l'énergie cinétique.
<b>6.2. Particule libre</b>	
Fonction d'onde d'une particule libre non localisée.	Établir les solutions. Interpréter la difficulté de normalisation de cette fonction d'onde.
Relation de de Broglie.	Relier l'énergie de la particule et le vecteur d'onde de l'onde plane associée.
Inégalité d'Heisenberg spatiale et paquet d'ondes.	Expliquer, en s'appuyant sur l'inégalité d'Heisenberg spatiale, que la localisation de la particule peut s'obtenir par superposition d'ondes planes.
<b>6.3. États stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux</b>	
États stationnaires d'une particule dans le cas d'une marche de potentiel.	Citer des exemples physiques illustrant cette problématique. Exploiter les conditions de continuité (admisses) relatives à la fonction d'onde. Établir la solution dans le cas d'une particule incidente sur une marche de potentiel. Expliquer les différences de comportement par rapport à une particule classique Identifier une onde évanescente et la caractériser.
Barrière de potentiel et effet tunnel.	Décrire qualitativement influence de la hauteur et de la largeur de la barrière de potentiel sur l'effet tunnel. Citer des applications.
États stationnaires d'une particule dans un puits de potentiel infini.	Établir les solutions et les niveaux d'énergie de la particule confinée. Identifier des analogies avec d'autres domaines de la physique.
Énergie de confinement.	Estimer l'énergie d'une particule confinée dans son état fondamental pour un puits non rectangulaire. Associer l'analyse à l'inégalité d'Heisenberg.

**6.4. États non stationnaires d'une particule dans un puits de potentiel infini**

Combinaison linéaire d'états stationnaires.

Expliquer qu'une superposition de deux états stationnaires engendre une évolution au cours du temps de l'état de la particule.

Établir l'expression de la densité de probabilité de présence de la particule dans le cas d'une superposition de deux états stationnaires ; interpréter le résultat.

**7. Transformation de la matière**

L'objectif de cette partie est d'amener les étudiants à mobiliser de manière autonome les notions et modèles pour décrire, au niveau macroscopique, un système physico-chimique et son évolution. Il convient que les problématiques abordées, les illustrations et les applications prennent largement appui sur des transformations chimiques rencontrées dans la vie quotidienne, au laboratoire, en milieu industriel ou dans le monde du vivant.

Les concepts développés permettent l'étude quantitative de l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique, à partir d'une modélisation par une seule réaction chimique. Cette réaction est décrite de manière symbolique par une équation de réaction à laquelle est associée une constante thermodynamique d'équilibre. Il s'agit de prévoir le sens d'évolution de systèmes homogènes ou hétérogènes et de déterminer leur composition dans l'état final.

Ces études portent plus spécifiquement sur les transformations chimiques en solution aqueuse notamment sur des transformations modélisées par des réactions acide-base et d'oxydo-réduction. Ces dernières interviennent dans de nombreux développements technologiques et lors d'analyses de qualité et de conformité : générateurs électrochimiques, traitement des eaux, analyses environnementales, lutte contre la corrosion... On évite tout calcul inutile de concentration et de pH, en privilégiant l'utilisation des diagrammes de prédominance ou de distribution pour valider le choix de la réaction qui modélise au mieux la situation. Aucune formule de calcul de pH n'est exigible.

Les choix pédagogiques relatifs au contenu des séances de travail expérimental contribuent à contextualiser ces enseignements et constituent une nouvelle occasion d'aborder la thématique « Mesure et incertitudes ». Les titrages sont étudiés exclusivement en travaux pratiques dans le cadre de situations authentiques présentant un intérêt en termes d'analyses.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>7.1 Transformations chimiques d'un système</b>	
Espèces physico-chimiques. Entités chimiques.	Recenser les espèces physico-chimiques présentes dans un système et leur quantité de matière. Attribuer à une espèce physico-chimique une formule brute et un état physique.
Modélisation d'une transformation au niveau macroscopique par une réaction : équation de réaction.	Écrire l'équation de la réaction qui modélise une transformation chimique.
État final d'un système siège d'une transformation : transformation totale ou non totale, équilibre chimique.	Distinguer une transformation totale d'une transformation aboutissant à un état d'équilibre chimique. Exprimer l'activité d'une espèce chimique pure, en phase condensée ou très diluée en

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Physique-chimie MPI

	<p>solution aqueuse. Exprimer l'activité d'une espèce chimique pure ou dans un mélange dans le cas de solutions aqueuses très diluées.</p>
<p>Évolution d'un système, siège d'une transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique : avancement, activité, quotient de réaction, constante thermodynamique d'équilibre. Critère d'évolution spontanée, état final.</p>	<p>Déterminer le quotient de réaction dans l'état initial et dans l'état final, à partir de données. Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique. Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p><b>Déterminer une constante thermodynamique d'équilibre.</b></p>
<p><b>7.2 Acides et bases, réactions acide-base</b></p>	
<p>pH d'une solution aqueuse. Transformation modélisée par une réaction acide-base. Couples acide-base, constante d'acidité ; acides et bases fort(e)s ou faibles dans l'eau ; diagramme de prédominance et courbes de distribution. Indicateurs colorés.</p>	<p>Écrire l'équation d'une réaction acide-base et déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction acide-base à partir des pKa des couples acide-base mis en jeu. Utiliser un diagramme de prédominance pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires. Interpréter et exploiter un diagramme de distribution.</p> <p><b>Réaliser un titrage ayant pour réaction support une réaction acide-base.</b></p>
<p><b>7.3 Oxydants et réducteurs, réactions d'oxydo-réduction</b></p>	
<p>Transformation modélisée par une réaction d'oxydo-réduction. Couple oxydant-réducteur. Nombre d'oxydation.</p>	<p>Identifier un transfert d'électrons et écrire une réaction d'oxydo-réduction à partir de données expérimentales ou des couples oxydant-réducteurs mis en jeu. Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple.</p>
<p>Pile, demi-piles, pont salin, tension à vide, réactions électrochimiques aux électrodes. Potentiel d'électrode, potentiel standard, relation de Nernst, électrode standard à hydrogène.</p>	<p>Justifier la séparation des réactifs dans deux demi-piles et l'utilisation d'un pont salin. Exploiter la relation de Nernst. Modéliser et schématiser le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode, ou à partir d'une mesure d'intensité de courant.</p> <p><b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement.</b></p>
<p>Aspect thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction. Domaine de prédominance. Force comparée des oxydants et des réducteurs.</p>	<p>Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples.</p>

Usure d'une pile. Capacité électrique d'une pile.	Déterminer la composition chimique d'une pile ayant fonctionné pendant une durée déterminée, l'intensité du courant étant fournie. Évaluer la capacité électrique d'une pile connaissant sa composition initiale.
--	--

### Annexe 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en annexe 1 du programme de physique chimie de la classe de MPII, option sciences informatiques. À elles deux, ces listes regroupent le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée. Une utilisation de matériel hors de ces listes lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une aide.

#### 1. Domaine optique

- Polariseur.
- Interféromètre de Michelson motorisé.
- Capteur photographique numérique.
- Spectromètre à fibre optique.

#### 2. Domaine électrique

- Oscilloscope numérique avec analyseur de spectre.
- Carte d'acquisition dont l'API est publiée.
- Microcontrôleur.
- Circuits intégrés comportant des portes logiques

#### 3. Domaine thermodynamique

- Caméra thermique

#### 4. Domaine transformation de la matière

- Verrerie classique de chimie analytique : burettes, pipettes jaugées et graduées, fioles jaugées, erlenmeyers, béchers, etc.
- Matériel classique du laboratoire de chimie : dispositifs de chauffage ou de refroidissement (bain-marie, bain froid, etc.), dispositifs d'agitation.
- Spectrophotomètre UV-visible
- pH-mètre et électrodes de mesure
- Ampèremètre, voltmètre et électrodes de référence
- Thermomètre
- Balance de précision

### Annexe 2 : outils mathématiques

Les outils mathématiques dont la maîtrise est nécessaire à la mise en œuvre du programme de physique de la classe de MPI sont d'une part ceux qui figurent dans l'annexe 2 du programme de la classe de MPII option sciences informatiques et d'autre part ceux qui figurent dans la liste ci-dessous.

Le thème « analyse vectorielle » n'a pas fait l'objet d'une rubrique en première année, l'expression des différents opérateurs introduits sont exigibles en coordonnées cartésiennes.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Physique-chimie MPI



**Thème 1 : ondes et signaux (1)**

- 1.1. Formation des images
- 1.2. Signaux électriques dans l'ARQS
- 1.3. Circuit linéaire du premier ordre
- 1.4. Oscillateurs libres et forcés
- 1.5. Filtrage linéaire
- 1.6. Propagation d'un signal

**Thème 2 : mouvements et interactions (1)**

- 2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point
- 2.2. Lois de Newton
- 2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel
- 2.4. Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires

**Deuxième semestre****Thème 2 : mouvements et interactions (2)**

- 2.5. Moment cinétique
- 2.6. Mouvements dans un champ de force centrale conservatif
- 2.7. Mouvement d'un solide

**Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts**

- 3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre
- 3.2. Énergie échangée par un système au cours d'une transformation
- 3.3. Premier principe. Bilans d'énergie
- 3.4. Deuxième principe. Bilans d'entropie
- 3.5. Machines thermiques
- 3.6. Statique des fluides dans un référentiel galiléen

**Thème 1 : ondes et signaux (2)**

- 1.7. Induction et forces de Laplace
  - 1.7.1. Champ magnétique
  - 1.7.2. Actions d'un champ magnétique
  - 1.7.3. Lois de l'induction
  - 1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps
  - 1.7.5. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire
- 1.8. Introduction à la physique quantique

**A. Premier semestre****Thème 1 : ondes et signaux (1)**

La partie 1.1. « **Formation des images** » traite de la formation des images et propose une ouverture sur la notion de guidage de la lumière par une fibre optique. Cette partie est l'occasion d'interroger le concept de modèle en physique et d'en identifier les limites de validité. Elle permet également d'aborder de nombreuses applications technologiques ; certaines sont précisées par le programme, d'autres sont laissées à l'appréciation des enseignants (lunette, microscope, optique d'un smartphone, etc.). L'approche expérimentale doit être privilégiée dans ce domaine de la physique qui s'y prête particulièrement bien.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Formation des images</b>	
<b>Sources lumineuses</b> Modèle de la source ponctuelle monochromatique. Spectre.	Caractériser une source lumineuse par son spectre. Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
<b>Modèle de l'optique géométrique</b> Modèle de l'optique géométrique. Notion de rayon lumineux. Indice d'un milieu transparent.	Définir le modèle de l'optique géométrique. Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.
Réflexion, réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Établir la condition de réflexion totale.
<b>Conditions de l'approximation de Gauss et applications</b> Stigmatisme. Miroir plan.	Construire l'image d'un objet par un miroir plan.
Conditions de l'approximation de Gauss.	Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences. Relier le stigmatisme approché aux caractéristiques d'un détecteur.
Lentilles minces dans l'approximation de Gauss.	Définir les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence. Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux, identifier sa nature réelle ou virtuelle. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et de Newton. Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.
<b>Modèles de quelques dispositifs optiques</b> L'œil. Punctum proximum, punctum remotum.	Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur plan fixe. Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.
L'appareil photographique.	Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur. Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné.  <b>Étudier l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image.</b>
La fibre optique à saut d'indice.	Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.
Système optique à plusieurs lentilles.	<b>Modéliser, à l'aide de plusieurs lentilles, un dispositif optique d'utilisation courante.</b>

La partie **1.2. « Signaux électriques dans l'ARQS »** pose les bases nécessaires à l'étude des circuits dans l'Approximation des Régimes Quasi Stationnaires (ARQS). Si le programme se concentre sur l'étude des dipôles R, L et C, il est possible, lors des travaux pratiques, de faire appel à des composants intégrés ou non linéaires (filtres à capacité commutée, échantillonneur-bloqueur, diodes, photorésistances, etc.) dès lors qu'aucune connaissance préalable n'est nécessaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Signaux électriques dans l'ARQS</b>	
Charge électrique, intensité du courant. Potentiel, référence de potentiel, tension. Puissance.	Justifier que l'utilisation de grandeurs électriques continues est compatible avec la quantification de la charge électrique. Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charge. Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence. Relier la loi des nœuds au postulat de la conservation de la charge. Utiliser la loi des mailles. Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur. Citer les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d'application.
Dipôles : résistances, condensateurs, bobines, sources décrites par un modèle linéaire.	Utiliser les relations entre l'intensité et la tension. Citer des ordres de grandeurs des composants R, L, C. Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance. Exprimer l'énergie stockée dans un condensateur ou une bobine. Modéliser une source en utilisant la représentation de Thévenin.
Association de deux résistances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente. Établir et exploiter les relations des diviseurs de tension ou de courant.
Résistance de sortie, résistance d'entrée.	<b>Évaluer une résistance d'entrée ou de sortie à l'aide d'une notice ou d'un appareil afin d'appréhender les conséquences de leurs valeurs sur le fonctionnement d'un circuit.</b>  <b>Étudier l'influence des résistances d'entrée ou de sortie sur le signal délivré par un GBF, sur la mesure effectuée par un oscilloscope ou un multimètre.</b>
Caractéristique d'un dipôle. Point de fonctionnement.	<b>Étudier la caractéristique d'un dipôle pouvant être non-linéaire et mettre en œuvre un capteur dans un dispositif expérimental.</b>

Les deux parties **1.3. « Circuit linéaire du premier ordre »** et **1.4. « Oscillateurs libres et forcés »** abordent l'étude des circuits linéaires du premier et du second ordre en régime libre puis forcé. Il s'agit

avant tout de comprendre les principes des méthodes mises en œuvre et leur exploitation pour étudier le comportement d'un signal traversant un système linéaire. Le choix a été fait de présenter simultanément les oscillateurs électriques et mécaniques de manière à mettre l'accent sur les analogies formelles et comportementales.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3. Circuit linéaire du premier ordre</b>	
Régime libre, réponse à un échelon de tension.	<p>Distinguer, sur un relevé expérimental, régime transitoire et régime permanent au cours de l'évolution d'un système du premier ordre soumis à un échelon de tension.</p> <p>Interpréter et utiliser la continuité de la tension aux bornes d'un condensateur ou de l'intensité du courant traversant une bobine.</p> <p>Établir l'équation différentielle du premier ordre vérifiée par une grandeur électrique dans un circuit comportant une ou deux mailles.</p> <p>Déterminer la réponse temporelle dans le cas d'un régime libre ou d'un échelon de tension.</p> <p>Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire.</p> <p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un circuit linéaire du premier ordre et analyser ses caractéristiques. Confronter les résultats expérimentaux aux expressions théoriques.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : mettre en œuvre la méthode d'Euler à l'aide d'un langage de programmation pour simuler la réponse d'un système linéaire du premier ordre à une excitation de forme quelconque.</p>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Oscillateurs libres et forces</b>	
Oscillateur harmonique. Exemples du circuit LC et de l'oscillateur mécanique.	<p>Établir et reconnaître l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique ; la résoudre compte tenu des conditions initiales.</p> <p>Caractériser le mouvement en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation.</p> <p>Réaliser un bilan énergétique.</p>

Circuit RLC série et oscillateur mécanique amorti par frottement visqueux.	<p>Analyser, sur des relevés expérimentaux, l'évolution de la forme des régimes transitoires en fonction des paramètres caractéristiques. Prévoir l'évolution du système à partir de considérations énergétiques. Écrire sous forme canonique l'équation différentielle afin d'identifier la pulsation propre et le facteur de qualité. Décrire la nature de la réponse en fonction de la valeur du facteur de qualité. Déterminer la réponse détaillée dans le cas d'un régime libre ou d'un système soumis à un échelon en recherchant les racines du polynôme caractéristique. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire selon la valeur du facteur de qualité.</p> <p><b>Mettre en évidence la similitude des comportements des oscillateurs mécanique et électronique.</b></p> <p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un système linéaire du deuxième ordre et analyser ses caractéristiques.</b></p>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique.
Impédances complexes.	Établir et connaître l'impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine.
Association de deux impédances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux impédances par une impédance équivalente.
Oscillateur électrique ou mécanique soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance.	<p>Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé. Relier l'acuité d'une résonance au facteur de qualité. Déterminer la pulsation propre et le facteur de qualité à partir de graphes expérimentaux d'amplitude et de phase.</p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental visant à caractériser un phénomène de résonance.</b></p> <p><b>Mettre en œuvre une démarche expérimentale visant à caractériser des régimes transitoires du premier ou du second ordre (flash, sismomètre, etc.).</b></p>

L'objectif principal de la partie 1.5. « **Filtrage linéaire** » n'est pas de former les étudiants aux aspects techniques des calculs des fonctions de transfert et des tracés de diagrammes de Bode mais de mettre l'accent sur l'interprétation des propriétés du signal de sortie connaissant celles du signal d'entrée et d'appréhender le rôle central de la linéarité des systèmes utilisés. Cette partie se termine par l'introduction de l'amplificateur linéaire intégré (ALI) idéal et en régime linéaire ; celle-ci doit être perçue comme une découverte et ne pas donner lieu à des dérives calculatoires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.5. Filtrage linéaire</b>	
Signaux périodiques.	<p>Analyser la décomposition fournie d'un signal périodique en une somme de fonctions sinusoïdales. Définir la valeur moyenne et la valeur efficace d'un signal.</p> <p>Établir par le calcul la valeur efficace d'un signal sinusoïdal.</p> <p>Interpréter le fait que le carré de la valeur efficace d'un signal périodique est égal à la somme des carrés des valeurs efficaces de ses harmoniques.</p>
Fonction de transfert harmonique. Diagramme de Bode.	<p>Tracer le diagramme de Bode (amplitude et phase) associé à une fonction de transfert d'ordre 1.</p> <p>Utiliser une fonction de transfert donnée d'ordre 1 ou 2 (ou ses représentations graphiques) pour étudier la réponse d'un système linéaire à une excitation sinusoïdale, à une somme finie d'excitations sinusoïdales, à un signal périodique.</p> <p>Utiliser les échelles logarithmiques et interpréter les zones rectilignes des diagrammes de Bode en amplitude d'après l'expression de la fonction de transfert.</p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'utilité des fonctions de transfert pour un système linéaire à un ou plusieurs étages.</b></p>
Modèles de filtres passifs : passe-bas et passe-haut d'ordre 1, passe-bas et passe-bande d'ordre 2.	<p>Choisir un modèle de filtre en fonction d'un cahier des charges.</p> <p>Expliciter les conditions d'utilisation d'un filtre en tant que moyennneur, intégrateur, ou dérivateur.</p> <p>Expliquer l'intérêt, pour garantir leur fonctionnement lors de mises en cascade, de réaliser des filtres de tension de faible impédance de sortie et forte impédance d'entrée.</p> <p>Expliquer la nature du filtrage introduit par un dispositif mécanique (sismomètre, amortisseur, accéléromètre, etc.).</p> <p><b>Étudier le filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal à partir d'une analyse spectrale.</b></p> <p><b>Détecter le caractère non linéaire d'un système par l'apparition de nouvelles fréquences.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : simuler, à l'aide d'un langage de programmation, l'action d'un filtre sur un signal périodique dont le spectre est fourni. Mettre en évidence l'influence des caractéristiques du filtre sur l'opération de filtrage.</p>

Filtres actifs en électronique. Modèle de l'ALI idéal en régime linéaire.	Identifier la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse comme un indice de fonctionnement en régime linéaire. Établir la relation entrée-sortie des montages non inverseur, suiveur, inverseur, intégrateur. Déterminer les impédances d'entrée de ces montages.  <b>Mettre en œuvre un filtre actif.</b>
--	--

Dans la partie **1.6.** consacrée à la « **Propagation d'un signal** », il est recommandé de s'appuyer sur une approche expérimentale ou sur des logiciels de simulation pour permettre aux étudiants de faire le lien entre l'observation de signaux qui se propagent et la traduction mathématique de cette propagation, sans qu'aucune référence ne soit faite à une équation d'onde. L'étude de la somme de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence et du phénomène d'interférences associé permet de mettre en évidence le rôle essentiel joué par le déphasage entre les deux signaux dans le signal résultant. L'étude des interférences lumineuses est l'occasion d'introduire la notion de différence de chemin optique et de la relier au déphasage. Les ondes stationnaires permettent d'illustrer le rôle des conditions aux limites dans l'apparition de modes propres.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.6. Propagation d'un signal</b>	
Exemples de signaux. Signal sinusoïdal.	Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.
Approche qualitative de la superposition de deux signaux sinusoïdaux de fréquences voisines. Battements.	<b>Déterminer une différence de fréquences à partir d'enregistrements de battements ou d'observation sensorielle directe.</b>
<b>Propagation d'un signal dans un milieu illimité, non dispersif et transparent</b> Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle non dispersive. Célérité, retard temporel.	Écrire les signaux sous la forme $f(x-ct)$ ou $g(x+ct)$ . Écrire les signaux sous la forme $f(t-x/c)$ ou $g(t+x/c)$ . Prévoir, dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle à position fixée et l'évolution spatiale à différents instants.
Modèle de l'onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle. Vitesse de phase, déphasage, double périodicité spatiale et temporelle.	Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique, mécanique et électromagnétique. Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de phase. Relier le déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation.  <b>Mesurer la vitesse de phase, la longueur d'onde et le déphasage dû à la propagation d'un phénomène ondulatoire.</b>
Milieux dispersifs ou non dispersifs.	Définir un milieu dispersif.

	Citer des exemples de situations de propagation dispersive et non dispersive.
<b>Phénomène d'interférences</b> Interférences entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence.	Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives. Déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser et caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes.</b>
Interférences entre deux ondes lumineuses de même fréquence. Exemple du dispositif des trous d'Young éclairé par une source monochromatique. Différence de chemin optique. Conditions d'interférences constructives ou destructives. Formule de Fresnel.	Relier le déphasage entre les deux ondes à la différence de chemin optique. Établir l'expression littérale de la différence de chemin optique entre les deux ondes. Exploiter la formule de Fresnel fournie pour décrire la répartition d'intensité lumineuse.  <b>Mettre en œuvre le dispositif expérimental des trous d'Young avec une acquisition numérique d'image.</b>
<b>Ondes stationnaires mécaniques</b> Modes propres.	Caractériser une onde stationnaire par l'existence de nœuds et de ventres. Exprimer les fréquences des modes propres connaissant la célérité et la longueur de la corde. Utiliser la propriété énonçant qu'une vibration quelconque d'une corde accrochée entre deux extrémités fixes se décompose en modes propres. Relier les notions sur les ondes stationnaires avec celles utilisées en musique.  <b>Décrire une onde stationnaire observée par stroboscopie sur la corde de Melde.</b>  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant d'analyser le spectre du signal acoustique produit par une corde vibrante.</b>

## Thème 2 : mouvements et interactions (1)

La partie 2.1 « **Description et paramétrage du mouvement d'un point** » vise notamment à mettre en place les principaux systèmes de coordonnées : cartésiennes, polaires, cylindriques et sphériques. Le but est de permettre aux étudiants de disposer d'outils efficaces pour décrire une grande variété de mouvements de points. Pour atteindre cet objectif, il convient de les familiariser progressivement avec les projections et dérivations de vecteurs ainsi qu'avec l'algébrisation des grandeurs dans un contexte relevant de la physique. Enfin, cette partie est l'occasion de procéder à des analyses qualitatives des comportements cinématiques de systèmes réels assimilés à un point, notamment sur les exemples simples des mouvements rectilignes et circulaires.



Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point</b>	
<b>Repérage dans l'espace et dans le temps</b> Espace et temps classiques. Notion de référentiel. Caractère relatif du mouvement. Caractère absolu des distances et des intervalles de temps.	Citer une situation où la description classique de l'espace ou du temps est prise en défaut.
<b>Cinématique du point</b> Description du mouvement d'un point. Vecteurs position, vitesse et accélération. Systèmes de coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques.	Exprimer à partir d'un schéma le déplacement élémentaire dans les différents systèmes de coordonnées, construire le trièdre local associé et en déduire géométriquement les composantes du vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes et cylindriques. Établir les expressions des composantes des vecteurs position, déplacement élémentaire, vitesse et accélération dans les seuls cas des coordonnées cartésiennes et cylindriques.
	Identifier les degrés de liberté d'un mouvement. Choisir un système de coordonnées adapté au problème.
Mouvement à vecteur accélération constant.	Exprimer le vecteur vitesse et le vecteur position en fonction du temps. Établir l'expression de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.
Mouvement circulaire uniforme et non uniforme.	Exprimer les composantes du vecteur position, du vecteur vitesse et du vecteur accélération en coordonnées polaires planes.
Repérage d'un point dont la trajectoire est connue. Vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour une trajectoire plane.	Situer qualitativement la direction du vecteur vitesse et du vecteur accélération pour une trajectoire plane. Exploiter les liens entre les composantes du vecteur accélération, la courbure de la trajectoire, la norme du vecteur vitesse et sa variation temporelle.  <b>Réaliser et exploiter quantitativement un enregistrement vidéo d'un mouvement : évolution temporelle des vecteurs vitesse et accélération.</b>

Dans la partie **2.2.** intitulée « **Lois de Newton** », on cherche d'abord à renforcer les compétences des étudiants relatives à la mise en équations d'un problème, qu'il s'agisse des étapes de bilans de forces ou de projection de la deuxième loi de Newton sur la base choisie. On cherche par ailleurs, sur l'exemple de quelques mouvements simples, à renforcer les compétences d'analyse qualitative d'une équation différentielle : stabilité des solutions, positions d'équilibre, type d'évolution, durée ou période typique d'évolution, etc. Cette pratique s'articule avec l'utilisation d'un langage de programmation pour résoudre des équations différentielles. Enfin, il s'agit aussi de confronter les étudiants aux limites de validité de certains modèles de forces, et ainsi de donner toute leur importance aux étapes de modélisation et de validation d'un modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Lois de Newton</b>	
<b>Quantité de mouvement</b> Masse d'un système. Conservation de la masse pour système fermé.	Exploiter la conservation de la masse pour un système fermé.
Quantité de mouvement d'un point et d'un système de points. Lien avec la vitesse du centre de masse d'un système fermé.	Établir l'expression de la quantité de mouvement pour un système de deux points sous la forme : $\mathbf{p} = m\mathbf{v}(G)$ .
Première loi de Newton : principe d'inertie. Référentiels galiléens.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens.
Notion de force. Troisième loi de Newton.	Établir un bilan des forces sur un système ou sur plusieurs systèmes en interaction et en rendre compte sur un schéma.
Deuxième loi de Newton. Théorème de la quantité de mouvement.	Déterminer les équations du mouvement d'un point matériel ou du centre de masse d'un système fermé dans un référentiel galiléen.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier une loi de force.</b>
Force de gravitation. Modèle du champ de pesanteur uniforme au voisinage de la surface d'une planète. Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme.	Étudier le mouvement d'un système modélisé par un point matériel dans un champ de pesanteur uniforme en l'absence de frottement.
Modèles d'une force de frottement fluide. Influence de la résistance de l'air sur un mouvement de chute.	Exploiter, sans la résoudre analytiquement, une équation différentielle : analyse en ordres de grandeur, détermination de la vitesse limite, utilisation des résultats obtenus par simulation numérique. Écrire une équation adimensionnée.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides.</b>
Modèle linéaire de l'élasticité d'un matériau.	Modéliser un comportement élastique par une loi de force linéaire ; extraire une constante de raideur et une longueur à vide à partir de données mesurées ou fournies. Analyser la limite d'une modélisation linéaire à partir de documents expérimentaux.  <b>Mettre en œuvre un microcontrôleur lors d'un test de traction.</b>
Tension d'un fil. Pendule simple.	Établir l'équation du mouvement du pendule simple. Justifier l'analogie avec l'oscillateur harmonique dans le cadre de l'approximation linéaire.
Modèle des lois de frottement de glissement : lois de Coulomb.	Exploiter les lois de Coulomb fournies dans les trois situations : équilibre, mise en mouvement, freinage. Formuler une hypothèse (quant au glissement ou non) et la valider.

La partie **2.3. « Approche énergétique du mouvement d'un point matériel »** vise à construire une démarche alternative et complémentaire pour l'étude d'une situation relevant de la mécanique – et plus généralement de la physique – fondée sur la conservation de certaines grandeurs – ici, l'énergie mécanique. Cette approche est l'occasion d'illustrer la capacité prédictive des analyses graphiques et numériques, par exemple pour pouvoir décrire un comportement à partir d'une représentation graphique de l'énergie potentielle dans le cas d'un mouvement conservatif.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel</b>	
<b>Puissance, travail et énergie cinétique</b> Puissance et travail d'une force dans un référentiel.	Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force.
Théorèmes de l'énergie cinétique et de la puissance cinétique dans un référentiel galiléen, dans le cas d'un système modélisé par un point matériel.	Utiliser le théorème approprié en fonction du contexte.
<b>Champ de force conservative et énergie potentielle</b> Énergie potentielle. Lien entre un champ de force conservative et l'énergie potentielle. Gradient.	Établir et citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur (champ uniforme), de l'énergie potentielle gravitationnelle (champ créé par un astre ponctuel), de l'énergie potentielle élastique. Déterminer l'expression d'une force à partir de l'énergie potentielle, l'expression du gradient étant fournie. Déduire qualitativement, en un point du graphe d'une fonction énergie potentielle, le sens et l'intensité de la force associée.
<b>Énergie mécanique</b> Énergie mécanique. Théorème de l'énergie mécanique. Mouvement conservatif.	Distinguer force conservative et force non conservative. Reconnaître les cas de conservation de l'énergie mécanique. Utiliser les conditions initiales.
Mouvement conservatif à une dimension.	Identifier sur un graphe d'énergie potentielle une barrière et un puits de potentiel. Déduire d'un graphe d'énergie potentielle le comportement qualitatif : trajectoire bornée ou non, mouvement périodique, positions de vitesse nulle.
Positions d'équilibre. Stabilité.	Déduire d'un graphe d'énergie potentielle l'existence de positions d'équilibre. Analyser qualitativement la nature, stable ou instable, de ces positions.
Petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre stable, approximation locale par un puits de potentiel harmonique.	Établir l'équation différentielle du mouvement au voisinage d'une position d'équilibre.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre numériquement une équation différentielle du deuxième ordre non-linéaire et faire apparaître l'effet des termes non-linéaires.

La partie 2.4. « **Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires** » introduit l'expression de la force de Lorentz ainsi que deux situations de base sur lesquelles les étudiants doivent être autonomes dans la résolution, attestant en cela de l'acquisition d'une certaine aisance à ce stade de leur formation. Des situations physiques variées sont en capacité d'illustrer concrètement cette partie qui ne doit pas se réduire à des développements calculatoires ou des illustrations graphiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.4. Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires</b>	
Force de Lorentz exercée sur une charge ponctuelle ; champs électrique et magnétique.	Évaluer les ordres de grandeur des forces électrique ou magnétique et les comparer à ceux des forces gravitationnelles.
Puissance de la force de Lorentz.	Justifier qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme.	Mettre en équation le mouvement et le caractériser comme un mouvement à vecteur accélération constant. Effectuer un bilan énergétique pour déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiel.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétostatique uniforme dans le cas où le vecteur vitesse initial est perpendiculaire au champ magnétostatique.	Déterminer le rayon de la trajectoire et le sens de parcours.

## B. Second semestre

### Thème 2 : mouvements et interactions (2)

Au second semestre, le thème « **Mouvements et interactions** » est structuré en trois parties : moment cinétique, mouvements dans un champ de force centrale conservatif et mouvement d'un solide. L'accent est porté sur les lois conservation du moment cinétique, de l'énergie mécanique et de la quantité de mouvement comme outils d'étude des mouvements.

La partie 2.5. « **Moment cinétique** » est l'occasion d'introduire les notions de moment cinétique et de moment d'une force. L'un des objectifs visés est que les étudiants disposent de représentations concrètes qui permettent de donner du sens aux grandeurs vectorielles et scalaires utilisées ; c'est notamment pour cela que le bras de levier est introduit. Comme souligné précédemment, l'accent est mis sur l'identification des situations où le moment cinétique est conservé.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.5. Moment cinétique</b>	
Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un point et par rapport à un axe orienté.	Relier la direction et le sens du vecteur moment cinétique aux caractéristiques du mouvement.
Moment cinétique d'un système discret de points par rapport à un axe orienté.	Utiliser le caractère algébrique du moment cinétique scalaire.

Moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté.	Exprimer le moment d'une force par rapport à un axe orienté en utilisant le bras de levier.
Théorème du moment cinétique en un point fixe dans un référentiel galiléen. Conservation du moment cinétique.	Identifier les cas de conservation du moment cinétique.

La partie **2.6. « Mouvements dans un champ de force centrale conservatif »** est notamment motivée par ses nombreuses applications possibles. On discute la nature de la trajectoire sur un graphe donnant l'énergie potentielle effective et, dans le cas d'un champ newtonien (lois de Kepler), on ne poursuit l'étude que dans le cas d'une trajectoire circulaire. Le caractère elliptique des trajectoires associées à un état lié est affirmé sans qu'aucune étude géométrique des ellipses ne soit prévue ; on utilise dans ce cas les constantes du mouvement (moment cinétique et énergie mécanique) pour exprimer l'énergie de la trajectoire elliptique en fonction du demi-grand axe.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.6. Mouvements dans un champ de force centrale conservatif</b>	
Point matériel soumis à un champ de force centrale.	Établir la conservation du moment cinétique à partir du théorème du moment cinétique. Établir les conséquences de la conservation du moment cinétique : mouvement plan, loi des aires.
<b>Point matériel soumis à un champ de force centrale conservatif</b> Conservation de l'énergie mécanique. Énergie potentielle effective. État lié et état de diffusion.	Exprimer l'énergie mécanique d'un système conservatif ponctuel à partir de l'équation du mouvement. Exprimer la conservation de l'énergie mécanique et construire une énergie potentielle effective. Décrire qualitativement le mouvement radial à l'aide de l'énergie potentielle effective. Relier le caractère borné du mouvement radial à la valeur de l'énergie mécanique.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, obtenir des trajectoires d'un point matériel soumis à un champ de force centrale conservatif.
<b>Cas particulier du champ newtonien</b> Lois de Kepler.	Énoncer les lois de Kepler pour les planètes et les transposer au cas des satellites terrestres.
Cas particulier du mouvement circulaire : satellite, planète.	Établir que le mouvement est uniforme et déterminer sa période. Établir la troisième loi de Kepler dans le cas particulier de la trajectoire circulaire. Exploiter sans démonstration sa généralisation au cas d'une trajectoire elliptique.
Énergie mécanique dans le cas du mouvement circulaire et dans le cas du mouvement elliptique.	Exprimer l'énergie mécanique pour le mouvement circulaire. Exprimer l'énergie mécanique pour le mouvement elliptique en fonction du demi-grand axe.

<b>Satellites terrestres</b> Satellites géostationnaire, de localisation et de navigation, météorologique.	Différencier les orbites des satellites terrestres en fonction de leurs missions. Déterminer l'altitude d'un satellite géostationnaire et justifier sa localisation dans le plan équatorial.
Vitesses cosmiques : vitesse en orbite basse et vitesse de libération.	Exprimer ces vitesses et citer leur ordre de grandeur en dynamique terrestre.

Concernant le solide en rotation autour d'un axe fixe dans la partie **2.7. « Mouvement d'un solide »**, il s'agit de définir le mouvement en remarquant que tout point du solide décrit un cercle autour de l'axe avec une même vitesse angulaire et de déterminer la vitesse de chaque point en fonction de celle-ci et de la distance à l'axe de rotation.

Des exemples de dynamique du solide sont introduits (translation et rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen), avec toutefois des limitations strictes : l'étude générale d'un mouvement composé d'une translation dans un référentiel galiléen et d'une rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel barycentrique ne figure pas au programme. L'étude du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe gardant une direction fixe dans un référentiel galiléen mais pour lequel l'axe de rotation est en mouvement est exclue. Cette partie se termine par l'étude d'un système déformable pour souligner le rôle des forces intérieures dans le bilan énergétique d'un système.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.7. Mouvement d'un solide</b>	
<b>Description du mouvement d'un solide dans deux cas particuliers</b> Définition d'un solide.	Différencier un solide d'un système déformable.
Translation.	Reconnaître et décrire une translation rectiligne ainsi qu'une translation circulaire.
Rotation autour d'un axe fixe.	Décrire la trajectoire d'un point quelconque du solide et exprimer sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.
<b>Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide mobile autour d'un axe fixe</b> Moment cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe : moment d'inertie.	Exploiter, pour un solide, la relation entre le moment cinétique scalaire, la vitesse angulaire de rotation et le moment d'inertie fourni. Relier qualitativement le moment d'inertie à la répartition des masses.
Couple.	Définir un couple.
Liaison pivot.	Définir une liaison pivot et justifier le moment qu'elle peut produire.
Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.	Exploiter le théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.
Pendule de torsion.	Établir l'équation du mouvement. Établir une intégrale première du mouvement.

Pendule pesant.	Établir l'équation du mouvement. Établir une intégrale première du mouvement.  <b>Réaliser l'étude énergétique d'un pendule pesant et mettre en évidence une diminution de l'énergie mécanique.</b>  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, mettre en évidence le non isochronisme des oscillations.
<b>Approche énergétique du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté, dans un référentiel galiléen</b> Énergie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Utiliser l'expression de l'énergie cinétique, l'expression du moment d'inertie étant fournie.
Théorème de l'énergie cinétique pour un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Établir, dans ce cas, l'équivalence entre le théorème scalaire du moment cinétique et celui de l'énergie cinétique.
<b>Système déformable</b> Théorème de l'énergie cinétique pour un système déformable.	Prendre en compte le travail des forces intérieures. Utiliser sa nullité dans le cas d'un solide.  <b>Conduire le bilan énergétique du tabouret d'inertie.</b>

### Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts

Après avoir mis l'accent sur le passage fondamental d'une réalité microscopique à des grandeurs mesurables macroscopiques, cette partie propose, en s'appuyant sur des exemples concrets, de poursuivre la description et l'étude de la matière à l'échelle macroscopique, et d'aborder les deux principes fondamentaux de la thermodynamique. Les capacités identifiées doivent être introduites en s'appuyant dès que possible sur des dispositifs expérimentaux qui permettent ainsi leur acquisition progressive et authentique.

On utilise les notations suivantes : pour une grandeur extensive « A », « a » sera la grandeur massique associée et « A<sub>m</sub> » la grandeur molaire associée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre</b>	
Échelles microscopique, mésoscopique, et macroscopique. Libre parcours moyen.	Définir l'échelle mésoscopique et en expliquer la nécessité. Citer quelques ordres de grandeur de libres parcours moyens.
État microscopique et état macroscopique.	Préciser les paramètres nécessaires à la description d'un état microscopique et d'un état macroscopique sur un exemple.

Distribution des vitesses moléculaires d'un gaz (homogénéité et isotropie). Vitesse quadratique moyenne. Pression cinétique.	Utiliser un modèle unidirectionnel avec une distribution discrète de vitesse pour montrer que la pression est proportionnelle à la masse des particules, à la densité particulaire et au carré de la vitesse quadratique moyenne.
Température cinétique. Exemple du gaz parfait monoatomique : $E_c=3/2kT$ .	Calculer l'ordre de grandeur d'une vitesse quadratique moyenne dans un gaz parfait.
Système thermodynamique.	Identifier un système ouvert, un système fermé, un système isolé.
État d'équilibre d'un système soumis aux seules forces de pression. Pression, température, volume, équation d'état. Grandeur extensive, grandeur intensive. Exemples du gaz parfait et d'une phase condensée indilatable et incompressible.	Calculer une pression à partir d'une condition d'équilibre mécanique. Dédire une température d'une condition d'équilibre thermique. Citer quelques ordres de grandeur de volumes molaires ou massiques dans les conditions usuelles de pression et de température. Citer et utiliser l'équation d'état des gaz parfaits.
Énergie interne d'un système. Capacité thermique à volume constant dans le cas du gaz parfait.	Exprimer l'énergie interne d'un gaz parfait monoatomique à partir de l'interprétation microscopique de la température.  Exploiter la propriété $U_m=U_m(T)$ pour un gaz parfait.
Énergie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée considérée incompressible et indilatable.	Exploiter la propriété $U_m=U_m(T)$ pour une phase condensée incompressible et indilatable.
Approximation des phases condensées peu compressibles et peu dilatables.	Interpréter graphiquement la différence de compressibilité entre un liquide et un gaz à partir d'isothermes expérimentales.
Du gaz réel au gaz parfait. 2	Comparer le comportement d'un gaz réel au modèle du gaz parfait sur des réseaux d'isothermes expérimentales en coordonnées de Clapeyron ou d'Amagat.
Corps pur diphasé en équilibre. Diagramme de phases (P,T). Cas de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme de Clapeyron (P,v), titre en vapeur.	Analyser un diagramme de phase expérimental (P,T). Proposer un jeu de variables d'état suffisant pour caractériser l'état d'équilibre d'un corps pur diphasé soumis aux seules forces de pression. Positionner les phases dans les diagrammes (P,T) et (P,v). Déterminer la composition d'un mélange diphasé en un point d'un diagramme (P,v).  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental d'étude des relations entre paramètres d'état d'un fluide à l'équilibre (corps pur monophasé ou sous deux phases).</b>
Équilibre liquide-vapeur de l'eau en présence d'une atmosphère inerte. Humidité relative.	Utiliser la notion de pression partielle pour étudier les conditions de l'équilibre liquide-vapeur en présence d'une atmosphère inerte.



	Identifier les conditions d'évaporation et de condensation.
--	---

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Énergie échangée par un système au cours d'une transformation</b>	
Transformation thermodynamique subie par un système. Évolutions isochore, isotherme, isobare, monobare, monotherme.	Définir un système adapté à une problématique donnée. Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final.
Travail des forces de pression. Transformations isochore, monobare.	Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron.
Transferts thermiques. Transformation adiabatique. Thermostat, transformations monotherme et isotherme.	Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement. Identifier dans une situation expérimentale le ou les systèmes modélisables par un thermostat.

Concernant les bilans d'énergie abordés dans la partie **3.3. « Premier principe. Bilans d'énergie »**, les expressions des fonctions d'état  $U_m(T, V_m)$  et  $H_m(T, P)$  sont données si le système ne relève pas du modèle gaz parfait ou du modèle de la phase condensée incompressible et indilatable.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.3. Premier principe. Bilans d'énergie</b>	
Premier principe de la thermodynamique.	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail et transfert thermique. Utiliser le premier principe de la thermodynamique entre deux états voisins. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne. Distinguer le statut de la variation de l'énergie interne du statut des termes d'échange. Calculer le transfert thermique sur un chemin donné connaissant le travail et la variation de l'énergie interne.
Enthalpie d'un système. Capacité thermique à pression constante dans le cas du gaz parfait et d'une phase condensée incompressible et indilatable.	Exprimer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final. Exprimer l'enthalpie $H_m(T)$ du gaz parfait à partir de l'énergie interne. Justifier que l'enthalpie $H_m$ d'une phase condensée peu compressible et peu dilatable peut être considérée comme une fonction de l'unique variable $T$ . Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.

Enthalpie associée à une transition de phase : enthalpie de fusion, enthalpie de vaporisation, enthalpie de sublimation.	Exploiter l'extensivité de l'enthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phases.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie de fusion, etc.).</b>
--	--

Concernant la partie **3.4. « Deuxième principe. Bilans d'entropie »**, l'expression de la fonction d'état entropie est systématiquement donnée et sa construction n'est pas une capacité visée. On cite sans aucun développement quantitatif son interprétation en termes de désordre statistique, de façon à faciliter une interprétation intuitive des bilans d'entropie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.4. Deuxième principe. Bilans d'entropie</b>	
Fonction d'état entropie.	Interpréter qualitativement l'entropie en termes de désordre statistique à l'aide de la formule de Boltzmann fournie.
Deuxième principe de la thermodynamique : entropie créée, entropie échangée. $\Delta S = S_{\text{ech}} + S_{\text{créé}}$ avec $S_{\text{ech}} = \sum Q_i / T_i$ .	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan entropique. Relier la création d'entropie à une ou plusieurs causes physiques de l'irréversibilité. Analyser le cas particulier d'un système en évolution adiabatique.
Variation d'entropie d'un système.	Utiliser l'expression fournie de la fonction d'état entropie. Exploiter l'extensivité de l'entropie.
Loi de Laplace.	Citer et utiliser la loi de Laplace et ses conditions d'application.
Cas particulier d'une transition de phase.	Citer et utiliser la relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie associées à une transition de phase : $\Delta h_{12}(T) = T \Delta s_{12}(T)$

Dans la partie **3.5. « Machines thermiques »**, l'enseignement de la thermodynamique est orienté vers des applications industrielles réelles et motivantes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.5. Machines thermiques</b>	
Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.	Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Définir un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Justifier et utiliser le théorème de Carnot. Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération.  <b>Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.</b>

Cette partie, intitulée **3.6. « Statique des fluides dans un référentiel galiléen »**, est conçue pour introduire sur le support concret de la statique des fluides le principe du découpage d'un domaine physique (volume, surface) en éléments infinitésimaux et de la sommation d'une grandeur extensive (force) pour ce découpage.

Un des objectifs est de montrer dans cette partie l'intérêt d'un formalisme spécifique – utilisation de l'opérateur gradient – pour passer à une formulation universelle d'une loi de la physique.

La statique des fluides permet également d'introduire le facteur de Boltzmann dont on affirme la généralité.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.6. Statique des fluides dans un référentiel galiléen</b>	
Forces surfaciques, forces volumiques.	Citer des exemples de forces surfaciques ou volumiques.
Résultante de forces de pression.	Exprimer une surface élémentaire dans un système de coordonnées adaptées. Utiliser les symétries pour déterminer la direction d'une résultante de forces de pression. Évaluer une résultante de forces de pression.
Équivalent volumique des forces de pression.	Exprimer l'équivalent volumique des forces de pression à l'aide d'un gradient.
Équation locale de la statique des fluides.	Établir l'équation locale de la statique des fluides.
Statique dans le champ de pesanteur uniforme : relation $dP/dz = -\rho g$ .	Citer des ordres de grandeur des champs de pression dans le cas de l'océan et de l'atmosphère. Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas d'un fluide incompressible et homogène et dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, étudier les variations de température et de pression dans l'atmosphère.
Poussée d'Archimède.	Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède. Exploiter la loi d'Archimède.
Facteur de Boltzmann.	S'appuyer sur la loi d'évolution de la densité moléculaire de l'air dans le cas de l'atmosphère isotherme pour illustrer la signification du facteur de Boltzmann. Utiliser $kT$ comme référence des énergies mises en jeu à l'échelle microscopique.

## Thème 1 : Onde et signaux (2)

La partie **1.7. « Induction et forces de Laplace »** s'appuie sur les nombreuses applications présentes dans notre environnement immédiat : boussole, moteur électrique, alternateur, transformateur, haut-parleur, plaques à induction, carte RFID... Il s'agit de restituer toute la richesse de ces applications dans un volume horaire modeste, ce qui limite les géométries envisagées et le formalisme utilisé. Le point de vue adopté cherche à mettre l'accent sur les phénomènes et sur la modélisation sommaire de leurs applications. Toute étude du champ électromoteur est exclue. L'induction et les forces de Laplace dans un circuit mobile sont introduites dans le cas d'un champ uniforme et stationnaire, soit dans le modèle des rails de Laplace, soit dans celui d'un cadre rectangulaire en rotation. Ce dernier modèle permet

d'introduire la notion de dipôle magnétique et une analogie de comportement permet de l'étendre au cas de l'aiguille d'une boussole.

Le succès de cet enseignement suppose le respect de ces limitations : il ne s'agit pas d'une étude générale des phénomènes d'induction. Corrélativement, l'enseignement de cette partie doit impérativement s'appuyer sur une démarche expérimentale authentique, qu'il s'agisse d'expériences de cours ou d'activités expérimentales.

La partie **1.7.1 « Champ magnétique »** vise à relier le champ magnétique et ses sources ; l'accent est mis sur le concept de champ vectoriel, l'analyse des symétries et des invariances, l'exploitation des représentations graphiques et la connaissance d'ordres de grandeur.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.1. Champ magnétique</b>	
Sources de champ magnétique ; cartes de champ magnétique.	Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible et l'emplacement des sources. Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme. Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.
Symétries et invariances des distributions de courant.	Exploiter les propriétés de symétrie et d'invariance des sources pour prévoir des propriétés du champ créé.
Lien entre le champ magnétique et l'intensité du courant.	Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.
Moment magnétique.	Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. Associer à un aimant un moment magnétique par analogie avec une boucle de courant. Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

Dans la partie **1.7.2 « Actions d'un champ magnétique »**, l'enseignant est libre d'introduire la force de Laplace avec ou sans référence à la force de Lorentz. Il s'agit ici de se doter d'expressions opérationnelles pour étudier le mouvement dans un champ uniforme et stationnaire (soit d'une barre en translation, soit d'un moment magnétique en rotation modélisé par un cadre rectangulaire).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.2. Actions d'un champ magnétique</b>	
Densité linéique de la force de Laplace dans le cas d'un élément de courant filiforme.	Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.
Résultante et puissance des forces de Laplace.	Établir et citer l'expression de la résultante des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire. Exprimer la puissance des forces de Laplace.

Couple et puissance des actions mécaniques de Laplace dans le cas d'une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.	Établir et exploiter l'expression du moment du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique. Exprimer la puissance des actions mécaniques de Laplace.
Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.	<b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'action d'un champ magnétique uniforme sur une boussole.</b>
Effet moteur d'un champ magnétique tournant.	<b>Créer un champ magnétique tournant à l'aide de deux ou trois bobines et mettre en rotation une aiguille aimantée.</b>

La partie **1.7.3 « Lois de l'induction »** repose sur la loi de Faraday qui se prête parfaitement à une introduction expérimentale et qui constitue un bel exemple d'illustration de l'histoire des sciences. On évoque, à ce sujet, les différents points de vue possibles sur le même phénomène selon le référentiel dans lequel on se place.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.3. Lois de l'induction</b>	
<b>Flux d'un champ magnétique</b> Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
<b>Loi de Faraday</b> Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.	<b>Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.</b>
Loi de modération de Lenz.	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Force électromotrice induite, loi de Faraday.	Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

La partie **1.7.4 « Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps »** aborde le phénomène d'auto-induction puis le couplage par mutuelle inductance entre deux circuits fixes. Elle traite du modèle du transformateur de tensions.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps</b>	
<b>Auto-induction</b> Flux propre et inductance propre.	Différencier le flux propre des flux extérieurs. Utiliser la loi de modération de Lenz. Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.  <b>Mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine.</b>
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.

<b>Cas de deux bobines en interaction</b> Inductance mutuelle entre deux bobines.	Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale ». <b>Mesurer la valeur de l'inductance mutuelle entre deux bobines et étudier l'influence de la géométrie.</b>
Circuits électriques à une maille couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.	Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.
Transformateur de tension.	Établir la loi des tensions.
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.

La partie **1.7.5 « Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire »** est centrée sur la conversion de puissance. Des situations géométriques simples permettent de dégager les paramètres physiques pertinents afin de modéliser le principe d'un moteur à courant continu ou un dispositif de freinage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.5. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire</b>	
<b>Conversion de puissance mécanique en puissance électrique.</b> Rail de Laplace. Spire rectangulaire soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et en rotation uniforme autour d'un axe fixe orthogonal au champ magnétique.	Interpréter qualitativement les phénomènes observés. Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Effectuer un bilan énergétique. Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
Freinage par induction.	Expliquer l'origine des courants de Foucault et en citer des exemples d'utilisation.  <b>Mettre en évidence qualitativement les courants de Foucault.</b>
<b>Conversion de puissance électrique en puissance mécanique</b> Moteur à courant continu à entrefer plan.	Analyser le fonctionnement du moteur à courant continu à entrefer plan en s'appuyant sur la configuration des rails de Laplace. Citer des exemples d'utilisation du moteur à courant continu.

La partie **1.8. « Introduction à la physique quantique »** est structurée autour de la présentation d'expériences réalisées depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. Cette partie vise à questionner la représentation classique du monde proposée dans les autres parties du programme. Les concepts essentiels abordés sont la dualité onde-particule, l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde, l'inégalité de Heisenberg spatiale et la quantification de l'énergie dans les atomes. La réflexion sur les thèmes abordés ici est avant tout qualitative ; toute dérivation calculatoire exploitant les concepts propres à la physique quantique doit être évitée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.8. Introduction à la physique quantique</b>	
<b>Dualité onde-particule pour la lumière et la matière</b> Photon : énergie et impulsion.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.
Onde de matière associée à une particule. Relation de de Broglie.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire de la matière. Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.
<b>Introduction au formalisme quantique</b> Fonction d'onde : introduction qualitative, interprétation probabiliste.	Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes.
Inégalité de Heisenberg spatiale.	Établir par analogie avec la diffraction des ondes lumineuses, l'inégalité en ordre de grandeur : $\Delta p \Delta x \geq \hbar$ .
<b>Quantification de l'énergie</b> Modèle planétaire de Bohr. Limites.	Exploiter l'hypothèse de quantification du moment cinétique orbital pour obtenir l'expression des niveaux d'énergie électronique de l'atome d'hydrogène.
Modèle du puits de potentiel unidimensionnel de profondeur infinie.	Exploiter l'inégalité de Heisenberg spatiale pour mettre en évidence l'existence d'une énergie minimale de confinement. Obtenir les niveaux d'énergie par analogie avec les modes propres d'une corde vibrante. Établir le lien qualitatif entre confinement spatial et quantification.

### Annexe 1 : matériel

La liste ci-dessous regroupe le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée fournie sous forme de version papier ou numérique. Une utilisation de matériel hors de cette liste lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une introduction guidée suffisamment détaillée.

#### 1. Domaine optique

- Goniomètre
- Viseur à frontale fixe
- Lunette auto-collimatrice
- Spectromètre à fibre optique
- Laser à gaz
- Lampes spectrales
- Source de lumière blanche à condenseur

#### 2. Domaine électrique

- Oscilloscope numérique
- Carte d'acquisition et logiciel dédié

<p><b>Dosages par étalonnage</b></p>	<p>Déterminer une concentration en exploitant la mesure de grandeurs physiques caractéristiques de l'espèce ou en construisant et en utilisant une courbe d'étalonnage. Déterminer une concentration ou une quantité de matière par spectrophotométrie UV-visible.</p>
<p><b>Dosages par titrage</b></p> <p>Titrages directs, indirects. Équivalence. Titrages simples, successifs, simultanés. Méthodes expérimentales de suivi d'un titrage : pH-métrie, conductimétrie, potentiométrie à intensité nulle, indicateurs de fin de titrage.</p>	<p>Identifier et exploiter la réaction support du titrage (recenser les espèces présentes dans le milieu au cours du titrage, repérer l'équivalence, justifier qualitativement l'allure de la courbe ou le changement de couleur ou d'aspect observé). Proposer ou justifier le protocole d'un titrage à l'aide de données fournies ou à rechercher. Mettre en œuvre un protocole expérimental correspondant à un titrage direct ou indirect. Choisir et utiliser un indicateur de fin de titrage.</p>
<p>Méthodes d'exploitation des courbes expérimentales.</p>	<p>Exploiter une courbe de titrage pour déterminer la quantité de matière, masse ou concentration de l'espèce titrée. Exploiter une courbe de titrage pour déterminer une valeur expérimentale d'une constante thermodynamique d'équilibre. Utiliser un logiciel de simulation pour tracer des courbes de distribution et confronter la courbe de titrage simulée à la courbe expérimentale. Justifier la nécessité d'effectuer un titrage indirect. Distinguer équivalence et repérage de fin de titrage.</p>
<p><b>Suivi cinétique de transformations chimiques</b></p> <p>Suivi de l'évolution temporelle d'une grandeur physique. Limitation de l'évolution temporelle (trempe) d'un système par dilution, transformation chimique ou refroidissement. Régulation de la température.</p>	<p>Choisir une méthode de suivi prenant en compte la facilité de mise en œuvre, les propriétés des espèces étudiées, la durée de la transformation estimée ou fournie. Exploiter les résultats d'un suivi temporel de concentration pour déterminer les caractéristiques cinétiques d'une réaction. Proposer et mettre en œuvre des conditions expérimentales permettant la simplification de la loi de vitesse. Déterminer la valeur d'une énergie d'activation.</p>

## Contenus thématiques

L'organisation des deux semestres est la suivante :

### Premier semestre PCSI

1. Transformations de la matière
  - 1.1. Description et évolution d'un système vers un état final lors d'une transformation chimique
  - 1.2. Évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation chimique
2. Relations entre structure des entités chimiques, propriétés physiques et réactivité
  - 2.1. Structure des entités chimiques



- 2.2. Relations entre structure des entités chimiques et propriétés physiques macroscopiques
- 2.3. Réactivité des espèces organiques et premières applications en synthèse

## Deuxième semestre PCSI option PC

3. Transformations de la matière : évolution d'un système et mécanisme réactionnel
4. Structures microscopiques et propriétés physiques des solides
5. Transformations chimiques en solution aqueuse
  - 5.1. Réactions acide-base et de précipitation
  - 5.2. Réactions d'oxydo-réduction
6. Réactivités, transformations en chimie organique et stratégie de synthèse
  - 6.1. Techniques spectroscopiques de caractérisation
  - 6.2. Réactions d'oxydo-réduction en chimie organique
  - 6.3. Activation de groupes caractéristiques
  - 6.4. Protection de groupes caractéristiques et stratégie de synthèse

## Deuxième semestre PCSI option PSI

3. Structures microscopiques et propriétés physiques des solides
4. Transformations chimiques en solution aqueuse
  - 4.1. Réactions acide-base et de précipitation
  - 4.2. Réactions d'oxydo-réduction

## Premier Semestre PCSI

### 1. Transformations de la matière

L'objectif de cette partie est d'amener les étudiant·es à mobiliser de manière autonome les notions et modèles pour décrire, au niveau macroscopique, un système physico-chimique et son évolution. Il convient que les problématiques abordées, les illustrations et les applications prennent largement appui sur des transformations chimiques rencontrées dans la vie courante, au laboratoire, en milieu industriel ou dans le monde du vivant.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- décrire un système physico-chimique avec méthode et en utilisant un vocabulaire scientifique précis ;
- effectuer une distinction entre les mondes des objets et des phénomènes (systèmes physico-chimiques, transformations chimiques) et le monde des modèles (réaction chimique comme modèle d'une transformation, lois d'évolution temporelle comme modèle macroscopique de l'évolution) ;
- exploiter les outils de description ou d'analyse expérimentale des systèmes chimiques pour modéliser leur évolution ;
- proposer des approximations simplifiant l'exploitation quantitative de données expérimentales et en vérifier la pertinence ;
- confronter les prévisions d'un modèle avec des résultats expérimentaux ;
- traduire, en langage de programmation, les démarches mises en œuvre pour déterminer l'état final d'un système ou pour exploiter des résultats expérimentaux et les confronter à des modèles.

#### 1.1. Description et évolution d'un système vers un état final lors d'une transformation chimique

Les concepts développés dans cette partie permettent d'envisager l'optimisation des synthèses ou des analyses, tout à la fois pour obtenir davantage de produit désiré, réduire des produits secondaires non désirés ou favoriser une réaction support d'une analyse.

L'étude quantitative de l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique, est réalisée dans un premier temps à partir d'une modélisation par une seule réaction chimique symbolisée par une

équation de réaction à laquelle est associée une constante thermodynamique d'équilibre. Il s'agit de prévoir le sens d'évolution de systèmes homogènes ou hétérogènes et de déterminer leur composition dans l'état final.

L'utilisation d'un langage de programmation permet d'effectuer, dans un deuxième temps, des études quantitatives pour déterminer l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique modélisée par deux réactions et de commencer à aborder les compétitions thermodynamiques.

Les compétences relatives à cette partie du programme sont ensuite mobilisées régulièrement au cours de l'année, plus particulièrement au second semestre lors des transformations en solution aqueuse, et en seconde année, notamment dans le cadre de la thermodynamique chimique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Système physico-chimique</b> Espèces physico-chimiques.</p>	Recenser les espèces physico-chimiques présentes dans un système.
<p>Corps purs et mélanges : concentration en quantité de matière, fraction molaire, pression partielle. Variables intensives et extensives. Composition d'un système physico-chimique.</p>	<p>Décrire la composition d'un système à l'aide des grandeurs physiques pertinentes. Reconnaître le caractère extensif ou intensif d'une variable.</p>
<p><b>Transformation chimique d'un système</b> Modélisation d'une transformation par une ou plusieurs réactions chimiques. Équation de réaction ; constante thermodynamique d'équilibre.</p>	<p>Écrire l'équation de la réaction (ou des réactions) qui modélise(nt) une transformation chimique donnée.</p> <p><b>Déterminer une constante thermodynamique d'équilibre et tester l'influence de différents paramètres sur l'état d'équilibre d'un système.</b></p>
<p>Évolution d'un système lors d'une transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique : avancement, activité, quotient de réaction, critère d'évolution.</p>	<p>Décrire qualitativement et quantitativement un système chimique dans l'état initial ou dans un état d'avancement quelconque. Exprimer l'activité d'une espèce chimique pure ou dans un mélange dans le cas de solutions aqueuses très diluées ou de mélanges de gaz parfaits avec référence à l'état standard. Exprimer le quotient de réaction. Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique.</p>
<p>Composition chimique du système dans l'état final : état d'équilibre chimique, transformation totale.</p>	<p>Identifier un état d'équilibre chimique. Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, l'état final d'un système, siège d'une transformation, modélisée par une ou deux réactions à partir des conditions initiales et valeur(s) de la(es) constante(s) thermodynamique(s) d'équilibre.</p>
<p>Optimisation d'un procédé chimique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- par modification de la valeur de <math>K^\circ</math> ;</li> <li>- par modification de la valeur du quotient de réaction.</li> </ul>	<p>Identifier les paramètres d'influence d'un état d'équilibre et leur contrôle pour optimiser une synthèse ou minimiser la formation d'un produit secondaire indésirable.</p>

## 1.2. Évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation chimique

L'étude de l'évolution temporelle d'un système chimique permet, dans un premier temps, de dégager expérimentalement les facteurs cinétiques concentration et température et de les mettre en œuvre en stratégie de synthèse et d'analyse. Cette mise en évidence est prolongée par les premières modélisations macroscopiques d'évolution des concentrations avec des lois de vitesse d'ordre simple et d'influence de la température avec la loi d'Arrhenius.

Les déterminations d'ordre global ou apparent mettent en œuvre la méthode différentielle ou intégrale, et peuvent s'effectuer à l'aide de logiciels dédiés ou d'un langage de programmation, pour l'exploitation des mesures dans le cadre d'un réacteur fermé parfaitement agité.

La modélisation microscopique par le biais des mécanismes réactionnels est présentée lors des premières synthèses en chimie organique (paragraphe 2.3). Elle est approfondie ultérieurement avec une approche plus exhaustive des mécanismes et leur validation par confrontation des lois de vitesse issues du modèle et des résultats expérimentaux (en partie 3).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Cinétique en réacteur fermé de composition uniforme</b>            Vitesses volumiques de consommation d'un réactif et de formation d'un produit.            Vitesse de réaction pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique (supposée sans accumulation d'intermédiaires).</p>	<p>Relier la vitesse de réaction, dans les cas où elle est définie, à la vitesse volumique de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit.</p>
<p>Lois de vitesse : réactions sans ordre, réactions avec ordre simple (0, 1, 2), ordre global, ordre apparent.            Temps de demi-vie d'un réactif, temps de demi-réaction.</p>	<p><b>Établir une loi de vitesse à partir du suivi temporel d'une grandeur physique.</b></p> <p>Exprimer, pour une transformation modélisée par une seule réaction chimique, la loi de vitesse si la réaction chimique admet un ordre et déterminer la valeur de la constante de vitesse à une température donnée.            Déterminer la vitesse de réaction à différentes dates en utilisant une méthode numérique ou graphique.            Déterminer un ordre de réaction à l'aide de la méthode différentielle ou à l'aide des temps de demi-réaction.            Confirmer la valeur d'un ordre par la méthode intégrale, en se limitant strictement à une décomposition d'ordre 0, 1 ou 2 d'un unique réactif, ou se ramenant à un tel cas par dégénérescence de l'ordre ou conditions initiales stœchiométriques.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation ou d'un logiciel dédié, et à partir de données expérimentales, tracer l'évolution temporelle d'une concentration, d'une vitesse volumique de formation ou de consommation, d'une vitesse de réaction et tester une loi de vitesse donnée.</p>

Loi empirique d'Arrhenius ; énergie d'activation.	<b>Déterminer l'énergie d'activation d'une réaction chimique.</b> Déterminer la valeur de l'énergie d'activation d'une réaction chimique à partir de valeurs de la constante cinétique à différentes températures.
Facteurs concentration et température en stratégie de synthèse et d'analyse : dilution, chauffage, reflux, trempé.	Reconnaître, dans un protocole, des opérations visant à augmenter ou à diminuer une vitesse de réaction.

## 2. Relations entre structure des entités chimiques, propriétés physiques et réactivité

Décrivant la matière au niveau macroscopique par des espèces chimiques aux propriétés physiques et chimiques caractéristiques, les chimistes la modélisent au niveau microscopique par des entités chimiques dont les structures électroniques et géométriques permettent d'interpréter et de prévoir certaines de ces propriétés.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- utiliser le tableau périodique des éléments pour déterminer ou justifier des structures d'entités et des propriétés microscopiques (polarité, polarisabilité, amphiphilie, nucléophilie, électrophilie)
- s'approprier les outils de description des entités chimiques et leur complémentarité dans la description des interactions intermoléculaires ;
- relier structure et propriétés microscopiques aux grandeurs et comportements macroscopiques (cohésion, solubilité, miscibilité, températures de changement d'état, tensioactivité) ;
- appréhender la notion de solvant, de tensioactif, d'émulsion au niveau microscopique à travers les interactions intermoléculaires et au niveau macroscopique par leur utilisation au laboratoire, dans l'industrie et dans la vie courante ;
- maîtriser et utiliser différentes représentations schématiques d'une entité chimique ;
- pratiquer un raisonnement qualitatif argumenté pour expliquer le choix d'un mécanisme réactionnel en synthèse organique.

### 2.1. Structure des entités chimiques

L'étude de la constitution de la matière s'appuie sur le tableau périodique des éléments, outil essentiel des chimistes, dans l'objectif de développer progressivement les compétences relatives à l'utilisation des informations qu'il contient pour prévoir, dans cette partie, le nombre de liaisons d'un atome et la nature (polaire, ionique) des liaisons chimiques.

En première année, on se limite au modèle de Lewis de la liaison covalente localisée et délocalisée pour rendre compte des structures et propriétés des entités chimiques ; le modèle quantique de la liaison avec les orbitales atomiques et moléculaires est abordé uniquement en seconde année.

Le modèle de Lewis permet, pour les entités chimiques organiques, d'introduire les notions d'isomérisation de configuration et de conformation. Les ordres de grandeur des énergies de liaison et de la barrière conformationnelle permettent de sensibiliser à la solidité et à la flexibilité des édifices moléculaires.

Sans donner lieu à une étude systématique, la nomenclature IUPAC s'enrichit au fur et à mesure des besoins pour représenter une entité chimique organique à partir de son nom, en tenant compte de la donnée d'éventuelles informations stéréochimiques et en utilisant un type de représentation donné.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Modèle de Lewis de la liaison covalente</b> Liaison covalente localisée ; longueur et énergie de la liaison covalente. Schéma de Lewis d'une molécule ou d'un ion monoatomique ou polyatomique (étude limitée aux éléments des blocs s et p).</p>	<p>Citer l'ordre de grandeur de longueurs et d'énergies de liaison covalente. Déterminer, pour les éléments des blocs s et p, le nombre d'électrons de valence d'un atome à partir de la position de l'élément dans le tableau périodique. Citer les éléments des périodes 1 à 3 du tableau périodique (nom, symbole, numéro atomique). Établir un ou des schémas de Lewis pertinent(s) pour une molécule ou un ion.</p>
<p>Liaison covalente délocalisée : mésomérie.</p>	<p>Identifier et représenter les enchaînements donnant lieu à une délocalisation électronique. Mettre en évidence une éventuelle délocalisation électronique à partir de données expérimentales.</p>
<p><b>Géométrie et polarité des entités chimiques</b> Structure géométrique d'une molécule ou d'un ion polyatomique. Modèle VSEPR.  Représentation de Cram.</p>	<p>Associer qualitativement la géométrie d'une entité à la minimisation de son énergie. Prévoir et interpréter les structures de type AX<sub>n</sub> avec n ≤ 4 et AX<sub>p</sub>E<sub>q</sub>, avec p+q = 3 ou 4.</p>
<p>Électronégativité : liaison polarisée, moment dipolaire, molécule polaire.</p>	<p>Comparer les électronégativités de deux atomes à partir de données ou de leurs positions dans le tableau périodique. Prévoir la polarisation d'une liaison à partir des électronégativités comparées des deux atomes mis en jeu. Relier l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent à la structure géométrique d'une molécule. Déterminer direction et sens du vecteur moment dipolaire d'une liaison ou d'une molécule.</p>
<p><b>Structure des entités chimiques organiques</b> Isomérisation de constitution. Stéréoisomérisation de conformation en série aliphatique non cyclique ; ordre de grandeur de la barrière conformationnelle. Représentation de Newman. Représentation topologique.</p>	<p>Comparer la stabilité de plusieurs conformations. Interpréter la stabilité d'un conformère donné.</p>
<p>Stéréoisomérisation de configuration : chiralité, énantiomérisation, diastéréoisomérisation descripteurs stéréochimiques R, S, Z, E.</p>	<p>Attribuer les descripteurs stéréochimiques aux centres stéréogènes. Déterminer la relation d'isomérisation entre deux isomères. Représenter une entité chimique organique à partir de son nom, fourni en nomenclature systématique, en tenant compte de la donnée d'éventuelles informations stéréochimiques, en utilisant un type de représentation donné.</p>

Activité optique, pouvoir rotatoire, loi de Biot.	Relier la valeur du pouvoir rotatoire à la composition d'un mélange de stéréoisomères.  <b>Déterminer la composition d'un système chimique ou suivre une transformation chimique en utilisant l'activité optique.</b>
Séparation de diastérisomères et d'énantiomères.	Citer des analogies et différences de propriétés entre des diastérisomères et des énantiomères. Reconnaitre des protocoles de séparation de stéréoisomères.

## 2.2. Relations entre structure des entités et propriétés physiques macroscopiques

L'étude des interactions entre entités a pour objectif d'interpréter, de prévoir ou de comparer certaines propriétés physiques : température de changement d'état, miscibilité, solubilité, formation de micelles, d'émulsions.

De nombreuses illustrations et applications dans la vie courante ou au niveau du laboratoire (choix de solvant pour les synthèses ou les extractions) ou dans le domaine du vivant (double couche et solubilisation des médicaments) peuvent être proposées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Interactions entre entités</b> Interactions de van der Waals, polarisabilité. Liaison hydrogène (interaction par pont hydrogène). Ordres de grandeur énergétiques des interactions entre entités.	Lier la polarisabilité d'un atome à sa position dans le tableau périodique. Lier qualitativement la valeur des énergies d'interactions intermoléculaires à la polarité et la polarisabilité des molécules.
<b>Changements d'état</b> Température de changement d'état de corps purs moléculaires.	Prévoir ou interpréter les températures de changement d'état de corps purs moléculaires par l'existence d'interactions de van der Waals ou de liaisons hydrogène.
<b>Solubilité, miscibilité</b> Grandeurs caractéristiques et propriétés de solvants moléculaires : moment dipolaire, permittivité relative, caractère protogène. Mise en solution d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.	Associer une propriété d'un solvant moléculaire à une ou des grandeurs caractéristiques. Interpréter la miscibilité totale, partielle ou nulle de deux solvants. Interpréter la solubilité d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.
Séparation d'espèces d'un mélange : extraction par solvant, dissolution, précipitation, lavage. Constante de partage, log P.	<b>Déterminer une constante de partage. Réaliser une extraction, un lavage et les interpréter en termes de solubilité, miscibilité, constante de partage, ou log P.</b>
<b>Amphiphilie</b> Espèces chimiques amphiphiles, micelles, structure schématique des membranes cellulaires.	Prévoir le caractère amphiphile d'une entité à partir de sa structure. Interpréter la structure d'une association d'entités amphiphiles (micelle, bicouche, membrane cellulaire). Comparer et interpréter, en lien avec la structure des entités, les propriétés physiques d'espèces chimiques amphiphiles (concentration micellaire critique, solubilité).

Émulsions.	Décrire la structure d'une émulsion en distinguant phase dispersée et phase continue. Interpréter les propriétés détergentes ou émulsifiantes des espèces chimiques amphiphiles.
------------	---

### 2.3. Réactivité des espèces organiques et premières applications en synthèse

L'objectif de cette partie est d'aborder les premières synthèses organiques en interprétant les transformations chimiques associées à partir de la réactivité des espèces organiques mises en jeu, réactivité déduite de la structure et des propriétés des entités chimiques qui les composent ; pour ce qui concerne les propriétés acido-basiques, une table de  $pK_a$  sera systématiquement fournie.

Les premières modélisations, au niveau microscopique, des transformations chimiques par un mécanisme réactionnel sont établies sur des exemples simples faisant intervenir des entités nucléophiles et électrophiles, acides et basiques. Ces modélisations permettent de rendre compte de modifications de groupes caractéristiques (substitution, élimination, addition) et de chaînes carbonées, ainsi que de propriétés cinétiques ou stéréochimiques.

Les modèles mécanistiques et le modèle du complexe activé sont introduits sur des exemples de transformations s'appuyant, dans un premier temps, sur les halogénoalcane, mais dans le but d'une maîtrise permettant un réinvestissement à d'autres groupes caractéristiques.

L'approche mécanistique est privilégiée à l'approche fonctionnelle pour favoriser le raisonnement et la transférabilité dans des situations analogues et pour commencer à engager la réflexion sur les stratégies de synthèse.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Réactivité des espèces organiques et écriture des mécanismes réactionnels</b></p> <p>Conséquences de la structure sur la réactivité : nucléophile, électrophile.</p>	<p>Identifier les sites électrophiles et/ou nucléophiles d'une entité chimique.</p>
<p>Modélisation microscopique d'une transformation : mécanisme réactionnel, acte élémentaire, molécularité, complexe activé, intermédiaire réactionnel.</p>	<p>Distinguer l'équation chimique symbolisant une réaction chimique de l'équation traduisant un acte élémentaire.</p> <p>Distinguer un intermédiaire réactionnel d'un complexe activé.</p> <p>Tracer et commenter un profil énergétique correspondant à un acte élémentaire ou à plusieurs actes élémentaires successifs.</p> <p>Donner la loi de vitesse d'une réaction se déroulant en un seul acte élémentaire.</p>
<p>Interprétation microscopique de l'influence des facteurs cinétiques.</p>	<p>Interpréter l'influence des concentrations et de la température sur la vitesse d'un acte élémentaire, en termes de fréquence et d'efficacité des chocs entre entités.</p>
<p>Formalisme des flèches courbes.</p>	<p>Utiliser le formalisme des flèches courbes pour rendre compte d'un acte élémentaire et le relier aux caractères nucléophile et électrophile des entités.</p>
<p><b>Synthèse organique en laboratoire</b></p> <p>Déroulement expérimental d'une synthèse organique : étapes de transformation, de séparation, de purification et de caractérisation. Détermination du rendement.</p>	<p><b>Mettre en œuvre un protocole expérimental sur un exemple simple et représentatif d'une synthèse organique en laboratoire. Justifier et réaliser les différentes étapes de cette synthèse.</b></p>

<p><b>Modifications de groupe caractéristique : exemple des halogénoalcanes</b></p> <p>Substitution nucléophile aliphatique : mécanismes limites <math>S_N2</math> et <math>S_N1</math> ; propriétés cinétiques et stéréochimiques.</p>	<p>Justifier le choix d'un mécanisme limite <math>S_N2</math> ou <math>S_N1</math> par des facteurs structuraux des réactifs et par des résultats expérimentaux sur la stéréochimie des produits ou sur la loi de vitesse de la réaction. Prévoir ou analyser la stéréosélectivité ou la stéréospécificité éventuelle d'une substitution nucléophile.</p> <p>Interpréter des différences de réactivité en termes de polarisabilité.</p> <p>Utiliser le postulat de Hammond pour interpréter l'influence de la stabilité du carbocation sur la vitesse d'une <math>S_N1</math>.</p>
<p><math>\beta</math>-élimination ; mécanisme limite E2, propriétés stéréochimiques, régiosélectivité.</p>	<p>Prévoir ou analyser la régiosélectivité, la stéréosélectivité et la stéréospécificité éventuelle d'une <math>\beta</math>-élimination sur un halogénoalcane acyclique.</p> <p>Interpréter la formation de produits indésirables par la compétition entre les réactions de substitution et d'élimination.</p>
<p><b>Construction du squelette carboné : synthèse et utilisation d'organomagnésiens mixtes</b></p> <p>Organomagnésiens mixtes : propriétés nucléophiles ; préparation à partir des espèces halogénées ; inversion de polarité (Umpolung) lors de l'insertion du magnésium ; intérêt des organométalliques dans la construction d'une chaîne carbonée.</p> <p>Addition nucléophile, sur l'exemple des réactions entre un organomagnésien mixte et un aldéhyde, une cétone ou le dioxyde de carbone : mécanisme.</p>	<p>Déterminer le produit formé lors de la réaction d'un organomagnésien mixte sur un aldéhyde, une cétone ou le dioxyde de carbone et inversement, prévoir les réactifs utilisés lors de la synthèse magnésienne d'un alcool ou d'un acide carboxylique.</p> <p><b>Décrire et mettre en œuvre un protocole de préparation d'un organomagnésien mixte et de son utilisation pour créer une liaison carbone-carbone. Justifier les étapes et conditions expérimentales, y compris l'hydrolyse terminale.</b></p>



## Second Semestre PCSI Option PC

### 3. Transformations de la matière : évolution d'un système et mécanisme réactionnel

La modélisation, au niveau microscopique, des transformations chimiques développe plus avant les mécanismes réactionnels et notamment les aspects cinétiques microscopiques et macroscopiques en introduisant les notions d'étape cinétiquement déterminante et d'approximation des états quasi-stationnaires pour des intermédiaires réactionnels. Des approches numériques sont privilégiées par rapport aux calculs analytiques pour illustrer ces notions, ainsi que celles de contrôles cinétique et thermodynamique.

Introduit expérimentalement, l'effet catalytique est modélisé, au niveau microscopique, par un nouveau mécanisme réactionnel concurrent présentant des étapes souvent plus nombreuses et plus rapides. L'étude de la catalyse enzymatique est illustrée par des exemples dans le domaine du vivant et du biomimétisme et permet de réinvestir les structures et interactions entre entités.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Modélisation microscopique d'une transformation chimique</b></p> <p>Modélisation d'une transformation par deux actes élémentaires opposés, état d'équilibre d'un système.</p> <p>Modélisation d'une transformation par un mécanisme constitué par plusieurs actes élémentaires successifs ; étape cinétiquement déterminante, approximation de l'état quasi-stationnaire, équilibre rapidement établi, loi de vitesse associée.</p>	<p>Relier la constante thermodynamique d'équilibre aux constantes de vitesse dans le cas d'une transformation modélisée par deux actes élémentaires opposés.</p> <p><b>Capacité numérique</b> : établir un système d'équations différentielles et le résoudre numériquement afin de visualiser l'évolution temporelle des concentrations et de leurs dérivées dans le cas d'un mécanisme à deux actes élémentaires successifs. Mettre en évidence l'étape cinétiquement déterminante ou l'approximation de l'état quasi-stationnaire d'un intermédiaire réactionnel.</p> <p>Reconnaître, à partir d'informations fournies, l'étape cinétiquement déterminante d'un mécanisme ou les conditions d'utilisation de l'approximation de l'état quasi-stationnaire d'un intermédiaire réactionnel.</p> <p>Établir la loi de vitesse de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit à partir d'un mécanisme réactionnel simple et d'informations fournies.</p>
<p>Contrôle cinétique, contrôle thermodynamique.</p>	<p>Reconnaître les paramètres qui favorisent la formation d'un produit dans le cas de deux réactions compétitives.</p> <p><b>Capacité numérique</b> : établir un système d'équations différentielles et le résoudre numériquement, avec un langage de programmation, afin de visualiser l'évolution des concentrations au cours du temps pour mettre en évidence les situations de contrôle cinétique ou thermodynamique.</p>
<p><b>Catalyse</b></p> <p>Catalyse d'une transformation, intervention du catalyseur dans le mécanisme réactionnel, sélectivité.</p>	<p>Reconnaître un effet catalytique dans un mécanisme réactionnel ou sur un profil énergétique.</p> <p>Reconnaître un effet de sélectivité par action d'un</p>

	catalyseur.
Catalyse enzymatique, site actif d'une enzyme, complexe enzyme-substrat.	Établir la loi de vitesse de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit à partir d'un mécanisme de catalyse enzymatique fourni. Identifier, à partir d'informations structurales, les interactions mises en jeu entre le site actif d'une enzyme et son substrat et interpréter le rôle catalytique de l'enzyme.

#### 4. Structures microscopiques et propriétés physiques des solides

Les modèles de description microscopique des solides sont présentés à partir de l'observation de différents solides cristallisés que le professeur est libre de choisir et de la prise en compte des propriétés macroscopiques de ces solides. L'introduction du modèle du cristal parfait se fait sur l'exemple de la maille cubique à faces centrées (CFC), seule maille dont la connaissance est exigible ; l'ensemble des notions associées à cette première étude est réinvesti pour étudier d'autres structures cristallines dont la constitution est alors fournie.

L'objectif principal de l'étude des cristaux métalliques, covalents et ioniques est d'aborder une nouvelle fois la notion de modèle : les allers-retours entre le niveau macroscopique (solides de différentes natures) et la modélisation microscopique (cristal parfait) permettent de montrer les limites du modèle du cristal parfait et de confronter les prédictions faites par ce modèle aux valeurs expérimentales mesurées sur le solide réel (distances internucléaires et interatomiques, masse volumique, etc.). Ce chapitre constitue une occasion de revenir sur les positions relatives des éléments dans le tableau périodique, en lien avec la nature des interactions assurant la cohésion des édifices présentés, ainsi que sur les interactions intermoléculaires et la notion de solubilisation pour les solides ioniques et moléculaires.

Une réflexion sur les modèles conduisant à la détermination des différents types de rayons à partir des méthodes expérimentales d'analyse des structures des solides peut être proposée.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- relier la position d'un élément dans le tableau périodique et la nature des interactions entre les entités correspondantes dans un solide ;
- effectuer des liens entre différents champs de connaissance ;
- appréhender la notion de limite d'un modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Modèle du cristal parfait</b> Solides amorphes, cristallins, semi-cristallins, polycristallins ; variétés allotropiques.</p> <p>Description du modèle du cristal parfait ; population, coordinence, compacité, masse volumique.</p>	<p><b>Illustrer l'influence des conditions expérimentales sur la formation de solides et de solides cristallins.</b></p> <p>Décrire un cristal parfait comme un assemblage de mailles parallélépipédiques. Déterminer la population, la coordinence et la compacité pour une structure fournie. Déterminer la valeur de la masse volumique d'un matériau cristallisé selon une structure cristalline fournie.</p>
<p>Rayons métallique, covalent, de van der Waals ou ionique et évolution dans le tableau périodique.</p>	<p>Relier le rayon métallique, covalent, de van der Waals ou ionique, selon le cas, aux paramètres d'une maille donnée. Citer l'ordre de grandeur de ces rayons.</p>

<p>Modèles d'empilement compact de sphères identiques.</p> <p>Maille conventionnelle CFC et ses sites interstitiels.</p>	<p><b>Utiliser un logiciel ou des modèles cristallins pour visualiser des mailles et des sites interstitiels et pour déterminer des paramètres géométriques.</b></p> <p>Localiser les interstices tétraédriques et octaédriques entre les plans d'empilement.</p> <p>Localiser et dénombrer les sites tétraédriques et octaédriques d'une maille CFC et déterminer leur habitabilité.</p>
<p>Limites du modèle du cristal parfait.</p>	<p>Confronter des données expérimentales aux prévisions du modèle.</p>
<p><b>Métaux et alliages</b> Cohésion et propriétés physiques des métaux.</p>	<p>Positionner dans le tableau périodique et reconnaître métaux et non métaux.</p> <p>Relier les caractéristiques de la liaison métallique (ordre de grandeur énergétique, non directionnalité) aux propriétés macroscopiques des métaux.</p>
<p>Alliages de substitution et d'insertion.</p>	<p>Citer des exemples d'alliage et leur intérêt par rapport à des métaux purs.</p> <p>Prévoir la possibilité de réaliser des alliages de substitution ou d'insertion selon les caractéristiques des atomes mis en jeu.</p>
<p><b>Solides covalents et moléculaires</b> Cohésion et propriétés physiques des solides covalents et moléculaires.</p>	<p>Identifier les liaisons covalentes, les interactions de van der Waals et les liaisons hydrogène dans un cristal de structure donnée.</p> <p>Relier les caractéristiques des liaisons covalentes, des interactions de van der Waals et des liaisons hydrogène (directionnalité ou non, ordre de grandeur des énergies mises en jeu) et les propriétés macroscopiques des solides correspondants.</p> <p>Comparer les propriétés macroscopiques du diamant et du graphite et interpréter les différences en relation avec les structures microscopiques (structures cristallines fournies).</p>
<p><b>Solides ioniques</b> Cohésion et propriétés physiques des solides ioniques.</p> <p>Rayon ionique.</p>	<p>Relier les caractéristiques de l'interaction ionique dans le cadre du modèle du solide ionique parfait (ordre de grandeur de l'énergie d'interaction, non directionnalité, charge localisée) avec les propriétés macroscopiques des solides ioniques.</p> <p>Comparer le rayon d'un atome et ceux de ses ions.</p> <p>Associer la tangence anion-cation et la non tangence anion-anion, dans une structure cubique de type AB fournie, à la valeur du paramètre de maille.</p>

## 5. Transformations chimiques en solution aqueuse

Les transformations chimiques en solution aqueuse jouent un rôle essentiel en chimie, en biochimie, dans le domaine du vivant et dans les procédés industriels. Un nombre considérable de développements technologiques et d'analyses environnementales (traitement des eaux, méthodes d'analyse, extraction d'ions métalliques des minerais, générateurs électrochimiques, lutte contre la corrosion, etc.) repose sur des transformations modélisées par des réactions acide-base, de solubilisation-précipitation et d'oxydo-réduction en solution aqueuse dont la maîtrise est importante pour prévoir, interpréter et optimiser les

phénomènes mis en jeu.

L'objectif de cette partie est donc de présenter différents types de réactions susceptibles d'intervenir en solution aqueuse, d'en déduire des diagrammes de prédominance ou d'existence d'espèces chimiques, notamment des diagrammes potentiel-pH, et de les utiliser comme outil de prévision et d'interprétation des transformations chimiques quel que soit le milieu donné. Les conventions de tracé de ces diagrammes seront toujours précisées.

Les choix pédagogiques relatifs au contenu des séances de travail expérimental permettront de contextualiser ces enseignements. Les dosages par titrage sont étudiés exclusivement en travaux pratiques. L'analyse des conditions choisies ou la réflexion conduisant à une proposition de protocole expérimental pour atteindre un objectif donné constituent des mises en situation des enseignements évoqués précédemment. Ces séances de travail expérimental constituent une nouvelle occasion d'aborder qualité et précision de la mesure.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être par la suite valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- modéliser ou simplifier un problème complexe ;
- utiliser différents outils graphiques, numériques, analytiques ;
- repérer les informations ou paramètres importants pour la résolution d'un problème.

### 5.1. Réactions acide-base et de précipitation

Ces différentes transformations en solution aqueuse sont abordées en montrant qu'elles constituent des illustrations de l'évolution des systèmes chimiques introduites au premier semestre, les étudiant-es étant amené-es à déterminer l'état final d'un système en transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique. On montrera qu'il est ainsi possible d'analyser et de simplifier une situation complexe pour parvenir à la décrire rigoureusement et quantitativement, en l'occurrence dans le cas des solutions aqueuses, par une seule réaction. Il est cependant important de noter qu'on évite tout calcul inutile de concentration, en privilégiant l'utilisation des diagrammes pour valider le choix de la réaction mise en jeu. Dans ce cadre, aucune formule de calcul de pH n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Réactions acide-base</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante d'acidité <math>K_a</math> ; constante d'acidité des deux couples de l'eau à 298 K.</li> <li>- diagramme de prédominance, de distribution ;</li> <li>- exemples usuels d'acides et bases : nom, formule et caractère – faible ou fort – des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, acétique, du dioxyde de carbone aqueux, de la soude, la potasse, l'ion hydrogénocarbonate, l'ion carbonate, l'ammoniac ;</li> <li>- solutions tampons.</li> </ul> <p><b>Réactions de dissolution ou de précipitation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- réaction de dissolution, constante de solubilité <math>K_s</math> ;</li> <li>- solubilité et condition de précipitation ;</li> <li>- domaine d'existence ;</li> <li>- facteurs influençant la solubilité.</li> </ul>	<p>Reconnaître une réaction acide-base à partir de son équation.</p> <p>Écrire l'équation de la réaction modélisant une transformation en solution aqueuse en tenant compte des caractéristiques du milieu réactionnel (nature des espèces chimiques en présence, pH) et des observations expérimentales.</p> <p>Utiliser des tables pour extraire les données thermodynamiques pertinentes pour étudier un système en solution aqueuse.</p> <p>Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques sont connues.</p> <p>Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p>Prévoir l'état de saturation ou de non saturation d'une solution.</p> <p>Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.</p> <p>Retrouver les valeurs de constantes</p>

	<p>thermodynamiques d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance (et réciproquement). Exploiter des courbes d'évolution de la solubilité d'un solide en fonction d'une variable.</p> <p><b>Capacité numérique</b> : tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le diagramme de distribution des espèces d'un ou plusieurs couple(s) acide-base, ou d'espèces impliquées dans une réaction de précipitation.</p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction acide-base et une réaction de précipitation pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse.</b></p> <p><b>Illustrer un procédé de retraitement ou de recyclage ou de séparation en solution aqueuse.</b></p>
--	--

## 5.2. Réactions d'oxydo-réduction

L'analyse de transformations mettant en jeu des oxydants et réducteurs usuels et des piles permettent d'aborder les différents concepts associés aux phénomènes d'oxydo-réduction en solution aqueuse. La relation de Nernst (admise en première année) ainsi que la relation entre la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction et les potentiels standard permettent de prévoir l'évolution des systèmes et le caractère favorisé des transformations.

Afin de pouvoir étudier l'influence du milieu sur les espèces oxydantes ou réductrices présentes, les acquis sur les réactions acido-basiques et de précipitation en solution aqueuse sont réinvestis.

Enfin, les diagrammes potentiel-pH sont présentés puis superposés pour prévoir ou interpréter thermodynamiquement des transformations chimiques, la confrontation avec la réalité amenant à aborder éventuellement des blocages cinétiques en lien avec l'évolution temporelle des systèmes étudiée au premier semestre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Oxydants et réducteurs, réactions d'oxydo-réduction</b></p> <p>Nombre d'oxydation. Exemples d'oxydants et de réducteurs minéraux usuels : nom et formule des ions thiosulfate, permanganate, hypochlorite, du dichlore, du peroxyde d'hydrogène, du dioxygène, du dihydrogène, des métaux.</p>	<p>Lier la position d'un élément dans le tableau périodique et le caractère oxydant ou réducteur du corps simple correspondant. Prévoir les nombres d'oxydation extrêmes d'un élément à partir de sa position dans le tableau périodique. Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple.</p>
<p>Pile, tension à vide, potentiel d'électrode, potentiel standard, formule de Nernst, électrodes de référence.</p>	<p>Décrire le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode. Déterminer la capacité électrique d'une pile.</p> <p><b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement.</b></p>
<p>Diagrammes de prédominance ou d'existence. Aspect thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction. Dismutation et médiamentation.</p>	<p>Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires. Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples.</p>

	<b>Mettre en œuvre une réaction d'oxydo-réduction pour réaliser une analyse quantitative en solution aqueuse.</b>
<b>Diagramme potentiel-pH</b> Principe de construction, lecture et utilisation d'un diagramme potentiel-pH.  Diagramme potentiel-pH de l'eau.	Associer les différents domaines d'un diagramme potentiel-pH fourni à des espèces chimiques données. Déterminer, par le calcul, la valeur de la pente d'une frontière d'un diagramme potentiel-pH. Justifier la position d'une frontière verticale dans un diagramme potentiel-pH. Prévoir le caractère thermodynamiquement favorisé ou non d'une transformation par superposition de diagrammes potentiel-pH. Discuter de la stabilité des espèces dans l'eau. Prévoir une éventuelle dismutation ou médiamutation en fonction du pH du milieu. Confronter les prévisions à des données expérimentales et interpréter d'éventuels écarts en termes cinétiques.  <b>Mettre en œuvre des réactions d'oxydo-réduction en s'appuyant sur l'utilisation d'un diagramme potentiel-pH.</b>

## 6. Réactivité, transformations en chimie organique et stratégie de synthèse

Les objectifs de cette deuxième partie de programme en chimie organique sont doubles :

- d'une part, réinvestir ou compléter les connaissances et compétences autour des interconversions entre groupes caractéristiques, notamment par des réactions d'oxydo-réduction et de modifications de chaînes ;
- d'autre part, enrichir les apports concernant la synthèse d'espèces chimiques organiques en introduisant les notions de protection de groupes caractéristiques et d'activation *in situ* (protonation) ou par synthèse préalable d'une espèce plus réactive.

L'ensemble permet d'amener les étudiant·es à pouvoir conduire une véritable réflexion sur la stratégie de synthèse à travers l'analyse de la réactivité comparée des espèces chimiques et à interpréter la nature et l'ordre des étapes mises en œuvre dans le cas d'une synthèse multi-étapes. Pour ce qui concerne l'élaboration d'une synthèse multi-étapes par les étudiant·es eux-mêmes, elle peut se faire en autonomie à l'aide d'une banque de réactions (réactiothèque) fournie ou à l'aide des réactions qui figurent explicitement au programme. Les équations des réactions indiquées dans la colonne de gauche (substitutions nucléophiles,  $\beta$ -éliminations, additions nucléophiles) doivent être connues et seuls les mécanismes explicitement inscrits sont exigibles et doivent pouvoir être écrits sans information supplémentaire.

Si la construction du programme privilégie ici une approche liée à stratégie de synthèse, elle n'entrave évidemment pas la liberté pédagogique des enseignant·es dans le choix de leur présentation et de leur progression.

À travers les contenus et les capacités exigibles sont développées des compétences qui pourront être par la suite valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- analyser des problèmes de complexité croissante ;
- identifier dans une situation complexe la partie utile au raisonnement ;
- proposer une stratégie d'adaptation ou de contournement pour résoudre un problème.

### 6.1. Techniques spectroscopiques de caractérisation

La spectroscopie d'absorption UV-visible a déjà été mise en œuvre au cours du premier semestre pour suivre l'évolution d'un système chimique. Elle est enrichie par la spectroscopie IR utilisée pour identifier des liaisons ou groupes caractéristiques présents dans une entité analysée. Les absorptions de ces différents rayonnements électromagnétiques sont associées à la nature des transitions entre niveaux d'énergie dans l'entité et aux caractéristiques des liaisons.

À propos de la spectroscopie de RMN du proton, aucun développement sur son principe n'est attendu, seule l'analyse des spectres de RMN <sup>1</sup>H est à effectuer pour confirmer la structure d'entités données ou pour identifier des produits de réactions.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Spectroscopies d'absorption UV-visible et infrarouge</b> Nature des transitions associées aux spectroscopies UV-visible et infrarouge, domaine du spectre des ondes électromagnétiques correspondant. Transmittance, absorbance.	Relier la longueur d'onde du rayonnement absorbé à l'énergie de la transition associée. Relier la fréquence du rayonnement IR absorbé aux caractéristiques de la liaison dans le cadre du modèle classique de l'oscillateur harmonique. Identifier, à partir du spectre infrarouge et de tables de nombres d'onde de vibration, une liaison ou un groupe caractéristique dans une molécule organique.
<b>Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire du proton</b> Notions de déplacement chimique, de constante de couplage, d'intégration. Couplages du premier ordre $A_m X_p$ et $A_m M_p X_q$ .	Interpréter ou prévoir l'allure d'un massif à partir de l'étude des couplages. Confirmer la structure d'une entité à partir de données spectroscopiques infrarouge et/ou de résonance magnétique nucléaire du proton, les tables de nombres d'onde caractéristiques ou de déplacements chimiques étant fournies. Déterminer la structure d'une entité à partir de données spectroscopiques et du contexte de formation de l'espèce chimique dans une synthèse organique. Valider la sélectivité d'une transformation à partir de données spectroscopiques. Déterminer à partir des intégrations les proportions de deux constituants d'un mélange.

### 6.2. Réactions d'oxydo-réduction en chimie organique

En synthèse organique, aucun oxydant ou réducteur n'est à connaître mis à part le tétrahydroborate de sodium. Pour autant, il est attendu que les exemples étudiés portent sur des transformations réelles pour lesquelles seront fournies les conditions expérimentales associées, ce afin de développer une bonne culture chimique chez les étudiant-es.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Niveau d'oxydation des espèces organiques</b> Les groupes caractéristiques et leur niveau d'oxydation.	Identifier, le cas échéant, une conversion d'espèce organique comme un processus d'oxydation ou de réduction et associer les demi-équations électroniques correspondantes.
<b>Un exemple d'interconversion entre groupes caractéristiques : du groupe hydroxyalkyle au groupe carbonyle et</b>	Déterminer le ou les produits d'oxydation d'un

<p><b>inversement</b> Oxydation des alcools selon leur classe ; principe de l'oxydation contrôlée des alcools primaires.</p> <p>Réduction du groupe carbonyle des aldéhydes et cétones en alcools par action du tétrahydroborate de sodium : mécanisme réactionnel en modélisant l'ion tétrahydroborate comme un ion hydrure.</p>	<p>alcool selon sa classe. Identifier le produit d'oxydation d'un alcool primaire à l'aide de données expérimentales ou spectroscopiques.</p> <p>Analyser à l'aide de données expérimentales la chimiosélectivité de réducteurs dans le cadre d'une stratégie de synthèse.</p>
---	--

### 6.3. Activation de groupes caractéristiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Activation nucléophile des alcools et phénols</b> Formation d'alcoolates par réaction acide-base ou d'oxydo-réduction.</p>	<p>Comparer la nucléophilie d'alcools de différentes classes à l'aide d'arguments stériques. Comparer la nucléophilie d'un alcool et de sa base conjuguée. Choisir une base pour déprotomer un alcool ou un phénol à partir d'une échelle de <math>pK_a</math>.</p>
<p>Synthèse d'éther-oxyde par la méthode de Williamson ; mécanisme réactionnel.</p>	<p>Proposer une voie de synthèse d'un éther-oxyde dissymétrique. Interpréter la formation de produits indésirables par la compétition entre les réactions de substitution et d'élimination.</p>
<p><b>Activation électrophile des alcools</b> Activation des alcools <i>in situ</i> par protonation :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- déshydratation acido-catalysée d'un alcool tertiaire ; régiosélectivité et stéréosélectivité éventuelles, mécanisme limite E1 ; compétition substitution-élimination dans le cas des alcools secondaires et tertiaires ;</li> <li>- conversion d'un alcool en halogénoalcane par action d'une solution concentrée d'halogénure d'hydrogène, mécanismes limites.</li> </ul> <p>Formation et réactivité d'esters sulfoniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- conversion d'un alcool en ester sulfonique ;</li> <li>- formation d'alcène par élimination sur un ester sulfonique, mécanisme ;</li> <li>- formation d'espèces chimiques par substitution nucléophile sur un ester sulfonique ; mécanisme.</li> </ul>	<p>Comparer les réactivités des liaisons carbone-hétéroatome dans le cas des halogénoalcane, des alcools, des esters sulfoniques et des ions alkyloxonium.</p> <p>Prévoir les produits pouvant se former lors de la déshydratation d'un alcool, indiquer le ou les produits majoritaires.</p> <p>Commenter dans une synthèse multi-étapes le choix d'une activation <i>in situ</i> par protonation ou par passage par un tosylate ou un mésylate d'alkyle.</p>
<p><b>Activation électrophile du groupe carbonyle</b> Acétalisation des aldéhydes et des cétones : conditions expérimentales (APTS, appareil de Dean-Stark), mécanisme limite de l'acétalisation en milieu acide.</p>	<p>Expliquer qualitativement l'augmentation de l'électrophilie du groupe carbonyle par protonation.</p>
<p>Hémiacétalisation acido-catalysée du glucose, mécanisme limite.</p>	<p>Discuter la régiosélectivité de la réaction d'hémiacétalisation du glucose. Interpréter l'isomérisation du glucopyranose par le caractère renversable de l'hémiacétalisation.</p>



**6.4. Protection de groupes caractéristiques et stratégie de synthèse**

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Protection-déprotection</b> Protection-déprotection du groupe carbonyle des aldéhydes et cétones par un diol ; conditions expérimentales, mécanisme de l'hydrolyse acide.</p> <p>Protection-déprotection du groupe hydroxyle : utilisation d'une banque de réactions fournie.</p>	<p>Justifier la nécessité de protéger un groupe caractéristique dans une synthèse multi-étapes. Identifier les étapes de protection et de déprotection d'un groupe carbonyle, d'un groupe hydroxyle ou d'un diol dans une synthèse multi-étapes.</p> <p>Proposer ou justifier, à partir d'une banque de réactions fournie, une méthode adaptée de protection du groupe hydroxyle. Analyser une synthèse multi-étapes en termes de stratégie de synthèse : ordre des étapes, protection de groupes caractéristiques.</p>
<p><b>Approche élémentaire de l'analyse rétrosynthétique</b> Schéma rétrosynthétique.</p>	<p>Proposer, à partir d'un schéma rétrosynthétique simple donné, une voie de synthèse d'une espèce cible. Concevoir une stratégie de synthèse pour une molécule simple. Choisir une stratégie de synthèse minimisant les impacts environnementaux.</p>

## Second Semestre PCSI Option PSI

### 3. Structures microscopiques et propriétés physiques des solides

Les modèles de description microscopique des solides sont présentés à partir de l'observation de différents solides cristallisés que le professeur est libre de choisir et de la prise en compte de propriétés macroscopiques de ces solides. L'introduction du modèle du cristal parfait se fait sur l'exemple de la maille cubique à faces centrées (CFC), seule maille dont la connaissance est exigible ; l'ensemble des notions associées à cette première étude est réinvesti pour étudier d'autres structures cristallines dont la constitution est alors fournie.

L'objectif principal de l'étude des cristaux métalliques, covalents et ioniques est d'aborder une nouvelle fois la notion de modèle : les allers-retours entre le niveau macroscopique (solides de différentes natures) et la modélisation microscopique (cristal parfait) permettent de montrer les limites du modèle du cristal parfait et de confronter les prédictions faites par ce modèle aux valeurs expérimentales mesurées sur le solide réel (distances internucléaires et interatomiques, masse volumique, etc.). Ce chapitre constitue une occasion de revenir sur les positions relatives des éléments dans le tableau périodique, en lien avec la nature des interactions assurant la cohésion des édifices présentés, ainsi que sur les interactions intermoléculaires et la notion de solubilisation pour les solides ioniques et moléculaires.

Une réflexion sur les modèles conduisant à la détermination des différents types de rayons à partir des méthodes expérimentales d'analyse des structures des solides peut être proposée.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- relier la position d'un élément dans le tableau périodique et la nature des interactions entre les entités correspondantes dans un solide ;
- effectuer des liens entre différents champs de connaissance ;
- appréhender la notion de limite d'un modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Modèle du cristal parfait</b> Solides amorphes, cristallins, semi-cristallins, polycristallins ; variétés allotropiques.</p> <p>Description du modèle du cristal parfait ; population, coordinence, compacité, masse volumique.</p>	<p><b>Illustrer l'influence des conditions expérimentales sur la formation de solides et de solides cristallins.</b></p> <p>Décrire un cristal parfait comme un assemblage de mailles parallélépipédiques. Déterminer la population, la coordinence et la compacité pour une structure fournie. Déterminer la valeur de la masse volumique d'un matériau cristallisé selon une structure cristalline fournie.</p>
<p>Rayons métallique, covalent, de van der Waals ou ionique et évolution dans le tableau périodique.</p>	<p>Relier le rayon métallique, covalent, de van der Waals ou ionique, selon le cas, aux paramètres d'une maille donnée. Citer l'ordre de grandeur de ces rayons.</p>
<p>Modèles d'empilement compact de sphères identiques.</p> <p>Maille conventionnelle CFC et ses sites interstitiels.</p>	<p><b>Utiliser un logiciel ou des modèles cristallins pour visualiser des mailles et des sites interstitiels et pour déterminer des paramètres géométriques.</b></p> <p>Localiser les interstices tétraédriques et octaédriques entre les plans d'empilement. Localiser et dénombrer les sites tétraédriques et octaédriques d'une maille CFC et déterminer leur habitabilité.</p>

Limites du modèle du cristal parfait.	Confronter des données expérimentales aux prévisions du modèle.
<b>Métaux</b> Cohésion et propriétés physiques des métaux.	Positionner dans le tableau périodique et reconnaître métaux et non métaux. Relier les caractéristiques de la liaison métallique (ordre de grandeur énergétique, non directionnalité) aux propriétés macroscopiques des métaux.
<b>Solides covalents et moléculaires</b> Cohésion et propriétés physiques des solides covalents et moléculaires.	Relier les caractéristiques des liaisons covalentes, des interactions de van der Waals et des liaisons hydrogène (directionnalité ou non, ordre de grandeur des énergies mises en jeu) et les propriétés macroscopiques des solides correspondants.
<b>Solides ioniques</b> Cohésion et propriétés physiques des solides ioniques.	Relier les caractéristiques de l'interaction ionique dans le cadre du modèle du solide ionique parfait (ordre de grandeur de l'énergie d'interaction, non directionnalité, charge localisée) avec les propriétés macroscopiques des solides ioniques.

#### 4. Transformations chimiques en solution aqueuse

Les transformations chimiques en solution aqueuse jouent un rôle essentiel en chimie, en biochimie, dans le domaine du vivant et dans les procédés industriels. Un nombre considérable de développements technologiques et d'analyses environnementales (traitement des eaux, méthodes d'analyse, extraction d'ions métalliques des minerais, générateurs électrochimiques, lutte contre la corrosion, etc.) repose sur des transformations modélisées par des réactions acide-base, de solubilisation-précipitation et d'oxydo-réduction en solution aqueuse dont la maîtrise est importante pour prévoir, interpréter et optimiser les phénomènes mis en jeu.

L'objectif de cette partie est donc de présenter différents types de réactions susceptibles d'intervenir en solution aqueuse, d'en déduire des diagrammes de prédominance ou d'existence d'espèces chimiques, notamment des diagrammes potentiel-pH, et de les utiliser comme outil de prévision et d'interprétation des transformations chimiques quel que soit le milieu donné. Les conventions de tracé de ces diagrammes seront toujours précisées.

Les choix pédagogiques relatifs au contenu des séances de travail expérimental permettront de contextualiser ces enseignements. Les dosages par titrage sont étudiés exclusivement en travaux pratiques. L'analyse des conditions choisies ou la réflexion conduisant à une proposition de protocole expérimental pour atteindre un objectif donné constituent des mises en situation des enseignements évoqués précédemment. Ces séances de travail expérimental constituent une nouvelle occasion d'aborder qualité et précision de la mesure.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être par la suite valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- modéliser ou simplifier un problème complexe ;
- utiliser différents outils graphiques, numériques, analytiques ;
- repérer les informations ou paramètres importants pour la résolution d'un problème.

##### 4.1. Réactions acide-base et de précipitation

Ces différentes transformations en solution aqueuse sont abordées en montrant qu'elles constituent des illustrations de l'évolution des systèmes chimiques introduites au premier semestre, les étudiant-es étant amené-es à déterminer l'état final d'un système en transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique. On montrera qu'il est ainsi possible d'analyser et de simplifier une situation complexe pour parvenir à la décrire rigoureusement et quantitativement, en l'occurrence dans le cas des solutions aqueuses, par une seule réaction. Il est cependant important de noter qu'on évite tout calcul inutile de

concentration, en privilégiant l'utilisation des diagrammes pour valider le choix de la réaction mise en jeu. Dans ce cadre, aucune formule de calcul de pH n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Réactions acide-base</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante d'acidité <math>K_a</math> ; constante d'acidité des deux couples de l'eau à 298 K ;</li> <li>- diagramme de prédominance, de distribution ;</li> <li>- exemples usuels d'acides et bases : nom, formule et caractère – faible ou fort – des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, acétique, du dioxyde de carbone aqueux, de la soude, la potasse, l'ion hydrogénocarbonate, l'ion carbonate, l'ammoniac ;</li> <li>- solutions tampons.</li> </ul> <p><b>Réactions de dissolution ou de précipitation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- réaction de dissolution, constante de solubilité <math>K_s</math> ;</li> <li>- solubilité et condition de précipitation ;</li> <li>- domaine d'existence ;</li> <li>- facteurs influençant la solubilité.</li> </ul>	<p>Reconnaître une réaction acide-base à partir de son équation.</p> <p>Écrire l'équation de la réaction modélisant une transformation en solution aqueuse en tenant compte des caractéristiques du milieu réactionnel (nature des espèces chimiques en présence, pH) et des observations expérimentales.</p> <p>Utiliser des tables pour extraire les données thermodynamiques pertinentes pour étudier un système en solution aqueuse.</p> <p>Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques d'équilibre sont connues.</p> <p>Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p>Prévoir l'état de saturation ou de non saturation d'une solution.</p> <p>Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.</p> <p>Retrouver les valeurs de constantes thermodynamiques d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance (et réciproquement).</p> <p>Exploiter des courbes d'évolution de la solubilité d'un solide en fonction d'une variable.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le diagramme de distribution des espèces d'un ou plusieurs couple(s) acide-base, ou d'espèces impliquées dans une réaction de précipitation.</p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction acide-base et une réaction de précipitation pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse. Illustrer un procédé de retraitement ou de recyclage ou de séparation en solution aqueuse.</b></p>

#### 4.2. Réactions d'oxydo-réduction

L'analyse de transformations mettant en jeu des oxydants et réducteurs usuels et des piles permettent d'aborder les différents concepts associés aux phénomènes d'oxydo-réduction en solution aqueuse. La relation de Nernst (admise en première année) ainsi que la relation entre la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction et les potentiels standard permettent de prévoir l'évolution des systèmes et le caractère favorisé des transformations.

Afin de pouvoir étudier l'influence du milieu sur les espèces oxydantes ou réductrices présentes, les acquis sur les réactions acido-basiques et de précipitation en solution aqueuse sont réinvestis. Enfin, les diagrammes potentiel-pH sont présentés puis superposés pour prévoir ou interpréter thermodynamiquement des transformations chimiques, la confrontation avec la réalité amenant à aborder éventuellement des blocages cinétiques en lien avec l'évolution temporelle des systèmes étudiée au premier semestre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Oxydants et réducteurs, réactions d'oxydo-réduction</b>            Nombre d'oxydation.            Exemples d'oxydants et de réducteurs minéraux usuels : nom et formule des ions thiosulfate, permanganate, hypochlorite, du dichlore, du peroxyde d'hydrogène, du dioxygène, du dihydrogène, des métaux.</p>	<p>Lier la position d'un élément dans le tableau périodique et le caractère oxydant ou réducteur du corps simple correspondant.            Prévoir les nombres d'oxydation extrêmes d'un élément à partir de sa position dans le tableau périodique.            Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple.</p>
<p>Pile, tension à vide, potentiel d'électrode, potentiel standard, formule de Nernst, électrodes de référence.</p>	<p>Décrire le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode.            Déterminer la capacité électrique d'une pile.</p> <p><b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement.</b></p>
<p>Diagrammes de prédominance ou d'existence.             Aspect thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction.            Dismutation et médiamutation.</p>	<p>Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.            Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples.</p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction d'oxydo-réduction pour réaliser une analyse quantitative en solution aqueuse.</b></p>
<p><b>Diagramme potentiel-pH</b>            Principe de construction, lecture et utilisation d'un diagramme potentiel-pH.             Diagramme potentiel-pH de l'eau.</p>	<p>Associer les différents domaines d'un diagramme potentiel-pH fourni à des espèces chimiques données.            Déterminer, par le calcul, la valeur de la pente d'une frontière d'un diagramme potentiel-pH.            Justifier la position d'une frontière verticale dans un diagramme potentiel-pH.            Prévoir le caractère thermodynamiquement favorisé ou non d'une transformation par superposition de diagrammes potentiel-pH.            Discuter de la stabilité des espèces dans l'eau.            Prévoir une éventuelle dismutation ou médiamutation en fonction du pH du milieu.            Confronter les prévisions à des données expérimentales et interpréter d'éventuels écarts en termes cinétiques.</p> <p><b>Mettre en œuvre des réactions d'oxydo-réduction en s'appuyant sur l'utilisation d'un diagramme potentiel-pH.</b></p>

Étudier la cohérence temporelle d'une source.	Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue par une démarche autonome non imposée. Obtenir une estimation semi-quantitative de la longueur de cohérence d'une radiation à l'aide d'un interféromètre de Michelson en lame d'air.
Mesurer une faible différence de longueurs d'onde : doublet spectral, modes d'une diode laser.	Réaliser la mesure d'un faible écart spectral avec un interféromètre de Michelson.

### 3. Prévention du risque au laboratoire de physique

L'apprentissage et le respect des règles de sécurité électrique, optique et celles liées à la pression et à la température permettent aux étudiants de prévenir et de minimiser les risques. Futurs ingénieurs, chercheurs, enseignants, ils doivent être sensibilisés au respect de la législation et à l'impact de leur activité sur l'environnement.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Prévention des risques au laboratoire</b>	Adopter une attitude responsable et adaptée au travail en laboratoire. Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.
- <b>Risque électrique</b>	Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
- <b>Risque optique</b>	Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.
- <b>Risques liés à la pression et à la température</b>	Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.

## Contenus thématiques

Les contenus de la formation sont organisés autour de six thèmes.

### 1. Optique

- 1.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses
- 1.2. Superposition d'ondes lumineuses
- 1.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young
- 1.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson

### 2. Électronique

### 3. Thermodynamique

- 3.1. Systèmes ouverts en régime stationnaire
- 3.2. Diffusion de particules
- 3.3. Diffusion thermique
- 3.4. Rayonnement thermique

**4. Mécanique**

- 4.1. Changements de référentiel
- 4.2. Dynamique dans un référentiel non galiléen
- 4.3. Mécanique des fluides

**5. Électromagnétisme**

- 5.1. Sources du champ électromagnétique
- 5.2. Électrostatique
- 5.3. Magnétostatique
- 5.4. Équations de Maxwell

**6. Physique des ondes**

- 6.1. Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de d'Alembert
- 6.2. Phénomènes de propagation linéaires unidimensionnels
- 6.3. Interfaces entre deux milieux
- 6.4. Introduction à la physique du laser
- 6.5. Approche ondulatoire de la mécanique quantique

**1. Optique**

Le programme de la classe de PC s'inscrit dans la continuité de la partie « **Formation des images** » du thème « **Ondes et signaux** » du programme de PCSI. Dans une première partie, on introduit les éléments spécifiques à l'émission, la propagation et la détection des ondes lumineuses. Les parties suivantes traitent essentiellement des interférences lumineuses : partant des trous d'Young éclairés par une source ponctuelle strictement monochromatique, on étudie ensuite l'évolution de la visibilité sous l'effet d'un élargissement spatial et spectral de la source. Le brouillage des franges précédentes sous l'effet d'un élargissement spatial de la source conduit à montrer l'un des avantages de l'interféromètre de Michelson éclairé par une source étendue (franges d'égale inclinaison et franges d'égale épaisseur) en constatant expérimentalement l'existence d'un lieu de localisation des franges. L'objectif de cette partie n'est pas le calcul de la répartition de l'intensité lumineuse modélisant les figures observées : on exploite le plus souvent les variations de l'ordre d'interférences (avec la position du point d'observation, la position du point source et la longueur d'onde) pour interpréter les observations sans expliciter l'intensité de la lumière.

La partie « **Modèle scalaire des ondes lumineuses** » introduit les outils nécessaires à l'étude des phénomènes ondulatoires dans le domaine de l'optique. La réponse des récepteurs est supposée proportionnelle à la moyenne du carré du champ électrique de l'onde. Le programme utilise uniquement le mot « intensité » pour décrire la grandeur détectée mais on peut employer indifféremment les termes « intensité » et « éclairement » sans chercher à les distinguer à ce niveau de formation. Le théorème de Malus (orthogonalité des rayons lumineux et des surfaces d'ondes dans l'approximation de l'optique géométrique) est admis. Dans le cadre de l'optique, on qualifie une onde de plane ou sphérique par référence à la forme des surfaces d'ondes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses</b>	
<b>Modèle de propagation dans l'approximation de l'optique géométrique.</b>	Associer la grandeur scalaire de l'optique à une composante d'un champ électrique.
Vibration lumineuse.	

Chemin optique. Déphasage dû à la propagation.	Exprimer le retard de phase en un point en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique.
Surfaces d'ondes. Théorème de Malus. Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	Utiliser l'égalité des chemins optiques sur les rayons d'un point objet à son image. Associer une description de la formation des images en termes de rayons lumineux et en termes de surfaces d'onde.
<b>Modèle d'émission.</b>  Largeur spectrale. Cohérence temporelle.	Classer différentes sources lumineuses (lampe spectrale basse pression, laser, source de lumière blanche...) en fonction du temps de cohérence de leurs diverses radiations. Citer quelques ordres de grandeur des longueurs de cohérence temporelle associées à différentes sources. Relier, en ordre de grandeur, le temps de cohérence et la largeur spectrale de la radiation considérée.
<b>Réception d'une onde lumineuse.</b>  Récepteurs. Intensité lumineuse.	Comparer le temps de réponse d'un récepteur usuel (œil, photodiode, capteur CCD) aux temps caractéristiques des vibrations lumineuses. Relier l'intensité lumineuse à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique.  <b>Mettre en œuvre un capteur optique.</b>

Dans la partie « **Superposition d'ondes lumineuses** », le professeur est invité à s'appuyer sur des situations concrètes, des illustrations expérimentales et des simulations afin de donner du sens aux différentes notions présentées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Superposition d'ondes lumineuses</b>	
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques non synchrones ou incohérentes entre elles.	Justifier et utiliser l'additivité des intensités.
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel.	Établir la formule de Fresnel. Identifier une situation de cohérence entre deux ondes et utiliser la formule de Fresnel.
Contraste.	Associer un bon contraste à des ondes d'intensités voisines.
Superposition de N ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont	Expliquer qualitativement l'influence de N sur l'intensité et la finesse des franges brillantes observées.



en progression arithmétique dans le cas $N \gg 1$ .	Établir, par le calcul, la condition d'interférences constructives et la demi-largeur $2\pi/N$ des franges brillantes. Établir et utiliser la formule indiquant la direction des maxima d'intensité derrière un réseau de fentes rectilignes parallèles.
---	---

Dans la partie « **Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young** », les trous d'Young permettent de confronter théorie et expérience. En revanche, les fentes d'Young sont abordées de manière exclusivement expérimentale. Aucun autre interféromètre à division du front d'onde n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young</b>	
<b>Dispositif-modèle des trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif (source ponctuelle à grande distance finie ; observation à grande distance finie).</b>	
Champ d'interférences. Ordre d'interférences.	Définir, déterminer et utiliser l'ordre d'interférences.
Franges d'interférences.	Justifier la forme des franges observées sur un écran éloigné parallèle au plan contenant les trous d'Young.
<b>Du dispositif-modèle au dispositif réel.</b>	
Fentes d'Young. Montage de Fraunhofer.	Identifier l'effet de la diffraction sur la figure observée. Expliquer l'intérêt pratique du dispositif des fentes d'Young comparativement aux trous d'Young. Exprimer l'ordre d'interférences sur l'écran dans le cas d'un dispositif des fentes d'Young utilisé en configuration de Fraunhofer.
Perte de contraste par élargissement spatial de la source.	Utiliser un critère semi-quantitatif de brouillage des franges portant sur l'ordre d'interférences pour interpréter des observations expérimentales.
Perte de contraste par élargissement spectral de la source.	Utiliser un critère semi-quantitatif de brouillage des franges portant sur l'ordre d'interférences pour interpréter des observations expérimentales. Relier la longueur de cohérence temporelle, la largeur spectrale et la longueur d'onde en ordres de grandeur.
Observations en lumière blanche (blanc d'ordre supérieur, spectre cannelé).	Déterminer les longueurs d'ondes des cannelures.

Dans le prolongement de la partie précédente, la partie « **Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson** » vise à mettre en lumière l'intérêt des dispositifs interférentiels par division d'amplitude, en s'appuyant sur

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Physique PC

l'exemple de l'interféromètre de Michelson. L'accent est ainsi mis sur l'importance expérimentale de ces dispositifs, notamment dans le domaine de la métrologie. Lors de la modélisation de l'interféromètre de Michelson, la séparatrice est supposée d'épaisseur négligeable.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson</b>	
<p><b>Interféromètre de Michelson équivalent à une lame d'air éclairée par une source spatialement étendue.</b></p> <p>Localisation des franges. Franges d'égale inclinaison.</p>	<p>Justifier les conditions d'observation des franges d'égale inclinaison, le lieu de localisation des franges étant admis. Établir et utiliser l'expression de l'ordre d'interférences en fonction de l'épaisseur de la lame, l'angle d'incidence et la longueur d'onde.</p> <p><b>Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation adaptées à l'utilisation d'un interféromètre de Michelson en lame d'air.</b></p> <p><b>Mesurer l'écart en longueur d'onde d'un doublet et la longueur de cohérence d'une radiation.</b></p> <p><b>Interpréter des observations faites en lumière blanche avec l'interféromètre de Michelson en configuration lame d'air.</b></p>
<p><b>Interféromètre de Michelson équivalent à un coin d'air éclairé par une source spatialement étendue.</b></p> <p>Localisation des franges. Franges d'égale épaisseur.</p>	<p>Justifier les conditions d'observation des franges d'égale épaisseur, le lieu de localisation des franges étant admis. Utiliser l'expression donnée de la différence de marche en fonction de l'épaisseur pour exprimer l'ordre d'interférences.</p> <p><b>Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation adaptées à l'utilisation d'un interféromètre de Michelson en coin d'air.</b></p> <p><b>Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</b></p> <p><b>Interpréter des observations faites en lumière blanche avec l'interféromètre</b></p>

	<b>de Michelson en configuration coin d'air.</b>
--	--

## 2. Électronique

La partie « **Production, acquisition et traitement d'un signal électrique** » est abordée exclusivement de manière expérimentale et prolonge sur ce thème le programme de première année de la classe de PCSI. De par leur large champ d'applications, les capacités identifiées dans cette partie peuvent être reliées de façon fructueuse à d'autres capacités expérimentales du programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Production, acquisition et traitement d'un signal électrique.</b>  Oscillateur quasi-sinusoïdal réalisé en bouclant un filtre passe-bande du deuxième ordre avec un amplificateur.	<b>Mettre en œuvre un oscillateur quasi-sinusoïdal et analyser les spectres des signaux générés.</b>
Échantillonnage.	<b>Expliquer l'influence de la fréquence d'échantillonnage.</b>
Condition de Nyquist-Shannon.	<b>Utiliser la condition de Nyquist-Shannon. Mettre en évidence le phénomène de repliement de spectre au moyen d'un oscilloscope numérique ou d'une acquisition numérique.</b>
Détection synchrone.	<b>Mettre en œuvre un protocole de détection synchrone.</b>

## 3. Thermodynamique

Le programme de thermodynamique de la classe de PC s'inscrit dans le prolongement de celui de la classe de PCSI : les principes de la thermodynamique peuvent être désormais écrits sous forme infinitésimale pour un système évoluant entre deux instants infiniment proches, d'une part dans le cadre de l'étude des machines thermiques avec écoulement en régime stationnaire et d'autre part dans le cadre de l'étude de la diffusion thermique. Les expressions des variations infinitésimales des fonctions d'état en fonction des variables d'état doivent être fournies pour les systèmes envisagés.

Ce thème contribue également à asseoir la maîtrise des opérateurs d'analyse vectorielle (gradient, divergence, laplacien) mais le formalisme doit rester au deuxième plan. Les mises en équations locales sont réalisées dans le cas de problèmes ne dépendant que d'une seule coordonnée d'espace en coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques. On admet ensuite les formes générales des équations en utilisant les opérateurs d'analyse vectorielle, ce qui permet d'aborder des situations plus variées en fournissant les expressions de la divergence et du laplacien.

Au travers des illustrations et des exemples traités, le professeur est invité à sensibiliser les étudiants à certains enjeux sociétaux liés par exemple aux questions d'économies d'énergie et de réchauffement climatique ; ceci est aussi l'occasion d'insister sur la notion de modèle en physique et plus généralement en sciences.

La partie « **Systèmes ouverts en régime stationnaire** » complète la partie « **Machines thermique** » du programme de première année de la classe de PCSI en proposant notamment un bilan d'entropie. La maîtrise des démonstrations par les étudiants et l'application des résultats à des situations concrètes constituent des objectifs de formation.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Systèmes ouverts en régime stationnaire</b>	
Premier et deuxième principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire, dans le seul cas d'un écoulement unidimensionnel au niveau de la section d'entrée et de la section de sortie.	Établir les relations $\Delta h + \Delta e = w_u + q$ et $\Delta s = s_e + s_c$ et les utiliser pour étudier des machines thermiques réelles à l'aide de diagrammes thermodynamiques (T,s) et (P,h).

Dans la partie « **Diffusion de particules** », l'accent est mis sur le notion de bilan dans le cas où le phénomène de convection est négligé. Cette partie se termine par un modèle microscopique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Diffusion de particules</b>	
Vecteur densité de flux de particules $\mathbf{j}_N$ .	Exprimer le flux de particules traversant une surface orientée en utilisant le vecteur $\mathbf{j}_N$ .
Bilans de particules.	Utiliser la notion de flux pour traduire un bilan global de particules. Établir l'équation locale traduisant un bilan de particules dans le cas d'un problème ne dépendant qu'une d'une seule coordonnée d'espace en coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques, éventuellement en présence de sources internes. Utiliser l'opérateur divergence et son expression fournie pour exprimer le bilan local de particules dans le cas d'une géométrie quelconque.
Loi de Fick.	Utiliser la loi de Fick. Citer l'ordre de grandeur d'un coefficient de diffusion dans un gaz dans les conditions usuelles.
Régimes stationnaires.	Utiliser, en régime stationnaire, la conservation du flux sous forme locale ou globale en l'absence de sources internes.
Équation de diffusion en l'absence de sources internes.	Établir l'équation de la diffusion en l'absence de sources internes. Utiliser l'opérateur laplacien et son expression fournie pour écrire l'équation de diffusion dans le cas d'une géométrie quelconque. Analyser une équation de diffusion en ordres de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.

Approche microscopique du phénomène de diffusion.	<p>Mettre en place un modèle probabiliste discret à une dimension de la diffusion (marche au hasard) et évaluer le coefficient de diffusion associé en fonction du libre parcours moyen et de la vitesse quadratique moyenne.</p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler la marche au hasard d'un grand nombre de particules à partir d'un centre et caractériser l'étalement spatial de cet ensemble de particules au cours du temps.</p>
---	--

Dans la partie « **Diffusion thermique** », la mise en équations de la diffusion thermique est limitée au cas des solides ; on peut étendre les résultats ainsi établis aux milieux fluides en l'absence de convection en affirmant la généralisation des équations obtenues dans les solides. La loi phénoménologique de Newton à l'interface entre un solide et un fluide peut être utilisée dès lors qu'elle est fournie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.3. Diffusion thermique</b>	
Vecteur densité de flux thermique $\mathbf{j}_q$	Exprimer le flux thermique à travers une surface orientée en utilisant le vecteur $\mathbf{j}_q$ .
Premier principe de la thermodynamique.	Établir, pour un milieu solide, l'équation locale traduisant le premier principe dans le cas d'un problème ne dépendant qu'une d'une seule coordonnée d'espace en coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques, éventuellement en présence de sources internes. Utiliser l'opérateur divergence et son expression fournie pour exprimer le bilan local dans le cas d'une géométrie quelconque, éventuellement en présence de sources internes.
Loi de Fourier.	Utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, béton, métaux.
Régimes stationnaires. Résistance thermique.	Utiliser la conservation du flux thermique sous forme locale ou globale en l'absence de source interne. Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique. Établir l'expression d'une résistance thermique dans le cas d'un modèle unidimensionnel. Utiliser les lois d'associations de résistances thermiques.

Équation de la diffusion thermique.	<p>Établir une équation de diffusion thermique. Utiliser l'opérateur laplacien et son expression fournie pour écrire l'équation de diffusion dans le cas d'une géométrie quelconque.</p> <p>Analyser une équation de diffusion en ordres de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle. Utiliser la loi de Newton fournie comme condition aux limites à une interface solide-fluide.</p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion thermique à une dimension par une méthode des différences finies dérivée de la méthode d'Euler explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.</p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.</b></p>
-------------------------------------	--

Dans la partie « **Rayonnement thermique** », une étude qualitative du rayonnement du corps noir est proposée sans qu'aucune formule ne soit exigible. Celle-ci permet également d'aborder de manière quantitative l'effet de serre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.4. Rayonnement thermique</b>	
Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi de Wien, loi de Stefan. Effet de serre. Albédo.	Exploiter les expressions fournies des lois de Wien et de Stefan. Analyser quantitativement l'effet de serre en s'appuyant sur un bilan énergétique dans le cadre d'un modèle à une couche.

## 4. Mécanique

Le programme de mécanique de PC s'inscrit dans le prolongement du thème « **Mouvements et interactions** » et de la partie « **Statique des fluides dans un référentiel galiléen** » du thème « **Énergie : conversion et transfert** » du programme de PCSI. Il est constitué de trois parties relevant successivement de la mécanique du point ou des fluides.

Dans la première partie « **Changements de référentiel** », la cinématique des changements de référentiels n'est pas étudiée pour elle-même mais en vue d'applications en dynamique du point ou des fluides.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1. Changements de référentiel</b>	

Référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un autre : transformation de Galilée, composition des vitesses.	Relier la transformation de Galilée et la formule de composition des vitesses à la relation de Chasles et au caractère supposé absolu du temps.
Composition des vitesses et des accélérations dans le cas d'un référentiel en translation par rapport à un autre : point coïncident, vitesse d'entraînement, accélération d'entraînement.	Exprimer la vitesse d'entraînement et l'accélération d'entraînement.
Composition des vitesses et des accélérations dans le cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe : point coïncident, vitesse d'entraînement, accélération d'entraînement, accélération de Coriolis.	Exprimer la vitesse d'entraînement et l'accélération d'entraînement. Citer et utiliser l'expression de l'accélération de Coriolis.

Dans la partie « **Dynamique dans un référentiel non galiléen** », l'étude du champ de pesanteur est conduite en supposant le référentiel géocentrique galiléen. De nombreuses applications permettent d'illustrer cette partie : le pendule de Foucault, la déviation vers l'est, les vents géostrophiques, les courants marins ; l'étude statique des marées constitue également une ouverture pertinente.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2. Dynamique dans un référentiel non galiléen</b>	
Cas d'un référentiel en translation par rapport à un référentiel galiléen : force d'inertie d'entraînement.	Déterminer la force d'inertie d'entraînement. Appliquer la deuxième loi de Newton, le théorème du moment cinétique et le théorème de l'énergie cinétique dans un référentiel non galiléen.
Cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen : force d'inertie d'entraînement, force d'inertie de Coriolis.	Exprimer la force d'inertie d'entraînement et la force d'inertie de Coriolis. Associer la force d'inertie d'entraînement axifuge à l'expression familière « force centrifuge ». Appliquer la deuxième loi de Newton, le théorème du moment cinétique et le théorème de l'énergie cinétique dans un référentiel non galiléen.
Champ de pesanteur terrestre : définition, évolution qualitative avec la latitude, ordres de grandeur.	Distinguer le champ de pesanteur et le champ gravitationnel.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, illustrer un effet lié au caractère non galiléen du référentiel terrestre
Équilibre d'un fluide dans un référentiel non galiléen en translation ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.	Établir et utiliser l'expression de la force d'inertie d'entraînement volumique.

La partie intitulée « **Mécanique des fluides** » est conçue comme une initiation de telle sorte que de nombreux concepts sont introduits de manière élémentaire. Toute extension du programme vers les cours spécialisés doit être évitée : par exemple l'approche lagrangienne, la fonction de courant, le potentiel complexe, l'étude locale du champ des vitesses, la relation de Bernoulli pour des écoulements compressibles ou instationnaires, le théorème de Reynolds et le théorème d'Euler sont hors programme.

L'apprentissage de la mécanique des fluides contribue à la maîtrise progressive des opérateurs d'analyse vectorielle qui sont utilisés par ailleurs en thermodynamique et en électromagnétisme. Quel que soit l'ordre dans lequel le professeur choisit de présenter ces parties, il convient d'introduire ces opérateurs en insistant sur le contenu physique sous-jacent. En outre, la recherche de lignes de courants est traitée exclusivement à l'aide d'outils numériques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.3. Mécanique des fluides</b>	
<b>4.3.1. Description d'un fluide en mouvement</b>	
Champ eulérien des vitesses. Lignes de champ. Tubes de champ.	Définir et utiliser l'approche eulérienne.
Écoulement stationnaire.	Discuter du caractère stationnaire d'un écoulement en fonction du référentiel d'étude.
Dérivée particulaire de la masse volumique. Écoulement incompressible.	Établir l'expression de la dérivée particulaire de la masse volumique. Utiliser l'expression de la dérivée particulaire de la masse volumique pour caractériser un écoulement incompressible.
Débit massique. Débit volumique.	Définir le débit massique et l'écrire comme le flux du vecteur densité de courant de masse à travers une surface orientée. Définir le débit volumique et l'écrire comme le flux du champ de vitesse à travers une surface orientée.
Équation locale de conservation de la masse.	Établir l'équation locale de conservation de la masse dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Citer et utiliser une généralisation admise en géométrie quelconque à l'aide de l'opérateur divergence et son expression fournie.
Caractérisation d'un écoulement incompressible par la divergence du champ des vitesses.	Traduire localement, en fonction du champ de vitesses, le caractère incompressible d'un écoulement.
Dérivée particulaire du champ de vitesse : terme local ; terme convectif.	Associer la dérivée particulaire de la vitesse à l'accélération de la particule de fluide qui passe en un point. Utiliser l'expression de l'accélération, le terme convectif étant écrit sous la forme <b>(<math>\mathbf{v} \cdot \text{grad}</math>) <math>\mathbf{v}</math></b> . Utiliser l'expression fournie de l'accélération convective en fonction de <b>grad</b> ( $v^2/2$ ) et <b>rot <math>\mathbf{v} \times \mathbf{v}</math></b> .



Écoulement irrotationnel défini par la nullité du rotationnel du champ des vitesses en tout point ; potentiel des vitesses.	Traduire localement, en fonction du champ de vitesses, le caractère irrotationnel d'un écoulement et en déduire l'existence d'un potentiel des vitesses.
<b>4.3.2. Actions de contact dans un fluide en mouvement</b>	
Forces de pression. Équivalent volumique.	Exprimer la force de pression exercée par un fluide sur une surface élémentaire. Exprimer l'équivalent volumique des forces de pression à l'aide d'un gradient.
Contraintes tangentielles dans un écoulement $\mathbf{v} = v_x(y) \mathbf{u}_x$ au sein d'un fluide newtonien ; viscosité.	Utiliser l'expression fournie $d\mathbf{F} = \eta \partial v_x / \partial y d\mathbf{S} \mathbf{u}_x$ .
Équivalent volumique des forces de viscosité dans un écoulement incompressible.	Établir l'expression de l'équivalent volumique des forces de viscosité dans le cas d'un écoulement de cisaillement à une dimension et utiliser sa généralisation admise pour un écoulement incompressible quelconque.
Traînée d'une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme dans un fluide newtonien : nombre de Reynolds ; coefficient de traînée $C_x$ ; graphe de $C_x$ en fonction du nombre de Reynolds.	Évaluer un nombre de Reynolds pour choisir un modèle de traînée linéaire ou un modèle de traînée quadratique.
<b>4.3.3. Équations dynamiques locales</b>	
Équation de Navier-Stokes dans un fluide newtonien en écoulement incompressible. Terme convectif. Terme diffusif. Nombre de Reynolds dans le cas d'une unique échelle spatiale.	Utiliser l'équation de Navier-Stokes dans un fluide newtonien en écoulement incompressible. Évaluer en ordre de grandeur le rapport du terme convectif sur le terme diffusif et le relier au nombre de Reynolds dans le cas d'une unique échelle spatiale.
Notion d'écoulement parfait et de couche limite.	Exploiter l'absence de forces de viscosité et le caractère isentropique de l'évolution des particules de fluide. Utiliser la condition aux limites sur la composante normale du champ des vitesses.
Relation de Bernoulli pour un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et homogène dans le champ de pesanteur uniforme dans un référentiel galiléen.	Établir et utiliser la relation de Bernoulli pour un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et homogène dans le champ de pesanteur uniforme dans un référentiel galiléen.
<b>4.3.4. Bilans macroscopiques</b>	
Bilans de masse.	Établir un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert et fixe ou sur un système fermé et mobile.

Bilans de quantité de mouvement ou d'énergie cinétique pour un écoulement stationnaire unidimensionnel à une entrée et une sortie.

Associer un système fermé à un système ouvert pour faire un bilan.  
Utiliser le théorème de la quantité de mouvement et le théorème de l'énergie cinétique pour réaliser un bilan.  
Exploiter la nullité (admise) de la puissance des forces intérieures dans un écoulement parfait et incompressible.

## 5. Électromagnétisme

L'électromagnétisme a été abordé en classe de PCSI dans un domaine restreint (magnétostatique, induction électromagnétique et forces de Laplace) et sans le support des équations locales. Le programme de la classe de PC couvre en revanche tout le spectre des fréquences, des régimes stationnaires jusqu'aux phénomènes de propagation en passant par les régimes quasi-stationnaires et prend appui sur les équations locales (équation de conservation de la charge et équations de Maxwell). Le programme est découpé en parties indépendantes dont l'ordre de présentation relève de la liberté pédagogique du professeur. De nombreuses approches sont possibles, y compris en fractionnant les parties. Les phénomènes de propagation sont étudiés essentiellement dans le cadre du thème « **Physique des ondes** » du programme : l'articulation entre les parties « **Électromagnétisme** » et « **Physique des ondes** » relève elle aussi de la liberté pédagogique.

Toute étude de distributions de courants superficiels est exclue. La modélisation superficielle d'une distribution de charges est strictement limitée à la modélisation du condensateur plan par deux plans infinis uniformément chargés : on fait remarquer la discontinuité du champ à la traversée d'une nappe de charges superficielles mais les relations de passage ne figurent pas au programme.

S'agissant des potentiels, on se limite à introduire le potentiel scalaire en électrostatique et à faire remarquer que le champ électrique ne dérive pas d'un potentiel scalaire en régime variable.

L'apprentissage de l'électromagnétisme contribue à la maîtrise progressive des opérateurs d'analyse vectorielle qui sont utilisés par ailleurs en thermodynamique et en mécanique des fluides. Quel que soit l'ordre dans lequel le professeur choisit de présenter ces parties, il convient d'introduire ces opérateurs en insistant sur le contenu physique sous-jacent.

L'étude de l'électromagnétisme n'est pas centrée sur les calculs de champs : ceux-ci se limitent donc à des calculs motivés par des applications pratiques d'intérêt évident. La recherche des lignes de champ d'un champ donné est traitée exclusivement à l'aide d'outils numériques.

La partie « **Sources du champ électromagnétique** » étudie les sources du champ électromagnétique dans l'approximation des milieux continus. Par ailleurs, il convient de souligner et d'exploiter les analogies formelles avec les autres théories de champs : diffusion de particules, diffusion thermique, gravitation, mécanique des fluides.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.1. Sources du champ électromagnétique</b>	
<b>5.1.1. Description microscopique et mésoscopique des sources</b>	

Densité volumique de charges. Charge traversant un élément de surface fixe et vecteur densité de courant. Intensité du courant.	Exprimer la densité volumique de charge et le vecteur densité de courant en fonction de la vitesse moyenne des porteurs de charge, de leur charge et de leur densité volumique. Relier l'intensité du courant et le flux du vecteur densité de courant.
<b>5.1.2 Conservation de la charge</b>	
Équation locale de conservation de la charge.	Établir l'équation traduisant la conservation de la charge dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Citer et utiliser une généralisation admise en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence, son expression étant fournie. Exploiter le caractère conservatif du vecteur densité de courant en régime stationnaire ; relier cette propriété à la loi des nœuds de l'électrocinétique.
<b>5.1.3 Conduction électrique dans un conducteur ohmique</b>	
Loi d'Ohm locale. Conductivité électrique.	Établir l'expression de la conductivité électrique à l'aide d'un modèle microscopique, l'action de l'agitation thermique et des défauts du réseau étant décrite par une force de frottement fluide linéaire. Discuter de l'influence de la fréquence sur la conductivité électrique. Établir l'expression de la résistance d'une portion de conducteur filiforme.
Effet Hall.	Interpréter qualitativement l'effet Hall dans une géométrie parallélépipédique.
Effet thermique du courant électrique : loi de Joule locale.	Exprimer la puissance volumique dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique.

La partie « **Électrostatique** » étudie les lois de l'électrostatique et quelques applications. Les calculs de champs doivent être motivés par l'utilisation de ces champs pour étudier des situations d'intérêt pratique évident. Ces calculs ne s'appuient sur la loi de Coulomb que pour des distributions de charges discrètes. Dans le cas des distributions continues, on se limite aux situations de haute symétrie permettant de calculer le champ par le théorème de Gauss et aux superpositions de champs ainsi obtenus. Cette rubrique permet aussi d'introduire et d'exploiter des analogies avec le champ gravitationnel qui a été étudié en PCSI dans le seul cas d'astres ponctuels.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.2. Électrostatique</b>	
<b>5.2.1. Champ électrostatique</b>	

Loi de Coulomb. Champ et potentiel électrostatiques créés par une charge ponctuelle. Principe de superposition.	Exprimer le champ électrostatique et le potentiel créés par une distribution discrète de charges. Citer quelques ordres de grandeur de champs électrostatiques.
<b>Propriétés du champ électrostatique</b>  Symétries.	Exploiter les propriétés de symétrie des sources (translation, rotation, symétrie plane, conjugaison de charges) pour prévoir des propriétés du champ créé.
Circulation du champ électrostatique. Potentiel électrostatique. Équations locales.	Relier l'existence d'un potentiel électrostatique à la nullité du rotationnel du vecteur champ électrostatique. Justifier l'orthogonalité des lignes de champ avec les surfaces équipotentielles et leur orientation dans le sens des potentiels décroissants.
Théorème de Gauss et équation locale de Maxwell-Gauss.	Choisir une surface adaptée et utiliser le théorème de Gauss.
Lignes de champ électrostatique. Équipotentielles.	Justifier qu'une carte de lignes de champ puisse ou non être celle d'un champ électrostatique. Repérer, sur une carte de champ électrostatique, d'éventuelles sources du champ et leur signe. Associer l'évolution de la norme du champ électrostatique à l'évasement des tubes de champ loin des sources. Relier équipotentielles et lignes de champ électrostatique. Évaluer la norme du champ électrostatique à partir d'un réseau de lignes équipotentielles.
<b>5.2.2. Exemples de champs électrostatiques</b>	
Dipôle électrostatique. Moment dipolaire.	Citer les conditions de l'approximation dipolaire.
Potentiel et champ créés par un dipôle.	Établir l'expression du potentiel électrostatique. Comparer la décroissance du champ et du potentiel avec la distance dans le cas d'une charge ponctuelle et dans le cas d'un dipôle. Tracer l'allure des lignes de champ électrostatique engendrées par un dipôle.
Actions subies par un dipôle placé dans un champ électrostatique d'origine extérieure : résultante et moment.	Utiliser les expressions fournies de la résultante et du moment des actions subies par un dipôle placé dans un champ électrostatique d'origine extérieure.

Énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure.	Utiliser l'expression fournie de l'énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure. Prévoir qualitativement l'évolution d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure.
Interactions ion-molécule et molécule-molécule.	Expliquer qualitativement la solvatation des ions dans un solvant polaire.
Dipôle induit. Polarisabilité.	Associer la polarisabilité et le volume de l'atome en ordre de grandeur.
Plan infini uniformément chargé en surface.	Établir l'expression du champ créé par un plan infini uniformément chargé en surface.
Condensateur plan. Capacité. Densité volumique d'énergie électrostatique.	Établir l'expression du champ créé par un condensateur plan. Déterminer l'expression de la capacité d'un condensateur plan. Citer l'ordre de grandeur du champ disruptif dans l'air. Déterminer l'expression de la densité volumique d'énergie électrostatique dans le cas du condensateur plan à partir de celle de l'énergie du condensateur.
Énergie de constitution d'un noyau atomique modélisé par une boule uniformément chargée.	Exprimer l'énergie de constitution d'un noyau en construisant le noyau par adjonction progressive de charges apportées de l'infini.
<b>5.2.3. Analogies avec le champ gravitationnel</b>	
Analogies entre champ électrostatique et champ gravitationnel.	Utiliser les analogies entre les forces électrostatique et gravitationnelle pour déterminer l'expression de champs gravitationnels.

La partie « **Magnétostatique** » aborde l'étude du champ magnétique en régime stationnaire en prenant appui sur les équations locales : la loi de Biot et Savart ne figure pas au programme. L'objectif réside davantage dans l'étude des propriétés des champs magnétiques que dans leur calcul : les calculs de champ magnétique doivent donc se limiter à des situations d'intérêt pratique évident. Enfin, la notion de potentiel-vecteur est hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.3. Magnétostatique</b>	
<b>5.3.1. Champ magnétostatique</b>	
Équations locales de la magnétostatique et formes intégrales : flux conservatif et théorème d'Ampère.	Choisir un contour fermé et une surface et les orienter pour appliquer le théorème d'Ampère.
Linéarité des équations.	Utiliser une méthode de superposition.
Propriétés de symétrie.	Exploiter les propriétés de symétrie des sources (rotation, symétrie plane) pour prévoir des propriétés du champ créé.

Propriétés topographiques.	Justifier qu'une carte de lignes de champ puisse ou non être celle d'un champ magnétostatique. Repérer, sur une carte de champ magnétostatique, d'éventuelles sources du champ et leur sens. Associer l'évolution de la norme d'un champ magnétique à l'évasement des tubes de champ.
<b>5.3.2. Exemples de champs magnétostatiques</b>	
Modèle du câble rectiligne infini.	Déterminer le champ créé par un câble rectiligne infini.
Solénoïde long sans effets de bords.	Établir et citer l'expression du champ à l'intérieur d'un solénoïde long, la nullité du champ extérieur étant admise.
Inductance propre. Densité volumique d'énergie magnétique.	Établir les expressions de l'inductance propre et de l'énergie d'une bobine modélisée par un solénoïde long. Associer l'énergie d'une bobine à une densité volumique d'énergie magnétique.
<b>5.3.3. Dipôles magnétostatiques</b>	
Moment magnétique d'une boucle de courant plane.	Relier le moment magnétique d'un atome d'hydrogène à son moment cinétique.
Rapport gyromagnétique de l'électron. Magnéton de Bohr.	Construire en ordre de grandeur le magnéton de Bohr par analyse dimensionnelle. Évaluer l'ordre de grandeur maximal du moment magnétique volumique d'un aimant permanent.
Actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure : résultante et moment.	Utiliser les expressions fournies de la résultante et du moment des actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure. Décrire l'expérience de Stern et Gerlach et expliquer ses enjeux.
Énergie potentielle d'un dipôle magnétique rigide placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.	Utiliser l'expression fournie de l'énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ magnétostatique d'origine extérieure. Prévoir qualitativement l'évolution d'un dipôle rigide dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.

La partie « **Équations de Maxwell** » présente les équations de Maxwell en régime dépendant du temps. La notion de potentiel-vecteur est hors-programme mais on insiste sur le fait que le champ électrique ne dérive pas en général d'un potentiel scalaire. L'étude détaillée des ondes électromagnétiques qui prolonge cette partie est placée dans la partie « **Physique des ondes** ». On ne mentionne ici les phénomènes de propagation que pour les négliger dans le cadre des régimes lentement variables. Le cadre adopté est celui de

l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) magnétique, pour lequel les effets des distributions de courants dominant ceux des distributions de charges.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.4. Équations de Maxwell</b>	
<b>5.4.1. Postulats de l'électromagnétisme</b>	
Force de Lorentz. Équations locales de Maxwell. Formes intégrales.	Utiliser les équations de Maxwell sous forme locale ou intégrale. Relier l'équation de Maxwell-Faraday et la loi de Faraday. Établir l'équation locale de la conservation de la charge à partir des équations de Maxwell. Utiliser une méthode de superposition.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant des capteurs inductifs.</b>
<b>5.4.2. Aspects énergétiques</b>	
Vecteur de Poynting. Densité volumique d'énergie électromagnétique. Équation locale de Poynting.	Utiliser les grandeurs énergétiques pour conduire des bilans d'énergie électromagnétique. Associer le vecteur de Poynting et l'intensité lumineuse utilisée dans le domaine de l'optique.
<b>5.4.3. Approximation des régimes quasi-stationnaires magnétique</b>	
Équations de propagation des champs électrique et magnétique dans le vide.	Établir les équations de propagation des champs électrique et magnétique dans le vide. Expliquer le caractère non instantané des interactions électromagnétiques.
ARQS magnétique.	Discuter l'approximation des régimes quasi-stationnaires. Simplifier et utiliser les équations de Maxwell et l'équation de conservation de la charge dans l'approximation du régime quasi-stationnaire. Étendre le domaine de validité des expressions des champs magnétiques obtenues en régime stationnaire.

## 6. Physique des ondes

Le programme de physique des ondes de la classe de PC s'inscrit dans le prolongement de la partie « **Propagation d'un signal** » du thème « **Ondes et signaux** » du programme de PCSI où des propriétés unificatrices (interférences, battements, etc.) ont été abordées en s'appuyant sur une approche expérimentale et sans référence à une équation d'onde. Il s'agit désormais de mettre en place l'équation d'onde de d'Alembert en mécanique, en acoustique et en électromagnétisme. On aborde ensuite l'étude de la dispersion, de l'atténuation et de l'absorption associées à des phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants. La propagation d'ondes dans des milieux différents conduit naturellement à étudier la réflexion et la transmission d'ondes à une

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Physique PC

interface. L'étude de la physique des ondes s'achève par une introduction à la physique du laser et par une introduction à l'approche ondulatoire de la mécanique quantique.

La partie « **Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de d'Alembert** » est consacrée à l'étude de phénomènes ondulatoires non dispersifs régis par l'équation d'onde de d'Alembert. Le choix a été fait ici de privilégier les solutions harmoniques dans la résolution pour leur universalité comme solutions adaptées aux équations d'ondes linéaires. S'agissant de la modélisation microscopique des solides, l'objectif est uniquement de proposer une interprétation du module d'Young d'un solide ; par la suite, la mise en équations des ondes longitudinales dans les solides est conduite directement dans l'approximation du solide continu. Dans le cadre de la physique des ondes, on qualifiera de plane ou sphérique une onde par référence à sa dépendance spatiale  $f(x,t)$  ou  $f(r,t)$ .

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.1. Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de d'Alembert</b>	
<b>6.1.1. Ondes mécaniques unidimensionnelles dans les solides déformables</b>	
Ondes transversales sur une corde vibrante.	Établir l'équation d'onde décrivant les ondes transversales sur une corde vibrante infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements transverses.
Domaine d'élasticité d'un solide : module d'Young, loi de Hooke.	Exploiter le modèle de la chaîne d'atomes élastiquement liés pour relier le module d'Young d'un solide élastique à ses caractéristiques microscopiques.
Ondes mécaniques longitudinales dans une tige solide dans l'approximation des milieux continus.	Établir l'équation d'onde décrivant les ondes mécaniques longitudinales dans une tige solide.
Équation de d'Alembert ; célérité.	Identifier l'équation de d'Alembert. Relier qualitativement la célérité d'ondes mécaniques, la raideur et l'inertie du milieu support.
Ondes progressives, ondes progressives harmoniques ; ondes stationnaires.	Différencier une onde stationnaire d'une onde progressive. Utiliser qualitativement l'analyse de Fourier pour décrire une onde non harmonique.
Modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. Résonances d'une corde de Melde.	Décrire les modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. Interpréter quantitativement les résonances observées avec la corde de Melde en négligeant l'amortissement.
<b>6.1.2. Ondes acoustiques dans les fluides</b>	
Approximation acoustique. Équation de d'Alembert pour la surpression acoustique.	Classer les ondes acoustiques par domaines fréquentiels. Valider l'approximation acoustique. Établir, par une approche eulérienne, l'équation de propagation de la surpression acoustique dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes. Utiliser l'opérateur laplacien pour généraliser l'équation d'onde.



Célérité des ondes acoustiques.	Exprimer la célérité des ondes acoustiques en fonction de la température pour un gaz parfait.
Ondes planes progressives harmoniques : caractère longitudinal, impédance acoustique.	Exploiter la notion d'impédance acoustique pour faire le lien entre les champs de surpression et de vitesse d'une onde plane progressive harmonique. Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques.
Densité volumique d'énergie acoustique, vecteur densité de courant énergétique. Intensité sonore. Niveau d'intensité sonore.	Utiliser les expressions admises du vecteur densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde. Citer quelques ordres de grandeur de niveaux d'intensité sonore.
Ondes acoustiques sphériques harmoniques.	Utiliser une expression fournie de la surpression pour interpréter par un argument énergétique la décroissance en $1/r$ de l'amplitude.
<b>6.1.3. Ondes électromagnétiques dans le vide</b>	
Équations de propagation d'un champ électromagnétique dans une région sans charge ni courant.	Établir et citer les équations de propagation d'un champ électromagnétique dans le vide.
Structure d'une onde plane progressive harmonique.	Établir et exploiter la structure d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique. Utiliser la superposition d'ondes planes progressives harmoniques pour justifier les propriétés d'ondes électromagnétiques planes progressives non harmoniques.
Aspects énergétiques.	Relier la direction du vecteur de Poynting et la direction de propagation de l'onde électromagnétique. Interpréter le flux du vecteur de Poynting en termes particuliers. Citer quelques ordres de grandeur de flux énergétiques surfaciques moyens et les relier aux ordres de grandeur des champs électriques associés.
Polarisation des ondes électromagnétiques planes progressives harmoniques : polarisation elliptique, circulaire et rectiligne. Loi de Malus.	Relier l'expression du champ électrique à l'état de polarisation de l'onde.  <b>Utiliser la loi de Malus.</b> <b>Reconnaître une lumière polarisée rectilignement.</b> <b>Distinguer une lumière non polarisée d'une lumière totalement polarisée.</b> <b>Utiliser une lame quart d'onde ou demi-onde pour modifier ou analyser un état de polarisation, avec de la lumière totalement polarisée.</b>

La partie « **Phénomènes de propagation linéaires unidimensionnels** » est consacrée aux phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants. L'étude s'appuie sur des exemples variés empruntés aux domaines de la mécanique ou de l'électromagnétisme. Elle est menée sur des ondes harmoniques planes en représentation complexe puis sur des paquets d'ondes harmoniques planes. S'agissant des paquets d'ondes, on se limite au cas où l'étalement est négligeable.

L'étude de la propagation des ondes dans un plasma dilué est exclusivement limitée aux ondes transverses électriques ; le professeur est invité à signaler, sans soucis d'exhaustivité, quelques limites du modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.2. Phénomènes de propagation linéaires unidimensionnels</b>	
<b>6.2.1. Dispersion et absorption</b>	
Propagation unidimensionnelle d'une onde harmonique dans un milieu linéaire.	Identifier le caractère linéaire d'une équation aux dérivées partielles. Établir la relation de dispersion caractéristique d'un phénomène de propagation en utilisant des ondes de la forme $\exp\pm j(\underline{k}x - \omega t)$ . Distinguer différents types de comportements selon la valeur de la pulsation.
Dispersion, absorption.	Associer les parties réelle et imaginaire de $\underline{k}$ aux phénomènes de dispersion et d'absorption.
Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu non absorbant et faiblement dispersif : vitesse de phase et vitesse de groupe.	Énoncer et exploiter la relation entre les ordres de grandeur de la durée temporelle d'un paquet d'onde et la largeur fréquentielle de son spectre. Déterminer la vitesse de groupe d'un paquet d'ondes à partir de la relation de dispersion. Associer la vitesse de groupe à la propagation de l'enveloppe du paquet d'ondes.  <b>Étudier la propagation d'une onde électrique dans un câble coaxial.</b>  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler la propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu dispersif et visualiser le phénomène d'étalement.
<b>6.2.2. Ondes électromagnétiques dans les milieux matériels</b>	
Propagation d'une onde électromagnétique plane harmonique unidirectionnelle dans un conducteur ohmique de conductivité réelle. Effet de peau dans un conducteur ohmique.	Identifier une analogie avec un phénomène de diffusion. Établir la relation de dispersion des ondes électromagnétiques dans un conducteur ohmique à basses fréquences. Associer l'atténuation de l'onde dans le milieu conducteur à une dissipation d'énergie.

	Estimer l'ordre de grandeur de l'épaisseur de peau du cuivre à différentes fréquences.
Propagation d'une onde électromagnétique plane harmonique transverse et unidirectionnelle dans un plasma dilué. Conductivité électrique complexe.	Justifier la neutralité électrique locale du plasma en présence d'une onde transverse. Établir l'expression de la conductivité électrique complexe du plasma. Interpréter énergétiquement le caractère imaginaire pur de la conductivité électrique complexe du plasma.
Relation de dispersion. Pulsation plasma. Domaine de transparence. Domaine réactif, onde évanescence.	Établir la relation de dispersion des ondes planes progressives harmoniques transverses. Exprimer la vitesse de phase et la vitesse de groupe d'un paquet d'ondes dans le domaine de transparence du plasma. Interpréter la pulsation plasma comme une pulsation de coupure. Citer les caractéristiques d'une onde stationnaire évanescence. Justifier que, dans le domaine réactif, une onde électromagnétique harmonique ne transporte aucune puissance en moyenne.

La partie « **Interfaces entre deux milieux** » est consacrée à la réflexion et la transmission d'ondes à une interface plane sous incidence normale en acoustique et en électromagnétisme. Dans ce dernier cas, on admet que les milieux diélectriques, linéaires, homogènes et isotropes (DLHI) relèvent d'un traitement faisant apparaître l'indice complexe, mais aucune modélisation du comportement des DLHI ne figure au programme. On se limite dans tous les cas à des milieux non magnétiques. La notion de densité de courants superficiels et les relations de passage du champ électromagnétique ne figurent pas au programme de même que la notion de conducteur parfait. Les conditions aux limites sur la composante normale du champ électrique et la composante tangentielle du champ magnétique doivent être fournies si nécessaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.3. Interfaces entre deux milieux</b>	
Réflexion et transmission d'une onde acoustique plane progressive sous incidence normale sur une interface plane infinie entre deux fluides : coefficients de réflexion et de transmission en amplitude des vitesses, des surpressions et des puissances acoustiques surfaciques moyennes.	Expliciter des conditions aux limites à une interface. Établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion. Associer l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance.
Réflexion et transmission d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique polarisée rectilignement à l'interface entre deux milieux d'indices complexes $\underline{n}_1$ et $\underline{n}_2$ dans le cas d'une incidence normale : coefficients de réflexion et de transmission du champ électrique.	Exploiter la continuité admise du champ électromagnétique dans cette configuration pour obtenir l'expression des coefficients de réflexion et de transmission en fonction des indices complexes. Utiliser les expressions des coefficients de réflexion et de transmission du champ électrique dans des situations variées. Établir et interpréter les expressions des coefficients de réflexion et de transmission en puissance dans le cas d'une interface

	entre deux milieux diélectriques linéaires, homogènes, isotropes et transparents.  <b>Étudier la réflexion en amplitude de tension d'une onde électrique à l'extrémité d'un câble coaxial pour une impédance terminale nulle, infinie ou résistive.</b>
--	---

La partie « **Introduction à la physique du laser** » est consacrée à une introduction modeste à la physique du laser. Une approche descriptive des milieux amplificateurs de lumière est d'abord proposée ainsi qu'une introduction descriptive simplifiée à l'optique des faisceaux spatialement limités, dont l'un des objectifs est de pouvoir déterminer la puissance surfacique disponible, à partir de la prévision des dimensions de la tache de section minimale dans des configurations optiques élémentaires. On se limite au mode fondamental gaussien.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.4. Introduction à la physique du laser</b>	
<b>6.4.1. Milieu amplificateur de lumière</b>	
Absorption, émission stimulée, émission spontanée.	Distinguer les propriétés d'un photon émis par émission spontanée ou stimulée.
Coefficients d'Einstein.	Associer l'émission spontanée à la durée de vie d'un niveau excité. Utiliser les coefficients d'Einstein dans le cas d'un système à plusieurs niveaux non dégénérés.
Amplification d'ondes lumineuses par émission stimulée.	Justifier qualitativement la nécessité d'une inversion de population pour parvenir à amplifier une onde électromagnétique dans un laser.
<b>6.4.2. Propriétés optiques d'un faisceau spatialement limité</b>	
Description simplifiée d'un faisceau de profil gaussien : waist, longueur de Rayleigh, ouverture angulaire.	Justifier qualitativement l'inadéquation du modèle de l'onde plane pour décrire un faisceau laser. Utiliser l'expression fournie du profil radial d'intensité. Construire l'allure d'un faisceau de profil gaussien à partir de l'enveloppe d'un faisceau cylindrique et d'un faisceau conique. Exploiter qualitativement le phénomène de diffraction pour relier le waist et l'ouverture angulaire du faisceau à grande distance.
Transformation à l'aide d'une lentille d'un faisceau cylindrique en faisceau conique et réciproquement. Élargisseur de faisceau.	Déterminer la dimension et la position de la section minimale du faisceau émergent d'une lentille éclairée par un faisceau cylindrique.

Les parties précédentes ont permis d'introduire les outils et concepts de base associés à la physique des ondes, particulièrement tant qu'elle est régie par des équations aux dérivées partielles linéaires. S'il est un domaine où cette notion de linéarité joue un rôle central, c'est bien celui de la mécanique quantique.

La partie « **Approche ondulatoire de la mécanique quantique** » présente quelques-unes des notions associées à une description ondulatoire de ce domaine. La démarche adoptée, volontairement modeste, est centrée sur un approfondissement des notions introduites en première année que sont la dualité onde-corpuscule et l'inégalité de Heisenberg spatiale, les objectifs étant désormais quantitatifs. Il s'agit, sur des systèmes unidimensionnels et des situations physiques simplifiées d'envisager quelques conséquences qui découlent de cette description ondulatoire : l'effet tunnel et ses applications sont ainsi discutés comme aboutissement naturel des notions abordées dans cette partie. Elle est ancrée dans le réel : on insiste sur le fait que les situations envisagées décrivent des systèmes physiques réels effectivement unidimensionnels

Toute discussion autour de la mesure et de ses effets sur un système est exclue, de même que toute introduction au spin. L'accent est mis avant tout sur la mise en équations des situations physiques proposées à l'aide des outils de la physique des ondes, et sur la discussion graphique des résultats qui en découlent. Tout développement des calculs intermédiaires est donc naturellement proscrit et les expressions sur lesquelles s'appuient les discussions qualitatives doivent être fournies.

Le courant de probabilité est introduit dans un contexte restreint avec pour seul objectif d'exprimer le coefficient de transmission d'une barrière de potentiel.

<b>6.5. Approche ondulatoire de la mécanique quantique</b>	
<b>6.5.1. Amplitude de probabilité</b>	
Fonction d'onde $\psi(x,t)$ associée à une particule dans un problème unidimensionnel. Densité linéique de probabilité de présence.	Normaliser une fonction d'onde. Relier qualitativement la fonction d'onde à la notion d'orbitale en chimie.
Principe de superposition. Interférences.	Relier la superposition de fonctions d'ondes à la description d'une expérience d'interférences entre particules.
<b>6.5.2. Équation de Schrödinger pour une particule libre</b>	
Équation de Schrödinger.	Utiliser l'équation de Schrödinger fournie.
États stationnaires.	Associer les états stationnaires aux états d'énergie déterminée. Établir et utiliser la forme $\psi(x,t) = \phi(x) \exp(-iEt/\hbar)$ pour la fonction d'onde d'un état stationnaire et l'associer à la relation de Planck-Einstein. Distinguer l'onde associée à un état stationnaire en mécanique quantique d'une onde stationnaire au sens usuel de la physique des ondes.
Paquet d'ondes associé à une particule libre. Relation $\Delta k_x \Delta x \geq 1/2$ .	Utiliser l'équation de Schrödinger pour déterminer la partie spatiale $\phi(x)$ des fonctions d'onde stationnaires décrivant une particule libre. Identifier la vitesse d'une particule libre et la vitesse du paquet d'ondes la décrivant. Exploiter l'inégalité de Heisenberg pour relier l'étendue spatiale et l'étendue spectrale du paquet d'ondes décrivant une particule libre.

Courant de probabilité associé à une particule libre.	Utiliser l'expression admise du courant de probabilité associé à une particule libre et l'interpréter comme un produit densité*vitesse.
<b>6.5.3. Équation de Schrödinger dans un potentiel <math>V(x)</math> uniforme par morceaux</b>	
Quantification de l'énergie dans un puits de potentiel rectangulaire de profondeur infinie.	Établir les expressions des énergies des états stationnaires. Retrouver qualitativement l'énergie minimale à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale.
Énergie de confinement quantique.	Associer le confinement d'une particule quantique à une augmentation de l'énergie cinétique.
Évolution temporelle d'une particule confinée dans une superposition d'états.	Mettre en évidence les oscillations d'une particule dont la fonction d'onde s'écrit comme la superposition de deux états stationnaires et relier la fréquence d'oscillation à la différence des énergies.
Quantification de l'énergie des états liés dans un puits de profondeur finie. Élargissement effectif du puits par les ondes évanescentes.	Décrire la forme des fonctions d'onde dans les différents domaines. Utiliser les conditions aux limites admises : continuité de $\phi$ et $d\phi/dx$ . Associer la quantification de l'énergie au caractère lié de la particule. Mener une discussion graphique. Interpréter qualitativement, à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale, l'abaissement des niveaux d'énergie par rapport au puits de profondeur infinie.
<b>6.5.4. Effet tunnel</b>	
Effet tunnel. Coefficient de transmission associé à une particule libre incidente sur une barrière de potentiel.	Citer quelques applications de l'effet tunnel. Définir le coefficient de transmission comme un rapport de courants de probabilités. Utiliser une expression fournie du coefficient de transmission à travers une barrière de potentiel.

### Annexe 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en annexe 1 du programme de physique de PCSI. À elles deux, ces listes regroupent le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée. Une utilisation de matériel hors de ces listes lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une aide.

#### 1. Domaine optique

- Lames quart d'onde, lames demi-onde
- Interféromètre de Michelson

#### 2. Domaine électrique

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Physique PC

Méthodes d'exploitation des courbes expérimentales.	Exploiter une courbe de titrage pour déterminer la quantité de matière, masse ou concentration de l'espèce titrée. Exploiter une courbe de titrage pour déterminer une valeur expérimentale d'une constante thermodynamique d'équilibre. Utiliser un logiciel de simulation pour tracer des courbes de distribution et confronter la courbe de titrage simulée à la courbe expérimentale. Justifier la nécessité d'effectuer un titrage indirect. Distinguer équivalence et repérage de fin de titrage.
<b>Suivi cinétique de transformations chimiques</b> Suivi de l'évolution temporelle d'une grandeur physique. Limitation de l'évolution temporelle (trempe) d'un système par dilution, transformation chimique ou refroidissement. Régulation de la température.	Choisir une méthode de suivi prenant en compte la facilité de mise en œuvre, les propriétés des espèces étudiées, la durée de la transformation estimée ou fournie. Exploiter les résultats d'un suivi temporel de concentration pour déterminer les caractéristiques cinétiques d'une réaction. Proposer et mettre en œuvre des conditions expérimentales permettant la simplification de la loi de vitesse. Déterminer une énergie d'activation.

## Contenus thématiques

Les contenus thématiques de la classe de PC complètent ceux introduits en PCSI en chimie sur la constitution et les transformations de la matière et en physique sur la thermodynamique et la mécanique quantique. Ils enrichissent des modèles déjà abordés et en introduisent de nouveaux tant à l'échelle microscopique que macroscopique : modèle quantique des atomes et des molécules, modèles de réacteurs ouverts, etc.

Tout au long des deux années, la formation en chimie privilégie la capacité de l'étudiant·e à raisonner, à prévoir et à transposer ses connaissances dans des situations nouvelles ou sur des espèces proches de celles étudiées, plutôt que sa capacité à restituer, à reproduire. Ainsi les programmes sont structurés autour des outils du raisonnement que sont les théories et les modèles de comportement macroscopique ou microscopique et non pas autour d'une présentation encyclopédique, systématique, des espèces chimiques et des réactions associées.

Il s'agit de montrer que la chimie est une science au sein de laquelle la dialectique entre savoirs et méthodes permet d'aborder des situations nouvelles et de construire de nouvelles connaissances en chimie mais aussi aux interfaces avec la biologie, la physique, les géosciences. Ainsi formés en chimie, les futur·es ingénieur·es ou chercheur·es scientifiques pourront être acteurs de l'innovation, que ce soit dans le cadre de la recherche, du développement et de la production industrielle pour relever les défis sociétaux et environnementaux à venir.

L'ordre de présentation des contenus proposé n'est pas nécessairement celui qui doit être adopté par l'enseignant·e qui dispose de toute liberté pour effectuer des choix et établir sa propre progression annuelle dont le seul objectif reste de permettre l'acquisition par tous les étudiant·es de l'ensemble des capacités exigibles. Un travail en collaboration avec l'enseignant·e de physique est vivement recommandé afin de favoriser les apprentissages sur les domaines communs abordés dans les deux disciplines. Par ailleurs, les contenus thématiques précisent les concepts et les

modèles à étudier : l'enseignant·e les aborde à partir de problématiques authentiques et les illustre par des applications concrètes et motivantes.

### 1. Transformations chimiques de la matière : aspects thermodynamique et cinétique

- 1.1. Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques
- 1.2. Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques
- 1.3. Procédés industriels continus : aspects cinétiques et thermodynamiques
- 1.4. Changements de phase de corps purs et de mélanges binaires
- 1.5. Thermodynamique et cinétique des transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction

### 2. Constitution de la matière : modélisation quantique et réactivité

- 2.1. Orbitales atomiques
- 2.2. Orbitales moléculaires et réactivité
- 2.3. Constitution et réactivité des complexes

### 3. Transformations de la matière en chimie organique

- 3.1. Conversion de groupes caractéristiques
- 3.2. Création de liaisons carbone-carbone

## 1. Transformations chimiques de la matière : aspects thermodynamique et cinétique

Au laboratoire et dans l'industrie, l'innovation comme l'optimisation des techniques et des procédés de synthèse ou de séparation s'appuient sur des fondements thermodynamiques et cinétiques. La thermodynamique notamment permet de prévoir si la transformation envisagée est possible ou non et de trouver d'éventuelles pistes d'augmentation du rendement en faisant évoluer l'état d'équilibre final du système. Elle permet aussi d'appréhender les propriétés physico-chimiques des mélanges et d'envisager une voie d'accès aux corps purs.

Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- appliquer les deux principes de la thermodynamique à la transformation physico-chimique ;
- aborder les changements d'échelle opérés dans les procédés industriels avec les transformations et effets thermiques mis en jeu dans des réacteurs continus ;
- utiliser les diagrammes isobares de mélanges binaires pour interpréter les techniques de séparation ;
- appliquer les notions de thermodynamique et de cinétique aux réactions d'oxydo-réduction mises en jeu dans les piles et les électrolyseurs.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- faire preuve de rigueur dans la définition et la description d'un système physico-chimique ;
- modéliser un système réel ;
- distinguer modélisation d'une transformation (réaction et écriture de l'équation de réaction) et description quantitative de l'évolution d'un système prenant en compte les conditions expérimentales choisies pour réaliser la transformation ;
- établir un bilan thermique ;
- confronter des grandeurs calculées ou tabulées à des mesures expérimentales ;
- pratiquer un raisonnement qualitatif ou quantitatif à partir de représentations graphiques.



### 1.1. Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques

L'étude des transferts thermiques, abordée en première année dans le cadre du cours de physique relatif à la transformation du corps pur, est ici généralisée aux transformations physico-chimiques isobares. Les enthalpies standard de réaction sont considérées comme indépendantes de la température.

Les notions et contenus sont illustrés à travers des applications liées à la vie quotidienne (contenu calorifique des aliments, PCI et PCS des carburants, etc.), à la recherche (apports des techniques calorimétriques modernes, etc.) ou au domaine industriel. Un prolongement est proposé dans le cadre de l'étude thermique au sein des réacteurs continus dans la partie portant sur les procédés industriels.

Notions et contenus	Capacités exigibles
État standard. Enthalpie standard de réaction. Loi de Hess. État standard de référence d'un élément, enthalpie standard de formation. Enthalpie standard de dissociation de liaison.	Déterminer une enthalpie standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques.
Effets thermiques lors d'une transformation monobare : - transfert thermique associé à la transformation chimique monobare monotherme ; - variation de température lors d'une transformation monobare et adiabatique.	Prévoir le sens et calculer la valeur du transfert thermique entre un système, siège d'une transformation physico-chimique monobare et monotherme, et le milieu extérieur. Évaluer la température atteinte par un système siège d'une transformation physico-chimique, monobare et adiabatique. <b>Capacité numérique</b> : tracer, à l'aide d'un langage de programmation, l'évolution temporelle de la température pour un système siège d'une transformation adiabatique modélisée par une seule réaction chimique dont les caractéristiques cinétiques et l'enthalpie standard de réaction sont données. <b>Déterminer une enthalpie standard de réaction.</b>

### 1.2. Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques

Le critère d'évolution spontanée d'un système, utilisé dès la première année en chimie, est démontré par application du second principe de la thermodynamique introduit en physique en première année. On adopte pour les potentiels chimiques une expression générale :  $\mu_i = \mu_i^{\text{réf}} + RT \times \ln(a_i)$  qui fait référence aux activités  $a_i$  introduites en première année. L'influence de la pression sur le potentiel chimique d'une espèce en phase condensée est illustrée à travers le phénomène d'osmose.

Les transformations physico-chimiques envisagées sont des transformations isobares. Pour le calcul des grandeurs standard de réaction, les enthalpies et entropies standard de réaction sont supposées indépendantes de la température. Les capacités numériques abordées en PCSI pour déterminer l'état final d'un système dont la transformation est modélisée par une ou deux réactions peuvent être réactivées.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Chimie PC

En première année, la relation d'Arrhenius a permis de modéliser, au niveau macroscopique, l'évolution de la constante de vitesse d'une réaction chimique avec la température et a introduit la notion d'énergie d'activation qui suggère qu'un système doit surmonter une barrière énergétique pour réagir ; cette modélisation empirique n'a nécessité aucune connaissance microscopique sur l'évolution du système et sur le mécanisme réactionnel. La théorie du complexe activé (état de transition) repose sur un modèle microscopique (dont les hypothèses ne sont pas abordées) et permet de relier les propriétés d'un système réactif à la constante de vitesse de réaction à travers la relation d'Eyring (non démontrée) dont l'expression est analogue à celle de la relation d'Arrhenius. La constante de vitesse est ainsi reliée aux enthalpie et entropie standard d'activation, définies en considérant les différences de ces grandeurs entre état de transition et état réactif.

Problématiques, illustrations et applications sont choisies dans le domaine industriel (optimisation d'une synthèse, traitement d'une eau par procédés osmotiques, etc.), en biologie (ATP et réactions couplées, respiration, etc.), et en géosciences (sédimentation, concrétions calcaires, etc.), mais aussi au niveau du laboratoire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Identités thermodynamiques ; potentiel chimique. Entropie, entropie molaire standard absolue. Enthalpie libre.	Écrire les identités thermodynamiques pour les fonctions $U$ , $H$ et $G$ . Distinguer et justifier le caractère intensif ou extensif des grandeurs physiques utilisées. Interpréter qualitativement une variation d'entropie en termes de nombre de micro-états accessibles.
Potentiel chimique dans le cas modèle des gaz parfaits : $\mu_i = \mu_i^\circ(T) + RT \times \ln(p_i/p^\circ)$ Potentiel chimique $\mu_i = \mu_i^{\text{réf}} + RT \times \ln a_i$ dans les cas modèles de : <ul style="list-style-type: none"> <li>- espèces chimiques en phase condensée en mélange idéal ;</li> <li>- solutés infiniment dilués.</li> </ul> Influence de la pression sur $\mu_i^{\text{réf}}$ pour des espèces en phase condensée.	Établir l'expression du potentiel chimique dans le cas modèle des gaz parfaits purs. Utiliser le potentiel chimique pour prévoir l'évolution d'un système contenant une espèce chimique dans plusieurs phases. Exprimer l'enthalpie libre d'un système chimique en fonction des potentiels chimiques. Déterminer une variation d'enthalpie libre, d'enthalpie et d'entropie entre deux états du système chimique.
Osmose, pression osmotique d'une solution.	Utiliser le potentiel chimique pour interpréter le transfert d'un solvant au travers d'une membrane. Relier la pression osmotique à la différence de potentiel chimique du solvant dans les deux phases.
Enthalpie de réaction, entropie de réaction, enthalpie libre de réaction ; grandeurs standard associées. Relation entre enthalpie libre de réaction et quotient de réaction. Équilibre physico-chimique. Constante thermodynamique d'équilibre ; relation de van't Hoff.	Justifier qualitativement ou prévoir le signe de l'entropie standard de réaction. Relier enthalpie libre de réaction et création d'entropie lors d'une transformation d'un système physico-chimique. Prévoir le sens d'évolution d'un système physico-chimique dans un état donné à l'aide de l'enthalpie libre de réaction.

<p>Relation entre enthalpie libre de réaction, constante thermodynamique d'équilibre et quotient de réaction.</p>	<p>Déterminer une grandeur standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques et de la loi de Hess.</p> <p>Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à une température quelconque.</p> <p>Déterminer la composition chimique d'un système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une ou plusieurs réactions chimiques.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le taux d'avancement à l'équilibre en fonction de la température pour un système siège d'une transformation chimique modélisée par une seule réaction.</p>
<p>Nombre de degrés de liberté d'un système physico-chimique à l'équilibre ; variance.</p>	<p>Reconnaître si une grandeur intensive est ou non un facteur d'équilibre.</p> <p>Dénombrer les degrés de liberté d'un système à l'équilibre et interpréter le résultat.</p>
<p>Enthalpie libre standard d'activation, enthalpie standard d'activation, entropie standard d'activation.</p>	<p>Déterminer une enthalpie standard ou une entropie standard d'activation à partir de données cinétiques, la relation d'Eyring étant fournie.</p> <p>Relier l'entropie standard d'activation aux contraintes dans l'état de transition.</p> <p>Interpréter l'action d'un catalyseur à l'aide de données sur les enthalpies et entropies standard d'activation.</p>

### 1.3. Procédés industriels continus : aspects cinétiques et thermodynamiques

Les transformations chimiques de la matière réalisées au laboratoire mettent en jeu de faibles quantités de matière et sont conduites en réacteur fermé. À l'échelle industrielle, les transformations mettent en jeu des quantités de matière beaucoup plus élevées et sont souvent conduites en réacteur ouvert pour assurer un fonctionnement continu.

Les chimistes peuvent être amenés à transposer à l'échelle industrielle un protocole élaboré au laboratoire.

L'objectif de cette partie est un réinvestissement de connaissances acquises en cinétique et en thermodynamique dans le cadre d'une initiation aux bilans de matière et aux bilans thermiques effectués sur des réacteurs ouverts continus.

L'étude des opérations unitaires s'inscrit dans le prolongement de la mécanique des fluides en physique, et, en chimie, de la cinétique en réacteur fermé et de la thermodynamique, domaines qui sont à la base du génie des procédés et de la technologie chimique.

Les modèles de réacteurs continus idéaux étudiés sont transposables aux réacteurs microfluidiques, mais également en biologie et en géosciences.

Sensibiliser les étudiant·es aux enjeux spécifiques du secteur industriel est un élément majeur de leur formation. Des procédés chimiques innovants s'imposent pour développer des techniques et des appareils adaptés permettant d'obtenir des rendements supérieurs à ceux des procédés conventionnels, tout en limitant leurs impacts environnementaux, en mettant au point des procédés

plus sûrs, moins consommateurs d'énergie, de matières premières et de solvants et également moins polluants.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>D'un protocole de laboratoire à un procédé industriel</b>	
Opérations unitaires d'un procédé.  Procédés discontinus.  Procédés continus en régime stationnaire : débit de matière en masse et en quantité de matière, bilan de matière.	Exploiter un schéma de procédé légendé.  Identifier un procédé continu ou discontinu.  Effectuer un bilan de matière global ou sur une seule espèce pour une opération unitaire d'un procédé continu de caractéristiques données.
<b>Cinétique de transformations en réacteur chimique ouvert</b>	
Modèle du réacteur parfaitement agité continu en régime stationnaire dans le cas d'un écoulement de débits en volume égaux à l'entrée et à la sortie ; dimensionnement du réacteur.  Taux de conversion d'un réactif.  Temps de passage.	Effectuer un bilan de matière pour un réacteur parfaitement agité continu.  Relier le taux de conversion du réactif au temps de passage pour une transformation modélisée par une réaction de loi de vitesse donnée.  Estimer le dimensionnement d'un réacteur parfaitement agité continu pour un taux de conversion et un débit de matière donnés.
Modèle du réacteur chimique en écoulement piston isotherme en régime stationnaire dans le cas de débits en volume égaux à l'entrée et à la sortie du réacteur ; dimensionnement du réacteur.	Établir un bilan de matière pour un réacteur en écoulement piston.  Relier le taux de conversion en sortie d'un réacteur en écoulement piston et le temps de passage pour une transformation modélisée par une loi de vitesse d'ordre 1.  Estimer le dimensionnement d'un réacteur en écoulement piston pour un taux de conversion et un débit de matière donné.
<b>Étude thermique d'un réacteur chimique ouvert</b>	
Bilan énergétique sur un réacteur parfaitement agité continu en régime stationnaire dans le cas de débits en volume égaux à l'entrée et à la sortie.  Sécurité des réacteurs : flux thermique et régulation de température.	Effectuer un bilan énergétique sur un réacteur parfaitement agité continu en régime stationnaire.  Déterminer la température de fonctionnement d'un réacteur parfaitement agité continu de caractéristiques données dans l'hypothèse d'une transformation adiabatique.  Déterminer le flux thermique échangé par un réacteur parfaitement agité dans des conditions de fonctionnement données.  <b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation, déterminer le(s) point(s) de fonctionnement (température et taux de conversion) d'un réacteur parfaitement agité continu siège d'une transformation modélisée par une réaction unique et en discuter la stabilité.

### 1.4. Changements de phase de corps purs et de mélanges binaires

L'étude des changements de phase de corps purs et de mélanges binaires s'effectue à l'aide de diagrammes isobares construits à partir des courbes d'analyse thermique ou fournis. Les tracés théoriques ne sont pas attendus. Ces diagrammes sont utilisés pour interpréter les techniques de distillations.

L'enseignant·e choisit des exemples concrets relatifs à des problématiques rencontrées au laboratoire et à des procédés industriels.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Corps pur, mélange, système binaire, fractions molaire et massique.</p> <p>Miscibilité totale, partielle ou nulle.</p>	<p>Convertir des fractions molaires en fractions massiques dans le cas de systèmes binaires et inversement.</p> <p>Interpréter la miscibilité à l'échelle microscopique par les interactions entre entités.</p> <p>Citer la température comme facteur d'influence de la miscibilité.</p>
<p>Diagrammes isobares d'équilibre liquide-vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- avec miscibilité totale à l'état liquide,</li> <li>- avec miscibilité nulle à l'état liquide,</li> <li>- avec miscibilité partielle à l'état liquide.</li> </ul> <p>Théorème des moments chimiques.</p>	<p>Construire un diagramme isobare d'équilibre entre phases d'un mélange binaire à partir d'informations relatives aux courbes d'analyse thermique.</p> <p>Décrire les caractéristiques des mélanges homoazéotropes, hétéroazéotropes.</p> <p>Exploiter les diagrammes isobares d'équilibre entre phases, pour une composition en fraction molaire ou massique donnée :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- tracer l'allure de la courbe d'analyse thermique en indiquant le nombre de degrés de liberté du système sur chaque partie de la courbe ;</li> <li>- déterminer les températures de début et de fin de changement d'état ;</li> <li>- déterminer la composition des phases en présence à une température fixée ainsi que les quantités de matière ou les masses dans chaque phase.</li> </ul> <p>Déterminer la solubilité d'une des espèces chimiques du système binaire dans l'autre à partir du diagramme binaire.</p>
<p>Distillations.</p>	<p>Interpréter une distillation simple, une hydrodistillation, une distillation fractionnée, à l'aide des diagrammes isobares d'équilibre liquide-vapeur.</p> <p><b>Mettre en œuvre une distillation fractionnée ou une hydrodistillation à la pression atmosphérique.</b></p>

### 1.5. Thermodynamique et cinétique des transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction

L'importance des systèmes électrochimiques se manifeste dans la diversité de leurs applications : accumulateurs et procédés d'électrosynthèse mettent en jeu la conversion d'énergie électrique en énergie chimique, des capteurs électrochimiques sont utilisés dans l'analyse de l'eau, de l'air ou d'effluents, la protection contre la corrosion est un enjeu sociétal important, etc.

L'étude thermodynamique et cinétique des réactions d'oxydo-réduction développée dans cette partie se fonde sur les acquis de cinétique chimique et sur l'étude des réactions d'oxydo-réduction et des piles débutée en première année, ainsi que sur la partie de thermodynamique chimique de seconde année.

L'approche de l'électrochimie proposée ici privilégie les raisonnements qualitatifs et les aspects expérimentaux, plutôt que les développements théoriques et mathématisés. Les courbes courant-potential, dont le tracé est proposé en capacité expérimentale, sont un outil essentiel dans la compréhension et la modélisation des systèmes électrochimiques. L'étude d'une électrolyse complète les capacités expérimentales sur les piles développées en première année.

L'écart entre le potentiel d'une électrode et son potentiel d'équilibre est appelé surpotential plutôt que surtension pour des raisons pédagogiques, en cohérence avec le vocabulaire anglo-saxon correspondant.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction</b>	
Relation entre enthalpie libre de réaction et potentiels de Nernst des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.	Citer et exploiter la relation entre l'enthalpie libre de réaction et les potentiels de Nernst des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.
Relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard des couples impliqués.	Déterminer l'enthalpie libre standard d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples mis en jeu.  Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple d'oxydo-réduction à partir de données thermodynamiques (constantes d'équilibre, potentiels standard).
Approche thermodynamique du fonctionnement d'une pile électrochimique.	Relier tension à vide d'une pile et enthalpie libre de réaction.  Décrire et expliquer le fonctionnement d'une pile électrochimique à partir de données sur sa constitution et de tables de potentiels standard.
<b>Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction</b>	
<b>Courbes courant-potential sur une électrode en régime stationnaire :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- surpotential,</li> <li>- systèmes rapides et systèmes lents,</li> <li>- nature de l'électrode,</li> <li>- courant limite de diffusion,</li> <li>- vagues successives,</li> <li>- domaine d'inertie électrochimique du solvant.</li> </ul>	Relier vitesse de réaction électrochimique et intensité du courant.  Identifier les espèces électroactives pouvant donner lieu à une limitation en courant par diffusion.  Relier, qualitativement ou quantitativement, l'intensité du courant limite de diffusion à la concentration du réactif, au nombre d'électrons échangés et à la surface immergée de l'électrode.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Utilisation des courbes courant-potentiel</b></p> <p>Transformations spontanées :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- notion de potentiel mixte,</li> <li>- fonctionnement d'une pile électrochimique.</li> </ul>	<p>Tracer l'allure de courbes courant-potentiel à partir de données fournies.</p> <p>Identifier les paramètres d'influence du domaine d'inertie électrochimique du solvant.</p> <p><b>Tracer et utiliser des courbes courant-potentiel.</b></p> <p>Reconnaitre une transformation spontanée et étudier qualitativement sa vitesse à partir de courbes courant-potentiel données.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'une pile électrochimique et prévoir la valeur de la tension à vide.</p> <p>Citer les paramètres influençant la résistance interne d'une pile.</p>
<p>Transformations forcées : électrolyse, recharge d'un accumulateur.</p>	<p><b>Mettre en œuvre une électrolyse.</b></p> <p>Utiliser les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'un dispositif siège d'une électrolyse et prévoir la valeur de la tension minimale à imposer.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potentiel pour justifier la nécessité :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- de purifier une solution électrolytique avant l'électrolyse,</li> <li>- de choisir les électrodes permettant de réaliser l'électrolyse voulue.</li> </ul> <p>Déterminer un rendement faradique à partir d'informations fournies concernant le dispositif étudié.</p> <p>Déterminer la masse de produit formé pour une durée et des conditions données d'électrolyse.</p> <p>Citer les paramètres influençant la résistance interne du dispositif siège d'une électrolyse.</p>
<p>Stockage et conversion d'énergie chimique.</p>	<p>Identifier piles, électrolyseurs et accumulateurs comme des dispositifs mettant en jeu des conversions entre énergie chimique et énergie électrique.</p>

## 2. Constitution de la matière : modélisation quantique et réactivité

La catalyse par les complexes des métaux de transition trouve de très nombreuses applications comme par exemple la réaction de Heck en chimie fine, la carbonylation du méthanol en chimie industrielle, les processus de respiration et de photosynthèse en chimie du vivant. Elle s'inscrit dans la démarche vertueuse de la chimie éco-responsable et permet notamment des synthèses dans des conditions douces. La compréhension de ces systèmes catalytiques nécessite l'analyse de la structure électronique des complexes par l'utilisation des orbitales atomiques et moléculaires.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Chimie PC

Ces nouveaux modèles de description de la matière à l'échelle microscopique complètent la description des entités moléculaires abordée en première année, en s'appuyant sur la notion de fonction d'onde introduite dans le programme de physique de PCSI. L'objectif de cette description microscopique est l'interprétation et la prévision de la réactivité dans le cadre de l'approximation des orbitales frontalières.

Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- construire des diagrammes d'orbitales moléculaires ou les interpréter en vue de la prévision de la réactivité d'une entité chimique ;
- interpréter des propriétés des complexes de métaux de transition et l'utilisation de ces complexes comme catalyseurs ou éléments structurants.

### 2.1. Orbitales atomiques

La modélisation quantique de l'atome a été abordée en première année dans le cadre du cours de physique au travers des concepts de fonction d'onde et de quantification de l'énergie, ainsi que du modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène. Ces premiers éléments sont ici réinvestis pour construire le modèle quantique de l'atome d'hydrogène et des atomes polyélectroniques. Aucune détermination d'expression analytique d'une fonction d'onde n'est attendue.

Cette partie est par ailleurs l'occasion de relier la construction du tableau périodique des éléments, utilisé depuis le lycée, à la modélisation quantique de l'atome et de compléter la description de l'organisation de cet outil essentiel pour les chimistes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Fonctions d'onde électroniques <math>\psi</math> de l'atome d'hydrogène.</p> <p>Nombres quantiques <math>n, l, m_l, m_s</math>.</p> <p>Énergie et rayon associés à une fonction d'onde.</p>	<p>Interpréter <math> \psi ^2</math> comme la densité de probabilité de présence d'un électron en un point et la relier à la densité de charge.</p> <p>Prévoir qualitativement, pour l'atome d'hydrogène et les ions hydrogénoïdes, l'évolution du rayon et de l'énergie associés à une fonction d'onde en fonction du nombre quantique principal.</p>
<p>Orbitales des atomes polyélectroniques, représentation schématique.</p> <p>Configuration électronique d'un atome et d'un ion monoatomique.</p> <p>Électrons de cœur et de valence.</p>	<p>Dessiner l'allure des orbitales atomiques s et p.</p> <p>Établir la configuration électronique d'un atome ou d'un ion à l'état fondamental.</p> <p>Déterminer le nombre d'électrons non appariés d'un atome dans son état fondamental.</p>
<p>Notion qualitative de charge effective.</p> <p>Électronégativité.</p> <p>Rayon d'une orbitale atomique, polarisabilité.</p>	<p>Relier qualitativement le rayon associé à une orbitale atomique à la charge effective.</p> <p>Relier qualitativement l'énergie associée à une orbitale atomique à l'électronégativité de l'atome.</p> <p>Relier qualitativement le rayon associé aux orbitales de valence d'un atome à sa polarisabilité.</p>
<p>Architecture du tableau périodique des éléments.</p> <p>Organisation par blocs.</p>	<p>Relier la position d'un élément dans le tableau périodique à la configuration électronique de l'atome associé dans son état fondamental.</p>



Situer dans le tableau les familles suivantes : métaux alcalins et alcalino-terreux, halogènes et gaz nobles.

## 2.2. Orbitales moléculaires et réactivité

La construction des diagrammes d'orbitales moléculaires est limitée aux cas des molécules diatomiques  $A_2$  ou AB, sans mélange d'orbitales s et p. En revanche, les diagrammes d'interaction impliquant trois orbitales ou plus ne sont pas à construire mais sont fournis à l'étudiant·e qui doit pouvoir les interpréter : remplissage des niveaux, identification des orbitales frontalières HO et BV, analyse du caractère liant, antiliant ou non liant d'une orbitale moléculaire.

De même, la construction des diagrammes d'orbitales moléculaires de systèmes plus complexes est hors programme ; l'étudiant·e interprète ces diagrammes à partir des propriétés de deux fragments en interaction dont les orbitales sont fournies.

Dans le but de disposer de modèles simples applicables en chimie organique, l'approximation des orbitales frontalières permet de prévoir la réactivité électrophile ou nucléophile des entités mises en jeu ; ce modèle complète l'étude de l'addition nucléophile et de la substitution nucléophile abordées en première année. Ces orbitales peuvent être obtenues grâce à des logiciels ou à partir de bases de données.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Construction des orbitales moléculaires</b></p> <p>Méthode de Combinaison Linéaire des Orbitales Atomiques.</p> <p>Interaction de deux orbitales atomiques sur deux centres :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- recouvrement ;</li> <li>- orbitales liante, antiliante, non liante ;</li> <li>- énergie d'une orbitale moléculaire ;</li> <li>- orbitale <math>\sigma</math>, orbitale <math>\pi</math> ;</li> <li>- représentation conventionnelle d'une orbitale moléculaire par schématisation graphique de la combinaison linéaire des orbitales atomiques.</li> </ul> <p>Interaction d'orbitales de fragments.</p> <p>Diagramme d'orbitales moléculaires : occupation des niveaux, orbitales frontalières haute occupée et basse vacante, cas des entités radicalaires.</p> <p>Ordre de liaison dans les molécules diatomiques.</p>	<p>Identifier les conditions d'interaction de deux orbitales atomiques : recouvrement et critère énergétique.</p> <p>Construire des orbitales moléculaires de molécules diatomiques par interaction d'orbitales atomiques du même type (s-s, p-p).</p> <p>Reconnaître le caractère liant, antiliant, non liant d'une orbitale moléculaire à partir de sa représentation conventionnelle ou d'une surface d'iso-densité.</p> <p>Identifier la symétrie <math>\sigma</math> ou <math>\pi</math> d'une orbitale moléculaire à partir de sa représentation conventionnelle ou d'une surface d'iso-densité.</p> <p>Proposer une représentation conventionnelle d'une orbitale moléculaire tenant compte d'une éventuelle dissymétrie du système.</p> <p>Justifier la dissymétrie d'une orbitale moléculaire obtenue par interaction d'orbitales atomiques centrées sur des atomes d'éléments différents.</p> <p>Prévoir ou interpréter l'ordre énergétique des orbitales moléculaires et établir qualitativement un diagramme énergétique d'orbitales d'une molécule diatomique.</p> <p>Justifier l'existence d'interactions entre orbitales de fragment en termes de recouvrement ou d'écart d'énergie.</p>

	<p>Décrire l'occupation des niveaux d'un diagramme d'orbitales moléculaires.</p> <p>Identifier les orbitales frontalières à partir d'un diagramme d'orbitales moléculaires de valence fourni.</p> <p>Interpréter un diagramme d'orbitales moléculaires obtenu par interaction des orbitales de deux fragments, fournies.</p> <p>Relier, dans une molécule diatomique, l'évolution des caractéristiques de la liaison à l'évolution de l'ordre de liaison.</p>
<p><b>Prévision de la réactivité</b></p> <p>Approximation des orbitales frontalières.</p>	<p>Utiliser les orbitales frontalières pour prévoir la réactivité nucléophile ou électrophile d'une entité (molécule ou ion).</p> <p>Interpréter l'addition nucléophile sur le groupe carbonyle et la substitution nucléophile en termes d'interactions frontalières.</p> <p>Comparer la réactivité de deux entités à l'aide des orbitales frontalières.</p>

### 2.3. Constitution et réactivité des complexes

L'étude de la structure des complexes est limitée à l'interprétation de la liaison entre l'atome central et le ligand par l'interaction entre une orbitale d d'une entité du bloc d et une orbitale d'un ligand  $\sigma$ -donneur ou d'un ligand ayant des effets  $\pi$ , par une démarche identique à celle développée dans la partie « Orbitales moléculaires et réactivité ». Les représentations des orbitales d ne sont pas exigibles et doivent être fournies. La construction complète du diagramme d'orbitales moléculaires d'un complexe et la levée partielle de dégénérescence des orbitales d sont hors-programme.

Les complexes constituent des systèmes très importants à la fois dans le domaine industriel où ils interviennent dans les procédés de séparation, de dépollution et en catalyse, ainsi que dans celui du vivant au travers des métalloenzymes intervenant dans des processus biologiques. L'étude de la stabilité des complexes prolonge la partie du programme de première année sur les transformations chimiques en solution aqueuse et permet un réinvestissement des capacités correspondantes : utilisation de données thermodynamiques, prévision de l'état final d'un système modélisé par une seule réaction, interprétation d'observations. Elle permet aussi la mise en œuvre de concepts de thermodynamique, d'oxydo-réduction et de chimie orbitale.

Pour l'étude de la stabilité des complexes en solution aqueuse, les équations des réactions correspondant aux formations et dissociations ne sont pas exigibles et sont fournies. Les transformations abordées sont modélisées par une seule réaction : les problématiques liées à des phénomènes de complexations successives sont donc hors-programme.

Les complexes peuvent être utilisés comme catalyseurs, par exemple pour des hydrogénations et des polymérisations. Aucun cycle catalytique n'est exigible, mais les étapes d'un cycle fourni doivent être reconnues par l'étudiant·e. Le formalisme de Green est hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Structure des complexes</b>	Reconnaitre le(s) site(s) de coordination d'un

<p>Modélisation de la liaison dans un complexe entre une entité du bloc <i>d</i> et un ligand <math>\sigma</math>-donneur intervenant par une seule orbitale.</p>	<p>ligand à partir d'un schéma de Lewis.</p> <p>Établir qualitativement le diagramme d'interaction entre une orbitale d'une entité du bloc <i>d</i> et une orbitale d'un ligand <math>\sigma</math>-donneur.</p> <p>Prévoir qualitativement l'influence de l'énergie de l'orbitale de l'entité du bloc <i>d</i> sur la stabilisation des électrons du ligand par la complexation.</p>
<p><b>Stabilité des complexes métalliques en solution aqueuse</b></p> <p>Constantes de formation et de dissociation.</p> <p>Diagramme de prédominance en fonction de <math>pL</math>.</p> <p>Effet chélate.</p>	<p>Extraire, de ressources disponibles, les données thermodynamiques pertinentes pour prévoir qualitativement l'état final d'un système siège d'une unique réaction de complexation ou pour interpréter des observations expérimentales.</p> <p>Utiliser les diagrammes de prédominance pour prévoir des espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.</p> <p>Retrouver les valeurs de constantes thermodynamiques d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance (et réciproquement).</p> <p>Interpréter, à l'aide du modèle orbitalaire, des différences de valeurs de constante de formation de différents complexes.</p> <p>Interpréter l'évolution du caractère oxydant ou réducteur d'une entité par complexation.</p> <p>Interpréter l'effet d'un ligand polydenté sur la constante de formation d'un complexe.</p> <p><b>Préparer, analyser, caractériser ou déterminer la constante de formation d'un complexe d'une entité du bloc d.</b></p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction de complexation pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse.</b></p>
<p><b>Activité catalytique des complexes ; cycles catalytiques</b></p> <p>Ligands <math>\pi</math>-donneurs et <math>\pi</math>-accepteurs.</p> <p>Coordination des systèmes <math>\pi</math> non délocalisés.</p>	<p>Reconnaître un ligand ayant des effets <math>\pi</math> à partir de la donnée de ses orbitales de valence.</p> <p>Identifier les interactions orbitales principales entre une entité du bloc <i>d</i> et un alcène, le monoxyde de carbone et le dihydrogène.</p> <p>Interpréter la modification de réactivité d'un alcène, du monoxyde de carbone et du dihydrogène par les phénomènes électroniques mis en jeu lors de leur coordination.</p>
<p>Cycles catalytiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- étapes d'association et de dissociation, d'addition oxydante et</li> </ul>	<p>Établir l'équation de la réaction catalysée à partir de la donnée d'un cycle catalytique.</p>

<p>d'élimination réductrice, d'insertion et d'élimination ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- catalyseurs et précurseurs de catalyseur.</li> </ul> <p>Hydrogénation en catalyse homogène.</p> <p>Polymérisation des alcènes par coordination.</p>	<p>Reconnaître la nature d'une étape dans un cycle catalytique.</p> <p>Proposer un ou des produits plausibles d'une étape d'un cycle dont les réactifs sont donnés.</p> <p>Identifier la nature des étapes intervenant lors de l'hydrogénation en catalyse homogène et de la polymérisation des alcènes par coordination, les cycles catalytiques étant fournis.</p> <p>Proposer une structure pour la macromolécule vinylique linéaire obtenue par polymérisation d'un alcène donné.</p> <p>Déterminer la structure de l'alcène permettant de synthétiser une macromolécule vinylique linéaire donnée.</p>
--	---

### 3. Transformations de la matière en chimie organique

Médicaments, produits phytosanitaires, matériaux polymères de synthèse aussi différents que les latex de peinture ou les boucliers thermiques des véhicules spatiaux : ces synthèses en chimie fine ou en productions de fort tonnage découlent d'une démarche d'ingénierie moléculaire s'appuyant entre autres sur les apports de la chimie organique. L'élaboration, l'identification et la caractérisation des structures et la prévision de la réactivité des entités relèvent de méthodes fondamentales dont les principes sont abordés dans les programmes de chimie des deux années.

Le programme de seconde année s'inscrit dans la continuité de celui de première année et poursuit les objectifs suivants :

- s'approprier la logique de la synthèse organique grâce aux compléments de formation relatifs aux conversions de groupes caractéristiques et à la création de liaison carbone-carbone ;
- consolider et compléter les connaissances des mécanismes fondamentaux et les capacités relatives à leur écriture à l'aide du formalisme des flèches courbes et des orbitales moléculaires.

L'enseignement de la chimie organique s'appuie sur les connaissances et capacités nouvellement acquises en thermodynamique et cinétique chimiques et exploite les modèles orbitales de description des structures et de la réactivité, introduits dans la partie « Constitution de la matière : modélisation quantique et réactivité ». L'utilisation des orbitales frontalières permet la prévision des géométries d'approche des réactifs et, dans le cas où l'évolution du système est sous contrôle frontalier, la prévision de la structure du produit majoritaire dans la transformation. Les orbitales moléculaires sont systématiquement fournies aux étudiant·es. Le tableau à la fin de ce préambule et précédant le paragraphe 3.1, comporte des notions et capacités exigibles transversales et communes à toutes les transformations abordées dans les parties 3.1 et 3.2.

L'approche retenue privilégie l'aspect mécanistique et la stratégie de synthèse et non une présentation monographique, ceci afin de favoriser le raisonnement et la transférabilité dans des situations analogues, mais l'enseignant·e dispose de sa liberté pédagogique pour construire la progression de son choix.

Le programme de seconde année poursuit la volonté du programme de première année d'amener les étudiant·es à conduire une véritable réflexion sur la stratégie de synthèse : identification des groupes caractéristiques mis en jeu, analyse de la réactivité comparée des entités, interprétation de la nature et de l'ordre des étapes mises en œuvre dans le cas d'une synthèse multi-étapes, analyse des choix expérimentaux.

L'élaboration d'une synthèse multi-étapes par les étudiant·es eux-mêmes peut se faire en autonomie à l'aide d'une banque de réactions fournie ou à l'aide des réactions qui figurent explicitement au

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Chimie PC

programme. Les réactions indiquées dans la colonne de gauche doivent être connues et seuls les mécanismes explicitement inscrits sont exigibles et doivent pouvoir être écrits sans information supplémentaire. Pour ce qui concerne les propriétés acido-basiques, une table de  $pK_a$  sera systématiquement fournie.

Le cours et les activités s'appuient sur des exemples issus aussi bien des domaines de la chimie fine, de la chimie du vivant et de la chimie industrielle et permettent une sensibilisation aux principes de la chimie éco-responsable. À travers les capacités et contenus exigibles, sont développées des compétences générales qui pourront par la suite être réinvesties, consolidées et valorisées, parmi lesquelles :

- choisir le ou les modèle(s) pertinent(s) de description géométrique, électronique ou orbitale d'une entité pour rendre compte de sa réactivité ;
- utiliser des modèles de prédiction de l'évolution du système dans le cadre des transformations proposées ;
- pratiquer un raisonnement par analogie (analyse de réactivités et écriture de mécanismes) ;
- proposer une stratégie de synthèse à l'aide d'une banque de réactions ou des réactions au programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Familles fonctionnelles en chimie organique.</p> <p>Aspects thermodynamiques et cinétiques des transformations de la matière en chimie organique.</p> <p>Sites électrophiles et nucléophiles des réactifs.</p> <p>Modélisation de la géométrie des approches des réactifs.</p>	<p>Identifier dans une entité donnée les familles fonctionnelles suivantes : alcène, alcyne, halogénoalcane, alcool, ester sulfonique, 1,2-diol, éther-oxyde, époxyde, hémiacétal, acétal, amine, aldéhyde, cétone, acide carboxylique, ester, amide, chlorure d'acyle, anhydride d'acide.</p> <p>Discuter des aspects thermodynamiques et cinétiques des transformations effectuées à l'aide de données tabulées et de résultats expérimentaux.</p> <p>Identifier les sites électrophiles et nucléophiles des réactifs à l'aide de leurs structures de Lewis ou de leurs orbitales frontalières.</p> <p>Prévoir ou justifier la géométrie privilégiée d'approche de réactifs à partir de leurs orbitales frontalières fournies.</p>
<p>Synthèses organiques au laboratoire.</p>	<p><b>Conduire des synthèses, des purifications, des caractérisations et des analyses de la pureté de produits à l'aide de protocoles donnés.</b></p> <p><b>Proposer ou adapter un protocole expérimental permettant de réaliser une synthèse organique à partir de données fournies.</b></p> <p><b>Analyser et justifier les choix expérimentaux dans une synthèse organique.</b></p>

## 3.1. Conversion de groupes caractéristiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Additions électrophiles sur les doubles liaisons carbone-carbone</b></p> <p>Hydratation en milieu acide : conditions expérimentales, régiosélectivité, réactivité comparée des alcènes, mécanisme limite.</p> <p>Hydroboration d'une double liaison carbone-carbone terminale par le borane : régiosélectivité, mécanisme limite de l'addition du borane sur l'alcène ; hydrolyse oxydante.</p>	<p>Prévoir ou justifier la régiosélectivité de l'hydratation à l'aide de la stabilité des carbocations intermédiaires.</p> <p>Prévoir ou justifier la régiosélectivité de l'hydroboration à l'aide des effets stériques.</p>
<p><b>Additions nucléophiles suivies du départ d'un nucléofuge</b></p> <p>De l'acide carboxylique aux amides et aux esters.</p> <p>Activation <i>ex situ</i> du groupe carboxyle sous forme d'un chlorure d'acyle ou d'un anhydride d'acide.</p> <p>Activation <i>in situ</i> du groupe carboxyle par protonation.</p> <p>Autres activations du groupe carboxyle : utilisation d'une banque de réactions.</p> <p>Synthèse des esters à partir des acides carboxyliques, des chlorures d'acyle et des anhydrides d'acide : aspects cinétiques et thermodynamiques, mécanismes limites.</p> <p>Synthèse des amides à partir des acides carboxyliques, des chlorures d'acyle et des anhydrides d'acide : aspects cinétiques et thermodynamiques, mécanismes limites.</p>	<p>Comparer les réactivités électrophiles des acides carboxyliques, chlorures d'acyle, anhydrides d'acide, esters, amides, les aptitudes nucléofuges des groupes partants dans les molécules correspondantes et en déduire l'importance de l'activation du groupe carboxyle.</p> <p>Proposer et/ou analyser, le cas échéant à partir d'une banque de réactions fournie, différents moyens d'activation d'un groupe carboxyle.</p> <p>Expliquer comment obtenir un bon rendement de synthèse d'un ester à partir d'un alcool primaire ou secondaire et d'un acide carboxylique, selon la méthode d'activation choisie et les conditions expérimentales.</p> <p>Justifier le choix des conditions expérimentales retenues pour la synthèse des amides.</p>
<p>Des amides ou esters à l'acide carboxylique.</p> <p>Hydrolyses en milieu acide et en milieu basique des esters et des amides : conditions expérimentales, mécanismes.</p>	<p>Justifier le choix des conditions opératoires d'hydrolyse.</p>
<p>Utilisation de la synthèse d'amides ou d'esters pour la protection des groupes carboxyle, amino ou hydroxyle.</p>	<p>Reconnaître ou justifier la nécessité de protéger un groupe carboxyle, amino ou hydroxyle dans le cadre d'une stratégie de synthèse.</p> <p>Proposer ou justifier des conditions de protection ou de déprotection d'un groupe carboxyle, amino ou hydroxyle à partir d'une banque de réactions fournie.</p>

Notions et contenus	Capacités exigibles
Synthèse de polyesters et de polyamides à partir de diacides carboxyliques.	<p>Proposer des réactifs permettant de synthétiser un polyester ou un polyamide donné.</p> <p>Représenter le polyester ou le polyamide obtenu par polymérisation de monomères donnés.</p> <p>Justifier les choix expérimentaux effectués dans un protocole donné de synthèse de polyester ou de polyamide.</p>
Structure primaire des peptides et protéines : acides $\alpha$ -aminés, liaison peptidique.	<p>Identifier un peptide ou une protéine comme un enchaînement d'unités issues d'acides <math>\alpha</math>-aminés (aucune structure ou nomenclature d'acides <math>\alpha</math>-aminés n'est exigible).</p> <p>Identifier les chaînes latérales dans des acides <math>\alpha</math>-aminés, des peptides ou des protéines fournis.</p>
<b>Conversion de groupes caractéristiques par des réactions d'oxydo-réduction</b>	
Hydrogénation des doubles et triples liaisons carbone-carbone en catalyse hétérogène, aspects stéréochimiques.	Identifier les différents types d'interactions entre le catalyseur hétérogène et les réactifs.
Époxydation directe par un peroxyacide ; réactivité comparée des alcènes.  Ouverture des époxydes en milieu basique : mécanisme, élaboration de diols par addition anti.	<p>Discuter de la régiosélectivité de l'époxydation sur un polyène.</p> <p>Justifier la régiosélectivité et la stéréosélectivité de l'ouverture d'un époxyde par un nucléophile, en l'absence d'activation par un acide de Lewis ou de Bronsted.</p>
De l'ester à l'aldéhyde ou à l'alcool primaire ; mécanisme schématisé de la réduction des esters.	<p>Interpréter la réduction d'un ester en alcool primaire en assimilant le réactif à un ion hydrure nucléophile.</p> <p>Identifier le produit de réduction d'un ester par un hydrure complexe, à l'aide de données fournies (chimiques et/ou spectroscopiques).</p> <p>Reconnaître ou proposer dans une stratégie de synthèse la conversion entre un ester et un aldéhyde ou un alcool primaire.</p>

## 3.2. Création de liaisons carbone-carbone

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Réaction de Diels-Alder</b></p> <p>Diastéréosélectivité, stéréospecificité, régiosélectivité, influence de la structure des réactifs sur la vitesse de la transformation (règle d'Alder).</p> <p>Réaction de rétro-Diels-Alder.</p>	<p>Identifier les interactions orbitales mises en jeu entre les réactifs.</p> <p>Interpréter les résultats cinétiques, stéréochimiques et la régiosélectivité d'une réaction de Diels-Alder sous contrôle cinétique.</p>
<p><b>Réactivité nucléophile des énolates</b></p> <p>Équilibre de tautomérie céto-énolique.</p> <p>Acidité d'un aldéhyde ou d'une cétone.</p> <p>Généralisation à d'autres espèces énolisables.</p>	<p>Représenter le(s) énol(s) isomère(s) d'une espèce énolisable.</p> <p>Identifier un énol et représenter l'aldéhyde ou la cétone dont il est l'isomère.</p> <p>Représenter la base conjuguée d'une espèce énolisable et justifier sa stabilité à l'aide du formalisme de la mésomérie.</p> <p>Proposer ou justifier le choix d'une base permettant de déprotoner une espèce énolisable, les valeurs des <math>pK_a</math> étant fournies.</p>
<p>C-alkylation en position <math>\alpha</math> d'un groupe carbonyle de cétone : mécanisme limite, régiosélectivité de l'alkylation des énolates.</p>	<p>Justifier la réactivité nucléophile ambidente de l'énolate dans le formalisme de la mésomérie ou par l'analyse de ses orbitales frontalières.</p> <p>Décrire les interactions entre orbitales frontalières des réactifs et interpréter la régiosélectivité de l'alkylation de l'énolate.</p>
<p>Aldolisation non dirigée : mécanisme en milieu basique aqueux ou alcoolique.</p> <p>Aldolisation croisée dirigée avec déprotonation totale préalable : mécanisme, intérêt synthétique.</p>	<p>Identifier dans une analyse rétrosynthétique les réactifs permettant d'obtenir un aldol, un céto, un <math>\alpha</math>-énal, une <math>\alpha</math>-énone.</p> <p>Choisir dans le cadre d'une stratégie de synthèse les meilleures conditions expérimentales de préparation d'un aldol (d'un céto) issu d'une aldolisation croisée.</p> <p>Justifier par la compétition avec l'aldolisation l'impossibilité d'alkyler un aldéhyde.</p>
<p>Crotonisation : déshydratation de l'aldol (céto) en présence d'une base, mécanisme E1<sub>cb</sub>, régiosélectivité.</p>	<p>Justifier la régiosélectivité de la crotonisation en présence d'une base.</p>
<p>Réaction de Michael sur une <math>\alpha</math>-énone ; mécanisme.</p>	<p>Décrire les interactions entre orbitales frontalières des réactifs et interpréter la régiosélectivité de la réaction de Michael.</p> <p>Identifier dans une analyse rétrosynthétique les réactifs permettant de réaliser une addition de Michael sur une <math>\alpha</math>-énone.</p>
<p><b>Utilisation des organomagnésiens en synthèse</b></p>	



Notions et contenus	Capacités exigibles
Synthèse des alcools par action des organomagnésiens sur les époxydes et les esters, mécanismes.	Identifier dans une analyse rétrosynthétique les réactifs de la synthèse magnésienne d'un alcool.

### Annexe 1 : liste de matériel

Cette liste regroupe le matériel que les étudiant·es doivent savoir utiliser avec, le cas échéant, l'aide d'une notice simplifiée fournie sous forme de version papier ou numérique. Une utilisation de matériel hors de cette liste lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une introduction guidée suffisamment détaillée.

- Verrerie classique de chimie analytique : burettes, pipettes jaugées et graduées, fioles jaugées, erlenmeyers, béchers, etc.
- Matériel classique de chimie organique, rodée ou non rodée : ballons, ampoule de coulée (isobare ou non), réfrigérant, dispositifs de chauffage ou de refroidissement (bain-marie, bain froid, chauffe-ballon, agitateur magnétique chauffant, etc.), dispositifs d'agitation, colonne à distiller, ampoule à décanter, matériel de filtration sous pression atmosphérique et sous pression réduite, appareil de Dean-Stark.
- Évaporateur rotatif
- Matériel de chromatographie sur couche mince
- Lampe UV
- Banc de Kofler
- Réfractomètre
- Spectrophotomètre UV-visible
- pH-mètre et électrodes de mesure
- Voltmètre et électrodes
- Ampèremètre
- Conductimètre et cellule de mesure
- Polarimètre
- Thermomètre
- Balance de précision

### Annexe 2 : outils mathématiques

L'utilisation d'outils mathématiques est indispensable en chimie. La capacité à mettre en œuvre de manière autonome certains de ces outils mathématiques dans le cadre des activités relevant de la chimie fait partie des compétences exigibles. Le tableau ci-dessous explicite ces outils ainsi que le niveau de maîtrise attendu, mais tous ces outils n'ont pas vocation à être mis en œuvre en chimie. Cependant les situations dont la gestion manuelle ne relèverait que de la technicité seront traitées à l'aide d'outils numériques (calculatrices, logiciels de calcul numérique ou formel).

Outils mathématiques	Capacités exigibles
<b>1. Équations algébriques</b>	
Système linéaire de n équations à p inconnues.	Identifier les variables (inconnues) nécessaires à la modélisation du problème sous forme d'un système d'équations linéaires. Donner l'expression formelle des solutions dans le seul cas $n = p = 2$ . Utiliser des outils numériques ou de calcul formel dans les autres cas.
Équation non linéaire.	Représenter graphiquement une équation de la forme $f(x) = g(x)$ .

- <b>Risque électrique</b>	Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
- <b>Risque optique</b>	Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.
- <b>Risques liés à la pression et à la température</b>	Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.
<b>2. Prévention de l'impact environnemental</b> Traitement et rejet des espèces chimiques.	Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

## Contenus thématiques

Les contenus de la formation sont organisés autour de huit thèmes.

### 1. Électronique

- 1.1. Stabilité des systèmes linéaires
- 1.2. Rétroaction
- 1.3. Oscillateurs
- 1.4. Électronique numérique
- 1.5. Modulation-démodulation

### 2. Phénomènes de transport

- 2.1. Transport de charge
- 2.2. Transfert thermique par conduction
- 2.3. Diffusion de particules
- 2.4. Fluides en écoulement

### 3. Bilans macroscopiques

- 3.1. Définition d'un système fermé pour les bilans macroscopiques
- 3.2. Bilans d'énergie
- 3.3. Bilans de quantité de mouvement et de moment cinétique

### 4. Électromagnétisme

- 4.1. Symétries des champs électrique et magnétique
- 4.2. Champ électrique en régime stationnaire
- 4.3. Condensateur
- 4.4. Champ magnétique en régime stationnaire
- 4.5. Électromagnétisme dans l'ARQS
- 4.6. Milieux ferromagnétiques

## 5. Conversion de puissance

- 5.1. Puissance électrique en régime sinusoïdal
- 5.2. Transformateur
- 5.3. Conversion électro-magnéto-mécanique
- 5.4. Conversion électronique statique

## 6. Physique des ondes

- 6.1. Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de d'Alembert
- 6.2. Phénomènes de propagation linéaires : absorption et dispersion
- 6.3. Interfaces entre deux milieux

## 7. Transformations chimiques de la matière : aspects thermodynamiques et cinétiques

- 7.1. Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques
- 7.2. Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques
- 7.3. Procédés industriels continus : aspects cinétiques et thermodynamiques

## 8. Aspects thermodynamiques et cinétiques de l'électrochimie

- 8.1. Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction
- 8.2. Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction : courbe courant-potentiel
- 8.3. Stockage et conversion d'énergie dans des dispositifs électrochimiques.
- 8.4. Corrosion humide et électrochimique

# 1. Électronique

Cette partie renforce et complète l'étude des circuits électriques linéaires conduite dans le thème « **Ondes et signaux** » du programme de première année de la classe de PCSI. Ainsi, les notions de filtrage et d'analyse spectrale sont réinvesties, en particulier dans les activités expérimentales. Le programme de deuxième année ajoute la rétroaction et le bouclage des systèmes linéaires dans le but d'aborder la stabilité, les oscillateurs et la réalisation de filtres actifs à forte impédance d'entrée pour une association en cascade.

Ces différentes thématiques sont illustrées à l'aide de l'amplificateur linéaire intégré ALI (également appelé amplificateur opérationnel) dont l'étude n'est pas une fin en soi mais un outil permettant des réalisations expérimentales variées.

Par ailleurs, des exemples de manifestations des non linéarités sont abordés à l'occasion de la saturation d'un amplificateur ou de la réalisation d'une fonction mémoire (comparateur à hystérésis).

Afin de compléter l'approche analogique des circuits électriques, un module à vocation expérimentale est consacré au traitement numérique des signaux à travers les sujets suivants :

- l'échantillonnage et le repliement de spectre ;
- le filtrage numérique ;
- les conversions analogique/numérique et numérique/analogique.

Enfin, la problématique de la transmission d'un signal temporel codant une information est abordée dans l'étude et la réalisation d'une modulation, en relation avec la partie du programme consacrée à la propagation des ondes électromagnétiques.

La partie « **Stabilité des systèmes linéaires** » s'intéresse aux propriétés des systèmes linéaires déjà abordés en première année. Les capacités relatives au filtrage et à la décomposition harmonique d'un signal périodique sont révisées sans ajout de nouvelles capacités. Dans le but de faciliter le lien avec le cours de sciences industrielles pour l'ingénieur, la notation symbolique de la fonction de transfert  $H(p)$  est utilisée sans faire référence à la transformée de Laplace. L'étude est complétée par une analyse de

la stabilité des systèmes du premier et du second ordre en examinant le régime transitoire associé à l'équation différentielle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Stabilité des systèmes linéaires</b>	
Fonction de transfert d'un système entrée-sortie linéaire continu et invariant.	Transposer la fonction de transfert opérationnelle dans les domaines fréquentiel (fonction de transfert harmonique) ou temporel (équation différentielle).
Stabilité.	Étudier la stabilité d'un système d'ordre 1 ou 2 à partir des signes des coefficients de l'équation différentielle ou de la fonction de transfert.

La partie « **Rétroaction** » illustre quelques propriétés sur l'exemple de l'amplificateur linéaire intégré. L'étude des circuits est strictement limitée à des situations pouvant être facilement abordées avec les outils introduits en première année (loi des mailles, loi des nœuds, diviseur de tension). La vitesse limite de balayage de l'ALI est évoquée en travaux pratiques afin d'identifier les distorsions harmoniques traduisant un comportement non linéaire. Les limitations associées aux courants de polarisation et la tension de décalage ne sont pas étudiées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Rétroaction</b>	
Modèle de l'ALI défini par une résistance d'entrée infinie, une résistance de sortie nulle, une fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire, une saturation de la tension de sortie. Limites du modèle : vitesse limite de balayage, saturation de l'intensité du courant de sortie.	Citer les hypothèses du modèle et les ordres de grandeur du gain différentiel statique et du temps de réponse. <b>Détecter, dans un montage à ALI, les manifestations de la vitesse limite de balayage et de la saturation de l'intensité du courant de sortie.</b>
Montages amplificateur non inverseur et comparateur à hystérésis.	Analyser la stabilité du régime linéaire. Établir la conservation du produit gain-bande passante du montage non inverseur.
ALI idéal de gain infini en régime linéaire.	Identifier la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse comme un indice de probable stabilité du régime linéaire. Établir la relation entrée-sortie des montages non inverseur, suiveur, inverseur et intégrateur. Déterminer les impédances d'entrée de ces montages. Expliquer l'intérêt, pour garantir leur fonctionnement lors de mises en cascade, de réaliser des filtres de tension de forte impédance d'entrée et de faible impédance de sortie.

ALI idéal de gain infini en régime saturé.	<p>Identifier l'absence de rétroaction ou la présence d'une unique rétroaction sur la borne non inverseuse comme l'indice d'un probable comportement en saturation.</p> <p>Établir la relation entrée-sortie d'un comparateur simple.</p> <p>Associer, pour un signal d'entrée sinusoïdal, le caractère non-linéaire du système et la génération d'harmoniques en sortie.</p> <p>Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis.</p> <p>Décrire le phénomène d'hystérésis en relation avec la notion de fonction mémoire.</p>
--	---

La partie « **Oscillateurs** » s'intéresse à une étude non exhaustive des oscillateurs en électronique. Les exemples sont choisis à l'initiative du professeur et les calculs des fonctions de transfert des filtres ne constituent pas un objectif de formation. En travaux pratiques, on complète l'étude par une analyse spectrale des signaux.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3. Oscillateurs</b>	
Oscillateur quasi-sinusoïdal réalisé en bouclant un filtre passe-bande du deuxième ordre avec un amplificateur.	<p>Exprimer les conditions théoriques (gain et fréquence) d'auto-oscillation sinusoïdale d'un système linéaire bouclé.</p> <p>Analyser sur l'équation différentielle l'inégalité que doit vérifier le gain de l'amplificateur afin d'assurer le démarrage des oscillations.</p> <p>Interpréter le rôle des non-linéarités dans la stabilisation de l'amplitude des oscillations.</p> <p><b>Mettre en œuvre un oscillateur quasi-sinusoïdal et analyser les spectres des signaux générés.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler l'évolution temporelle d'un signal généré par un oscillateur.</p>
Oscillateur de relaxation associant un intégrateur et un comparateur à hystérésis. Générateur de signaux non sinusoïdaux.	<p>Décrire les différentes séquences de fonctionnement.</p> <p>Exprimer les conditions de basculement.</p> <p>Déterminer l'expression de la période d'oscillation.</p> <p><b>Mettre en œuvre un oscillateur de relaxation et analyser les spectres des signaux générés.</b></p>

La partie « **Électronique numérique** » est étudiée de manière expérimentale et aborde la question du traitement numérique du signal dans le prolongement du programme de première année. Le phénomène de repliement de spectre est expliqué qualitativement à l'aide par exemple d'une analogie stroboscopique, l'objectif étant de mettre en place la condition de Nyquist-Shannon et de réaliser convenablement une acquisition numérique en vue d'une analyse spectrale.

Afin de mettre en évidence d'autres effets associés à l'échantillonnage, on réalise de manière comparative un filtre analogique passe-bas et un filtre numérique remplissant la même fonction. Ce dernier est réalisé à l'aide d'une chaîne de traitement : CAN, algorithme numérique, CNA. On étudie expérimentalement l'influence de la fréquence d'échantillonnage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Électronique numérique</b>	
Échantillonnage.	<b>Expliquer l'influence de la fréquence d'échantillonnage.</b>
Condition de Nyquist-Shannon.	Utiliser la condition de Nyquist-Shannon.  <b>Mettre en évidence le phénomène de repliement de spectre au moyen d'un oscilloscope numérique ou d'un logiciel de calcul numérique.</b>
Analyse spectrale numérique.	Choisir les paramètres (durée, nombre d'échantillons, fréquence d'échantillonnage) d'une acquisition numérique afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon.  <u>Capacité numérique</u> : calculer, à l'aide d'un langage de programmation, la transformée de Fourier discrète d'un signal numérique.
Filtrage numérique.	<b>Mettre en œuvre une chaîne d'acquisition et de conversion.</b>  <u>Capacité numérique</u> : réaliser, à l'aide d'un langage de programmation, un filtrage numérique d'un signal issu d'une acquisition, et mettre en évidence la limitation introduite par l'échantillonnage.

La partie « **Modulation-démodulation** » est l'occasion de faire le lien entre la propagation des ondes électromagnétiques et le traitement du signal afin d'expliquer la problématique de la transmission d'une information. Cette étude est illustrée en travaux pratiques à l'aide d'un multiplieur analogique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.5. Modulation-démodulation</b>	
Transmission d'un signal codant une information variant dans le temps.	Définir un signal modulé en amplitude, en fréquence, en phase. Citer les ordres de grandeur des fréquences utilisées pour les signaux radio AM, FM, la téléphonie mobile.
Modulation d'amplitude.	Interpréter le signal modulé comme le produit d'une porteuse par une modulante. Décrire le spectre d'un signal modulé.

Démodulation d'amplitude.	À partir de l'analyse fréquentielle, justifier la nécessité d'utiliser une opération non linéaire. Expliquer le principe de la démodulation synchrone.  <b>Réaliser une modulation d'amplitude et une démodulation synchrone avec un multiplieur analogique.</b>
---------------------------	--

## 2. Phénomènes de transport

Cette partie présente le formalisme nécessaire à l'étude générale des phénomènes de transport abordés au programme de la classe de PSI (conduction électrique, conduction thermique, diffusion de particules, fluides en écoulement). Ce formalisme, commun à différents domaines de la physique, repose essentiellement sur la notion de bilan, global ou local. Il permet d'exprimer des lois de conservation (charge, énergie, masse) et d'établir des équations d'évolution en relation avec des propriétés phénoménologiques.

Le professeur peut aborder les différentes notions dans l'ordre qu'il souhaite, en relation avec les autres parties du programme. Il est cependant essentiel de faire apparaître les analogies et les différences entre les différents domaines d'étude.

Dans la partie « **Transport de charge** », le transport de charge et les milieux conducteurs sont étudiés en présentant un modèle microscopique. Pour sensibiliser les étudiants à l'aspect complexe de la matière, le professeur est invité à conduire une critique du modèle historique de Drude en comparant le libre parcours moyen d'un électron libre avec la distance interatomique du réseau. La conductivité électrique est réutilisée lors de l'étude des ondes électromagnétiques dans les conducteurs (effet de peau et réflexion sur un métal).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1. Transport de charge</b>	
<b>2.1.1. Conservation de la charge</b>	
Densité volumique de charge électrique $\rho$ , vecteur densité de courant électrique $\mathbf{j}$ .	Passer d'une description microscopique (porteurs de charges, vitesse des porteurs) aux grandeurs mésoscopiques $\rho$ et $\mathbf{j}$ .
Intensité du courant électrique.	Écrire l'intensité comme le flux du vecteur densité de courant électrique à travers une surface orientée.
Bilan de charge. Équation locale de la conservation de la charge.	Établir, en coordonnées cartésiennes, l'équation locale traduisant la conservation de la charge électrique. Énoncer l'équation locale et en interpréter chacun des termes.
Régime stationnaire.	Définir une ligne de courant et un tube de courant. Exploiter le caractère conservatif du vecteur densité de courant électrique en régime stationnaire et relier cette propriété à la loi des nœuds usuelle de l'électrocinétique.
<b>2.1.2. Conducteur ohmique</b>	

Loi d'Ohm locale.	Relier le vecteur densité de courant au champ électrique dans un conducteur ohmique. Citer des ordres de grandeur de la conductivité.
Modèle de Drude.	Établir, en régime stationnaire, une expression de la conductivité électrique à l'aide d'un modèle microscopique.
Résistance d'un conducteur cylindrique.	Établir l'expression de la résistance d'un câble cylindrique parcouru uniformément par un courant parallèle à son axe.
Puissance électrique. Effet Joule.	Établir l'expression de la puissance volumique reçue par un conducteur ohmique. Interpréter l'effet Joule.

La partie « **Transfert thermique par conduction** » est consacrée à la conduction thermique en relation avec le cours de thermodynamique de première année. Après avoir écrit les premier et deuxième principes sous forme infinitésimale, on s'attache à l'étude de la diffusion thermique avec une visée applicative et résolument concrète.

L'établissement de l'équation de diffusion thermique est limité au cas des systèmes de volume constant et les mises en équation locale sont faites exclusivement en géométries unidimensionnelles. On admet ensuite les formes générales des équations en utilisant les opérateurs d'analyse vectorielle. Cette partie contribue aussi à asseoir la maîtrise des opérateurs d'analyse vectorielle (gradient, divergence, laplacien), sans dérive calculatoire.

L'étude de l'équation de diffusion thermique sans terme source, en régime stationnaire ou dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS), est menée par analogie avec l'électrocinétique. La notion de résistance thermique, dont la connaissance des conditions d'application est aussi importante que son utilisation, doit être illustrée par des exemples pratiques.

Aucune connaissance sur les termes sources n'est exigible sauf pour l'effet Joule. On néglige le rayonnement thermique. Dans le cadre de l'interface solide-fluide, la loi de Newton peut être utilisée, mais ni sa mémorisation, ni aucune connaissance sur son établissement ne peuvent être exigées.

Aucune méthode générale de résolution ne peut être demandée aux étudiants, mais les solutions de l'équation de diffusion en géométrie unidimensionnelle cartésienne, sans terme source, en régime stationnaire ou en régime d'ondes harmoniques doivent être connues.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Transfert thermique par conduction</b>	
<b>2.2.1. Formulation infinitésimale des principes de la thermodynamique</b>	
Premier principe. Deuxième principe : $dS = \delta S_e + \delta S_c$ avec $\delta S_e = \delta Q/T_0$ pour une évolution monotherme.	Énoncer et exploiter les principes de la thermodynamique pour une transformation élémentaire. Utiliser avec rigueur les notations $d$ et $\delta$ en leur attachant une signification.
<b>2.2.2. Équation de la diffusion thermique</b>	
Les différents modes de transfert thermique : diffusion, convection et rayonnement.	Décrire les trois modes de transfert thermique.
Flux thermique. Vecteur densité de courant thermique $\mathbf{j}_Q$ .	Exprimer le flux thermique comme le flux du vecteur $\mathbf{j}_Q$ à travers une surface orientée.



Équilibre thermodynamique local.	Énoncer l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local. Utiliser les champs scalaires intensifs (volumiques ou massiques) associés à des grandeurs extensives de la thermodynamique.
Loi de Fourier.	Énoncer et utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, béton, acier.
Bilan d'énergie.	Établir, pour un milieu évoluant à volume constant, l'équation locale traduisant le premier principe dans le cas d'un problème ne dépendant que d'une seule coordonnée d'espace en coordonnées cartésiennes, cylindriques ou sphériques. Utiliser une généralisation admise en géométrie quelconque à l'aide de l'opérateur divergence et son expression fournie.
Équation de la diffusion thermique.	Établir l'équation de diffusion thermique avec ou sans terme source. Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle. Relier l'équation de diffusion à l'irréversibilité temporelle du phénomène.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion thermique à une dimension par une méthode des différences finies dérivée de la méthode d'Euler explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.
Conditions aux limites.	Exploiter la continuité du flux thermique. Exploiter la continuité de la température pour un contact thermique parfait. Utiliser la relation de Newton (fournie) à l'interface solide-fluide.
<b>2.2.3. Régime stationnaire, ARQS</b>	
Résistance ou conductance thermique.	Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique et énoncer les conditions d'application de l'analogie. Établir l'expression de la résistance thermique d'un cylindre calorifugé latéralement. Exploiter des associations de résistances thermiques en série ou en parallèle.

ARQS, analogie électrocinétique avec un circuit RC.	Mettre en évidence un temps caractéristique d'évolution de la température. Justifier l'ARQS. Établir l'analogie avec un circuit électrique RC.
<b>2.2.4. Ondes thermiques</b>	
Relation de dispersion.	Établir la relation de dispersion des ondes thermiques en géométrie unidirectionnelle.
Effet de peau thermique.	Mettre en évidence le déphasage lié à la propagation. Établir une distance caractéristique d'atténuation.

La partie « **Diffusion de particules** » est traitée par analogie avec les autres phénomènes de transport évoqués (transport de charge, conduction thermique). On peut également utiliser la loi de Fick pour interpréter les paliers de diffusion en électrochimie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.3. Diffusion de particules</b>	
Les différents modes de transfert de particules : diffusion et convection.	Citer les deux modes de transfert de particules.
Vecteur densité de courant de particules $\mathbf{j}_N$ .	Exprimer le débit de particules comme le flux du vecteur $\mathbf{j}_N$ à travers une surface orientée.
Loi de Fick.	Énoncer et utiliser la loi de Fick.
Bilan de particules.	Établir l'équation locale de bilan de particules avec ou sans terme source.
Équation de diffusion.	Établir l'équation de diffusion. Relier l'équation de diffusion à l'irréversibilité temporelle du phénomène.

L'objectif de la partie « **Fluides en écoulement** » est d'introduire les grandeurs pertinentes caractérisant un écoulement, en cohérence avec les autres phénomènes de transport. L'expression de l'accélération comme la dérivée particulaire de la vitesse est abordée mais les équations d'Euler ou de Navier-Stokes ne sont pas au programme.

La notion de viscosité est introduite sur un exemple d'écoulement de cisaillement simple. Le nombre de Reynolds est présenté comme le rapport de deux temps caractéristiques construits par analyse dimensionnelle. Il est exploité afin d'évoquer les propriétés de similitude entre des systèmes réalisés à des échelles différentes et caractérisés par les mêmes nombres sans dimension.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.4. Fluides en écoulement</b>	
<b>2.4.1. Débits et lois de conservation</b>	
Particule de fluide.	Définir la particule de fluide comme un système mésoscopique de masse constante.
Champ eulérien des vitesses.	Distinguer vitesse microscopique et vitesse mésoscopique. Définir une ligne de courant, un tube de courant.

Dérivée particulière du vecteur vitesse : terme local ; terme convectif.	Associer la dérivée particulière du vecteur vitesse à l'accélération de la particule de fluide qui passe en un point. Citer et utiliser l'expression de l'accélération avec le terme convectif sous la forme $(\mathbf{v} \cdot \text{grad}) \mathbf{v}$ .
Masse volumique $\mu$ .	Citer des ordres de grandeur des masses volumiques de l'eau et de l'air dans les conditions usuelles.
Débit massique.	Définir le débit massique et l'écrire comme le flux du vecteur $\mu \mathbf{v}$ à travers une surface orientée.
Conservation de la masse.	Énoncer l'équation locale traduisant la conservation de la masse.
Écoulement stationnaire.	Exploiter la conservation du débit massique le long d'un tube de courant.
Débit volumique.	Définir le débit volumique et l'écrire comme le flux de $\mathbf{v}$ à travers une surface orientée.
Écoulement incompressible et homogène.	Définir un écoulement incompressible et homogène par un champ de masse volumique constant et uniforme et relier cette propriété à la conservation du volume pour un système fermé. Exploiter la conservation du débit volumique le long d'un tube de courant indéformable.
<b>2.4.2. Actions de contact sur un fluide</b>	
Pression.	Identifier la force de pression comme étant une action normale à la surface. Utiliser l'équivalent volumique des actions de pression - $\text{grad } P$ .
Éléments de statique des fluides.	Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans les cas d'un fluide incompressible et de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait.
Viscosité dynamique.	Relier l'expression de la force surfacique de viscosité au profil de vitesse dans le cas d'un écoulement parallèle. Citer l'ordre de grandeur de la viscosité de l'eau. Exploiter la condition d'adhérence à l'interface fluide-solide.
<b>2.4.3. Écoulement interne incompressible et homogène dans une conduite cylindrique</b>	
Écoulements laminaire, turbulent. Vitesse débitante.	Décrire les différents régimes d'écoulement (laminaire et turbulent). Relier le débit volumique à la vitesse débitante.

Nombre de Reynolds.	Décrire qualitativement les deux modes de transfert de quantité de mouvement : convection et diffusion. Interpréter le nombre de Reynolds comme le rapport d'un temps caractéristique de diffusion de quantité de mouvement sur un temps caractéristique de convection. Évaluer le nombre de Reynolds et l'utiliser pour caractériser le régime d'écoulement.
Chute de pression dans une conduite horizontale. Résistance hydraulique.	Dans le cas d'un écoulement à bas nombre de Reynolds, établir la loi de Hagen-Poiseuille et en déduire la résistance hydraulique. Exploiter le graphe de la chute de pression en fonction du nombre de Reynolds, pour un régime d'écoulement quelconque. Exploiter un paramétrage adimensionné permettant de transposer des résultats expérimentaux ou numériques sur des systèmes similaires réalisés à des échelles différentes.
<b>2.4.4. Écoulement externe incompressible et homogène autour d'un obstacle</b>	
Force de traînée subie par une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme. Coefficient de traînée $C_x$ ; graphe de $C_x$ en fonction du nombre de Reynolds.	Associer une gamme de nombre de Reynolds à un modèle de traînée linéaire ou un modèle quadratique.
Notion de couche limite.	Pour les écoulements à grand nombre de Reynolds décrire qualitativement la notion de couche limite.
Forces de traînée et de portance d'une aile d'avion à haut Reynolds.	Définir et orienter les forces de portance et de traînée. Exploiter les graphes de $C_x$ et $C_z$ en fonction de l'angle d'incidence.

### 3. Bilans macroscopiques

Cette partie prolonge l'étude des machines thermiques réalisée en première année. Elle a pour objectif d'effectuer des bilans de grandeurs extensives thermodynamiques et mécaniques. Ces bilans sont illustrés sur des situations d'intérêt industriel (réacteur, éolienne, turbine, machines thermiques...). On définit également le modèle de l'écoulement parfait qui permet d'introduire la relation de Bernoulli. Si un bilan mécanique nécessite un changement de référentiel, on peut utiliser la loi de composition des vitesses fournie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Définition d'un système fermé pour les bilans macroscopiques</b>	
Système ouvert, système fermé.	Définir un système fermé approprié pour réaliser un bilan de grandeur extensive.
<b>3.2. Bilans d'énergie</b>	

Bilans thermodynamiques.	Exprimer les principes de la thermodynamique pour un écoulement stationnaire sous la forme : $\Delta h + \Delta e_c + \Delta(gz) = w_u + q$ ; $\Delta s = s_e + s_c$ Étudier des propriétés des machines thermodynamiques réelles à l'aide de diagrammes (P,h).
Modèle de l'écoulement parfait : adiabatique, réversible, non visqueux.	Utiliser le modèle de l'écoulement parfait pour un écoulement à haut Reynolds en dehors de la couche limite.
Relation de Bernoulli.	Citer et appliquer la relation de Bernoulli à un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et homogène.
Effet Venturi.	Décrire l'effet Venturi.
Bilan macroscopique d'énergie mécanique.	Effectuer un bilan d'énergie sur une installation industrielle. Utiliser le fait admis que la puissance des actions intérieures est nulle pour un écoulement parfait et incompressible.
<b>3.3. Bilans de quantité de mouvement et de moment cinétique</b>	
Loi de la quantité de mouvement pour un système fermé.	Effectuer l'inventaire des forces extérieures. Effectuer un bilan de quantité de mouvement.
Loi du moment cinétique pour un système fermé.	Effectuer un bilan de moment cinétique.

## 4. Électromagnétisme

En première année, les champs électrique et magnétique ont été présentés *via* les effets de la force de Lorentz et une étude du champ magnétique a été effectuée pour introduire les phénomènes d'induction. Le cours de deuxième année aborde les équations locales. Les équations de Maxwell sont présentées comme des postulats de l'électromagnétisme, le but étant de rendre les étudiants rapidement opérationnels dans leur utilisation. L'étude de la conversion de puissance et celle des ondes électromagnétiques en sont une exploitation.

Les équations de Maxwell peuvent être formulées dès le début sous leur forme la plus générale, ou bien elles peuvent être introduites de manière progressive en commençant par une forme simplifiée en régime stationnaire.

La partie « **Symétries des champs électrique et magnétique** » présente les relations de symétrie entre les champs électrique et magnétique et les sources, sans recourir à des expressions reliant les champs aux sources, mais en s'appuyant sur des exemples de cartes de champs.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1. Symétries des champs électrique et magnétique</b>	
Symétries pour le champ électrique, caractère polaire du champ électrique. Symétries pour le champ magnétique, caractère axial du champ magnétique.	Exploiter les symétries et invariances d'une distribution de charges et de courants pour en déduire des propriétés des champs électrique et magnétique.

La partie « **Champ électrique en régime stationnaire** » introduit les équations de Maxwell-Gauss et Maxwell-Faraday, prises comme des postulats de l'électromagnétisme. Les seuls calculs de champs électriques exigibles doivent pouvoir être faits par application du théorème de Gauss.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2. Champ électrique en régime stationnaire</b>	
Équations de Maxwell-Gauss et de Maxwell-Faraday.	Citer les équations de Maxwell-Gauss et Maxwell-Faraday en régime variable et en régime stationnaire.
Potentiel scalaire électrique.	Relier l'existence du potentiel scalaire électrique au caractère irrotationnel du champ électrique. Exprimer une différence de potentiel comme une circulation du champ électrique.
Propriétés topographiques.	Associer l'évasement des tubes de champ à l'évolution de la norme du champ électrique en dehors des sources. Représenter les lignes de champ connaissant les surfaces équipotentielles et inversement. Évaluer la valeur d'un champ électrique à partir d'un réseau de surfaces équipotentielles.
Équation de Poisson.	Établir l'équation de Poisson reliant le potentiel à la densité volumique de charge.
Théorème de Gauss.	Énoncer et appliquer le théorème de Gauss. Établir le champ électrique et le potentiel créés par une charge ponctuelle, une distribution de charge à symétrie sphérique, une distribution de charge à symétrie cylindrique. Exploiter le théorème de superposition.
Distribution surfacique de charge.	Utiliser le modèle de la distribution surfacique de charge. Établir le champ électrique créé par un plan infini uniformément chargé en surface.
Énergie potentielle électrique d'une charge ponctuelle dans un champ électrique extérieur.	Établir la relation entre l'énergie potentielle d'une charge ponctuelle et le potentiel. Appliquer le théorème de l'énergie cinétique à une particule chargée dans un champ électrique.
Champ gravitationnel.	Établir les analogies entre les champs électrique et gravitationnel.

La partie « **Condensateur** » aborde le condensateur dans la géométrie plane. Cette étude permet d'introduire l'expression de l'énergie volumique du champ électrique sur ce cas particulier, la généralité de cette expression est admise. Aucune notion sur les conducteurs en équilibre électrostatique n'est exigible. La modification de la permittivité introduite par la présence d'un isolant est affirmée sans relation avec une description microscopique de la polarisation.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.3. Condensateur</b>	
Phénomène d'influence électrostatique.	<b>Décrire qualitativement le phénomène d'influence électrostatique.</b>
Capacité d'un condensateur plan.	Déterminer l'expression du champ d'un condensateur plan en négligeant les effets de bord. Déterminer l'expression de la capacité.
Rôle des isolants.	Prendre en compte la permittivité du milieu dans l'expression de la capacité.
Densité volumique d'énergie électrique.	Déterminer l'expression de la densité volumique d'énergie électrique dans le cas du condensateur plan à partir de celle de l'énergie du condensateur. Citer l'expression de la densité volumique d'énergie électrique.

La partie « **Champ magnétique en régime stationnaire** » introduit les équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson comme des postulats de l'électromagnétisme. La conservation du flux du champ magnétique, traduction intégrale de l'équation de Maxwell-Thomson, est l'occasion de revenir sur les connaissances de première année. La loi de Biot et Savart et le potentiel vecteur sont hors programme. L'expression de la densité volumique d'énergie magnétique est établie sur le cas particulier d'une bobine longue, sa généralisation est admise. L'usage des distributions surfaciques de courant sont strictement limité à l'étude de la réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4. Champ magnétique en régime stationnaire</b>	
Équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson.	Énoncer les équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson en régime variable et en régime stationnaire
Conservation du flux magnétique.	Exploiter la conservation du flux magnétique et ses conséquences sur les lignes de champ magnétique.
Théorème d'Ampère.	Énoncer et appliquer le théorème d'Ampère. Établir l'expression du champ magnétique créé par un fil épais et infini, par un solénoïde infini en admettant que le champ extérieur est nul, et par une bobine torique.
Forces de Laplace.	Exprimer les forces de Laplace s'exerçant sur un conducteur filiforme et sur une distribution volumique de courant.

La partie « **Électromagnétisme dans l'ARQS** » étudie l'électromagnétisme en régime variable, principalement dans le cadre de l'ARQS magnétique, afin d'établir le lien avec le cours sur l'induction de première année. La notion de champ électromoteur est hors programme, la force électromotrice induite est calculée à l'aide de la loi de Faraday. Cette partie prépare également le cours sur la conversion de puissance en abordant les courants de Foucault et l'énergie magnétique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.5. Électromagnétisme dans l'ARQS</b>	
Courants de déplacement.	Établir la compatibilité des équations de Maxwell avec la conservation de la charge.
ARQS magnétique.	Simplifier les équations de Maxwell et l'équation de conservation de la charge dans l'ARQS en admettant que les courants de déplacement sont négligeables. Étendre le domaine de validité des expressions des champs magnétiques obtenues en régime stationnaire.
Induction.	Relier la circulation du champ électrique à la dérivée temporelle du flux magnétique.
Courants de Foucault.	Décrire la géométrie des courants de Foucault dans le cas d'un conducteur cylindrique soumis à un champ magnétique parallèle à son axe, uniforme et oscillant. Exprimer la puissance dissipée par effet Joule en négligeant le champ propre et expliquer le rôle du feuilletage.
Énergie magnétique. Densité volumique d'énergie magnétique.	Exprimer l'énergie magnétique d'une bobine seule ou de deux bobines couplées en fonction des coefficients d'inductance et des intensités. Déterminer, à partir de l'expression de l'énergie magnétique, l'expression de la densité volumique d'énergie magnétique dans le cas d'une bobine modélisée par un solénoïde long. Citer l'expression de la densité volumique d'énergie magnétique.
Couplage partiel, couplage parfait.	Établir, dans le cas de deux bobines couplées, l'inégalité $M^2 \leq L_1 L_2$ .

La partie « **Milieux ferromagnétiques** » introduit les notions d'aimantation, d'excitation magnétique, et de perméabilité magnétique. Elle conduit à une réécriture de l'équation de Maxwell-Ampère, plus adaptée à l'étude des milieux magnétiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.6. Milieux ferromagnétiques</b>	
Aimant permanent, champ magnétique créé dans son environnement.	Décrire, à partir d'une formule fournie exprimant le champ d'un dipôle magnétique, le champ créé par un aimant à grande distance et représenter qualitativement les lignes de champ magnétique.



Actions subies par un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur.	Utiliser les expressions fournies de l'énergie potentielle, de la résultante et du moment. Décrire qualitativement l'évolution d'un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur.
Magnéton de Bohr.	Établir l'expression du magnéton de Bohr dans le cadre du modèle de Bohr.
Aimantation d'un milieu magnétique.	Définir le champ d'aimantation d'un milieu magnétique.
Courants d'aimantation.	Associer à une distribution d'aimantation une densité volumique de courants liés équivalente, l'expression étant admise.
Vecteurs champ magnétique, excitation magnétique et aimantation. Équation de Maxwell-Ampère écrite avec le vecteur excitation magnétique.	Définir le vecteur excitation magnétique. Écrire l'équation de Maxwell-Ampère dans un milieu magnétique. Interpréter qualitativement que les sources de l'excitation magnétique sont les courants électriques libres, et que celles de champ magnétique sont les courants électriques libres et l'aimantation.
Milieu ferromagnétique.	Représenter l'allure des cycles d'hystérésis (excitation magnétique, aimantation) et (excitation magnétique, champ magnétique) d'un milieu ferromagnétique. Distinguer milieu dur et milieu doux ; citer des exemples de matériaux.  <b>Tracer le cycle d'hystérésis d'un milieu ferromagnétique.</b>
Milieu ferromagnétique doux.	Modéliser un milieu doux par une relation constitutive linéaire. Définir la perméabilité relative et donner un ordre de grandeur.
Circuit magnétique avec ou sans entrefer.	Décrire l'allure des lignes de champ dans un circuit magnétique en admettant que les lignes de champ sortent orthogonalement à l'interface dans un entrefer.
Électroaimant.	Exprimer le champ magnétique produit dans l'entrefer d'un électroaimant.
Inductance propre d'une bobine à noyau de fer doux modélisé linéairement.	Établir l'expression de l'inductance propre de la bobine à noyau. Vérifier l'expression de l'énergie magnétique : $E_{mag} = \iiint \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r} d\tau.$

Pertes d'une bobine réelle à noyau.

Exprimer le lien entre l'aire du cycle hystérésis et la puissance moyenne absorbée.  
Décrire les différents termes de pertes d'une bobine à noyau : pertes fer par courants de Foucault et par hystérésis, pertes cuivre.

## 5. Conversion de puissance

En première année, la conversion de puissance est abordée à l'occasion des études du transformateur de tension et du moteur à courant continu dans la partie « **Induction et forces de Laplace** ». Il s'agit ici d'approfondir en donnant le moyen d'aborder tous les éléments d'une chaîne énergétique faisant intervenir des éléments électriques, magnétiques et mécaniques.

Afin de pouvoir aborder des problématiques industrielles de forte puissance, le rôle essentiel du fer est considéré. Ainsi, les forces électromagnétiques ne se réduisent pas aux seules forces de Laplace s'exerçant sur les conducteurs traversés par des courants, l'aimantation du milieu participe de manière prépondérante au calcul des actions. De même, la prise en compte de la forte perméabilité du noyau d'un transformateur est indispensable afin d'établir une relation entre les intensités indépendante de la charge. Par ailleurs, on étudie la conversion électronique de puissance permettant d'adapter les différentes sources d'énergie à leur utilisation.

Cet enseignement est une initiation dont l'objectif est d'expliquer les principes physiques mis en œuvre dans des réalisations concrètes, il ne s'agit pas de multiplier les exemples de solutions techniques. En particulier, les dispositifs en triphasé ne sont pas étudiés.

La partie « **Puissance électrique en régime sinusoïdal** » présente quelques résultats généraux relatifs à la puissance électrique en régime sinusoïdal. La représentation de Fresnel est introduite pour illustrer le facteur de puissance. La notion de puissance réactive est hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.1. Puissance électrique en régime sinusoïdal</b>	
Puissance moyenne, facteur de puissance. Représentation de Fresnel.	Définir le facteur de puissance, faire le lien avec la représentation des tensions et des courants sur un diagramme de Fresnel. Citer et exploiter la relation $P = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi$ .
Puissance moyenne absorbée par une impédance.	Citer et exploiter les relations : $P = \Re_e(\underline{Z}) I_{\text{eff}}^2$ et $P = \Re_e(\underline{Y}) U_{\text{eff}}^2$ . Justifier qu'un dipôle purement réactif n'absorbe aucune puissance en moyenne.

La partie « **Transformateur** » complète le modèle du transformateur de tension vu en première année. On ajoute ici le rôle d'un noyau de fer doux de forte perméabilité permettant d'obtenir un transformateur de courant. Les pertes et les défauts sont évoqués mais ne sont pas modélisés. En particulier, l'inductance magnétisante est hors programme. On explique l'intérêt du transformateur pour l'isolement et le transport de l'énergie électrique sur de longues distances.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.2. Transformateur</b>	

Modèle du transformateur idéal.	Citer les hypothèses du transformateur idéal. Établir les lois de transformation des tensions et des courants du transformateur idéal, en respectant l'algébrisation associée aux bornes homologues. Relier le transfert instantané et parfait de puissance à une absence de pertes et de stockage de l'énergie électromagnétique.
Pertes.	Citer les pertes cuivre, les pertes fer par courant de Foucault et par hystérésis. Décrire des solutions permettant de réduire ces pertes.
Applications du transformateur.	Expliquer le rôle du transformateur pour l'isolement. Établir le transfert d'impédance entre le primaire et le secondaire. Expliquer l'intérêt du transport de l'énergie électrique à haute tension afin de réduire les pertes en ligne. Expliquer l'avantage d'un facteur de puissance élevé.  <b>Mettre en œuvre un transformateur et étudier son rendement sur charge résistive.</b>

Dans la partie « **Conversion électro-magnéto-mécanique** », on privilégie un calcul des actions électromagnétiques en dérivant l'énergie magnétique stockée dans le système par rapport à un paramètre de position notamment afin de prendre en compte le rôle du fer. Les milieux magnétiques sont modélisés par des milieux linéaires. La notion de coénergie est hors programme.

Dans une première partie, la méthode de calcul de la force s'exerçant sur une partie mobile de fer est illustrée sur un contacteur en translation faisant partie d'un circuit magnétique dont l'entrefer est variable. À l'aide d'un bilan énergétique, le professeur pourra justifier la relation  $F = (\partial E / \partial x)_i$  mais cette démonstration ne doit pas être considérée comme une capacité exigible.

On aborde ensuite le moteur synchrone en dérivant l'énergie magnétique localisée dans l'entrefer afin de déterminer le moment du couple électromagnétique. Les champs glissants statorique et rotorique sont radiaux dans l'entrefer et présentent des formes d'onde sinusoïdales. On montre que le moment moyen est non nul si les champs glissants sont synchrones. Le modèle électrique des phases de l'induit est abordé afin de décrire la conversion électromécanique de puissance, mais on n'étudiera pas l'utilisation d'une machine à vide comme compensateur synchrone.

Dans un troisième temps, le fonctionnement du moteur à courant continu est traité par analogie avec le moteur synchrone, en montrant que le collecteur réalise le synchronisme entre un champ statorique stationnaire et un champ rotorique qui lui est orthogonal quelle que soit la position angulaire du rotor, produisant ainsi un moment maximal.

On évoque enfin la réversibilité énergétique des machines électriques, en distinguant avec rigueur force électromotrice ( $f_{em}$ ) et force contre-électromotrice ( $f_{cem}$ ). La puissance mécanique des machines est reliée à la puissance électrique des forces électromotrices induites à l'aide de bilans énergétiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.3. Conversion électro-magnéto-mécanique</b>	
<b>5.3.1. Contacteur électromagnétique en translation</b>	

Énergie et force électromagnétique.	Exprimer l'énergie magnétique d'un enroulement enlaçant un circuit magnétique présentant un entrefer variable. Calculer la force électromagnétique s'exerçant sur une partie mobile en translation en appliquant l'expression fournie $F = (\partial E / \partial x)_i$ .
Contacteur électromagnétique.	Sur l'exemple du relais, expliquer le fonctionnement d'un contacteur électromagnétique.
<b>5.3.2. Machine synchrone</b>	
Structure d'un moteur synchrone à pôles lisses et à excitation séparée.	Décrire la structure d'un moteur synchrone diphasé et bipolaire : rotor, stator, induit, inducteur.
Champ magnétique dans l'entrefer.	Exprimer, pour une machine de perméabilité infinie à entrefer constant, le champ magnétique dans l'entrefer généré par une spire passant dans deux encoches opposées. Expliquer qualitativement comment obtenir un champ dont la dépendance angulaire est sinusoïdale dans l'entrefer en associant plusieurs spires décalées.
Champ glissant statorique.	Justifier l'existence d'un champ glissant statorique lorsque les deux phases sont alimentées en quadrature.
Champ glissant rotorique.	Justifier l'existence d'un champ glissant rotorique associé à la rotation de l'inducteur.
Énergie et couple.	Exprimer l'énergie magnétique totale stockée dans l'entrefer en fonction de la position angulaire du rotor. Calculer le moment électromagnétique s'exerçant sur le rotor en exploitant l'expression fournie $\Gamma = \partial E / \partial \theta$ .
Condition de synchronisme.	Justifier la condition de synchronisme entre le champ statorique et le champ rotorique afin d'obtenir un moment moyen non nul. Discuter qualitativement la stabilité du système en fonction du déphasage entre les deux champs glissants. Expliquer la difficulté du démarrage et du contrôle de la vitesse d'un moteur synchrone.
Modèle électrique de l'induit.	Établir les équations électriques vérifiées par les phases de l'induit en admettant les expressions des coefficients d'inductance ; donner les représentations de Fresnel associées. Justifier, à l'aide d'un bilan énergétique où seules les pertes cuivre sont envisagées, l'égalité entre la puissance électrique absorbée par les f <sub>cem</sub> et la puissance mécanique fournie.

Fonctionnement réversible.	Décrire les conditions d'utilisation de la machine synchrone en alternateur.
Machine synchrone.	Citer des exemples d'application de la machine synchrone.
<b>5.3.3. Machine à courant continu</b>	
Structure d'un moteur à courant continu à pôles lisses.	Décrire la structure d'un moteur à courant continu bipolaire à excitation séparée : rotor, stator, induit, inducteur.
Collecteur.	Expliquer, par analogie avec le moteur synchrone, que le collecteur établit le synchronisme entre le champ statorique stationnaire et le champ rotorique quelle que soit la position angulaire du rotor.
Couple et $f_{cem}$ .	Citer l'expression du moment du couple $\Gamma = \Phi i$ et établir l'expression de la $f_{cem}$ induite $e = \Phi \Omega$ par un argument de conservation énergétique. Décrire qualitativement les pertes existant dans une machine réelle : pertes cuivre, pertes fer, pertes mécaniques. Établir les équations électrique et mécanique. Tracer la caractéristique $(\Omega, \Gamma)$ à tension d'induit constante. Analyser le démarrage d'un moteur entraînant une charge mécanique exerçant un moment $- f \cdot \Omega$ .  <b>Mettre en œuvre un moteur à courant continu.</b>
Fonctionnement réversible.	Décrire les conditions d'utilisation de la machine à courant continu en génératrice. Choisir des conventions d'orientation adaptées.
Machine à courant continu.	Citer des exemples d'application de la machine à courant continu.

La partie « **Conversion électronique statique** » aborde la conversion électronique statique de puissance principalement sur l'exemple du hacheur série. Il ne s'agit pas de traiter un cours exhaustif sur les convertisseurs en multipliant les exemples de circuits, l'état d'esprit de cet enseignement doit permettre de réinvestir les capacités pour étudier modestement d'autres montages (redresseur, onduleur). On ne décrit pas le circuit de commande d'un transistor.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.4. Conversion électronique statique</b>	
Formes continue et alternative de la puissance électrique.	Citer des exemples illustrant la nécessité d'une conversion de puissance électrique.

Structure d'un convertisseur.	Décrire l'architecture générale d'un convertisseur électronique de puissance : générateur, récepteur, processeur de puissance utilisant des interrupteurs électroniques, commande des fonctions de commutation.
Fonction de commutation spontanée.	Décrire la caractéristique idéale courant-tension de la diode.
Fonction de commutation commandée.	Décrire la caractéristique idéale courant-tension du transistor.
Sources.	Définir les notions de sources de courant et de tension. Expliquer le rôle des condensateurs et des bobines comme éléments de stockage d'énergie assurant le lissage de la tension ou de l'intensité à haute fréquence.
Réversibilité.	Caractériser les sources par leur réversibilité en tension, en intensité, en puissance et citer des exemples.
Interconnexion.	Citer les règles d'interconnexions entre les sources.
Cellule de commutation élémentaire.	Expliquer le fonctionnement d'une cellule élémentaire à deux interrupteurs assurant le transfert d'énergie entre une source de courant et une source de tension.
Hacheur.	Tracer des chronogrammes. Exploiter le fait que la moyenne d'une dérivée est nulle en régime périodique établi. Calculer des moyennes de fonctions affines par morceaux. Utiliser un bilan de puissance moyenne pour établir des relations entre les tensions et les intensités. Justifier le choix des fonctions de commutation pour un hacheur série assurant l'alimentation d'un moteur à courant continu à partir d'un générateur idéal de tension continue. Exprimer les valeurs moyennes des signaux. Calculer l'ondulation en intensité dans l'approximation d'un hachage haute fréquence réalisant une intensité affine par morceaux.
Onduleur.	Décrire la structure en pont à quatre interrupteurs et les séquences de commutation permises. Étudier, pour un générateur de tension continue et une charge (R,L), la réalisation d'une intensité quasi-sinusoïdale par modulation de largeur d'impulsion.
Convertisseur statique.	<b>Mettre en œuvre un convertisseur statique.</b>

## 6. Physique des ondes

Le programme de physique des ondes s'inscrit dans le prolongement de la partie « **Propagation d'un signal** » du thème « **Ondes et signaux** » du programme de PCSI, où des propriétés unificatrices (interférences, battements, ondes stationnaires...) ont été abordées en s'appuyant sur une approche expérimentale et sans référence à une équation d'onde. Il s'agit désormais de mettre en place l'équation d'onde de d'Alembert, à une ou trois dimensions, sur des systèmes mécaniques ou électromagnétiques. On aborde ensuite l'étude de la dispersion et de l'absorption associées à des phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants. Enfin, la propagation d'ondes dans des milieux différents conduit naturellement à étudier la réflexion et la transmission d'ondes à une interface.

La partie « **Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de d'Alembert** » est consacrée à l'étude de phénomènes ondulatoires non dispersifs. L'équation de d'Alembert unidimensionnelle est d'abord établie en étudiant une partie infinitésimale de corde ou de câble coaxial. On se contente de vérifier que les superpositions de fonctions du type  $f(x - ct)$  et  $g(x + ct)$  sont solutions de l'équation de d'Alembert à une dimension.

Dans un deuxième temps, on étudie les ondes sonores puis les ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace physique de dimension trois.

L'équation de propagation des ondes sonores est établie dans le cadre de l'approximation acoustique avec une approche locale.

Le choix a été fait ici de privilégier les solutions harmoniques dans la résolution de l'équation de d'Alembert, pour leur universalité comme solutions adaptées aux équations d'ondes linéaires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.1. Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de d'Alembert</b>	
<b>6.1.1. Propagation unidimensionnelle</b>	
Ondes transversales sur une corde vibrante.	Établir l'équation d'onde dans le cas d'une corde infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements transverses.
Équation de d'Alembert. Onde progressive. Onde stationnaire.	Identifier une équation de d'Alembert. Exprimer la célérité en fonction des paramètres du milieu. Citer des exemples de solutions de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle.
Ondes progressives harmoniques.	Établir la relation de dispersion à partir de l'équation de d'Alembert. Utiliser la notation complexe. Définir le vecteur d'onde, la vitesse de phase.
Ondes stationnaires harmoniques.	Décomposer une onde stationnaire en ondes progressives, une onde progressive en ondes stationnaires.
Conditions aux limites.	Justifier et exploiter des conditions aux limites.

Régime libre : modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités.	Définir et décrire les modes propres. Construire une solution quelconque par superposition de modes propres.
Régime forcé : corde de Melde.	Associer mode propre et résonance en régime forcé.
Ondes de tension et de courant dans un câble coaxial.	Décrire un câble coaxial par un modèle à constantes réparties sans perte. Établir les équations de propagation dans un câble coaxial sans pertes modélisé comme un milieu continu caractérisé par une inductance linéique et une capacité linéique.
Impédance caractéristique.	Établir l'expression de l'impédance caractéristique d'un câble coaxial.
Réflexion en amplitude sur une impédance terminale.	<b>Étudier la réflexion en amplitude de tension pour une impédance terminale nulle, infinie ou résistive.</b>
<b>6.1.2. Ondes sonores dans les fluides</b>	
Approximation acoustique.	Classer les ondes sonores par domaines fréquentiels. Justifier les hypothèses de l'approximation acoustique par des ordres de grandeur. Écrire les équations locales linéarisées : conservation de la masse, équation thermodynamique, équation de la dynamique.
Équation de d'Alembert pour la surpression.	Établir l'équation de propagation de la surpression formulée avec l'opérateur laplacien.
Célérité.	Exprimer la célérité en fonction de la température pour un gaz parfait. Citer les ordres de grandeur de la célérité pour l'air et pour l'eau.
Densité volumique d'énergie sonore, vecteur densité de courant énergétique.	Utiliser les expressions admises du vecteur densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde.
Intensité sonore, niveau d'intensité sonore.	Définir l'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore. Citer quelques ordres de grandeur de niveaux d'intensité sonore.
Ondes planes progressives harmoniques. Onde longitudinale.	Décrire le caractère longitudinal de l'onde sonore. Discuter de la validité du modèle de l'onde plane en relation avec le phénomène de diffraction. Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques.



Impédance acoustique.	Établir et utiliser l'impédance acoustique définie comme le rapport de la surpression sur le débit volumique ou comme le rapport de la surpression sur la vitesse.
Onde sonore sphérique harmonique divergente.	Commenter l'expression fournie de la surpression générée par une sphère pulsante : atténuation géométrique, structure locale.
Effet Doppler.	<b>Mettre en œuvre une détection synchrone pour mesurer une vitesse par décalage Doppler.</b>
<b>6.1.3. Bilan de Poynting de l'énergie électromagnétique dans un milieu quelconque</b>	
Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting. Équation locale de Poynting.	Identifier les différents termes de l'équation locale de Poynting. Exprimer la puissance rayonnée à travers une surface à l'aide du vecteur de Poynting.
<b>6.1.4. Ondes électromagnétiques dans le vide</b>	
Propagation des vecteurs champs électrique et magnétique dans une région sans charge ni courant.	Citer les domaines du spectre des ondes électromagnétiques et leur associer des applications. Établir les équations de propagation.
Structure d'une onde plane progressive harmonique.	Utiliser la notation complexe. Établir la relation entre le vecteur champ électrique, le vecteur champ magnétique et le vecteur d'onde. Associer la direction du vecteur de Poynting et la direction de propagation de l'onde. Associer le flux du vecteur de Poynting à un flux de photons en utilisant la relation d'Einstein-Planck. Citer quelques ordres de grandeur de flux énergétiques surfaciques moyens (laser hélium-néon, flux solaire). Utiliser le principe de superposition d'ondes planes progressives harmoniques.
Polarisation rectiligne.	Identifier l'expression d'une onde électromagnétique plane progressive polarisée rectilignement.  <b>Utiliser des polariseurs et étudier quantitativement la loi de Malus.</b>

La partie « **Phénomènes de propagation linéaires : absorption et dispersion** » est consacrée aux phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants. L'étude est menée sur des ondes harmoniques unidimensionnelles lorsque l'équation de propagation est linéaire mais n'est pas une équation de d'Alembert. On évoque ensuite la théorie de Fourier pour justifier qu'une onde quelconque limitée dans le temps est la superposition d'ondes harmoniques : on définit ainsi la notion de paquet d'onde. Pour finir, on applique les notions nouvellement introduites sur la dispersion à la propagation des ondes dans les milieux conducteurs et les plasmas. L'étude de la propagation des ondes dans un plasma dilué est exclusivement limitée aux ondes

transverses électriques ; le professeur est invité à signaler, sans soucis d'exhaustivité, quelques limites du modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.2. Phénomènes de propagation linéaires : absorption et dispersion</b>	
<b>6.2.1. Relation de dispersion</b>	
Propagation unidimensionnelle d'une onde harmonique dans un milieu linéaire.	Identifier le caractère linéaire d'une équation aux dérivées partielles. Établir la relation de dispersion. Relier, pour un signal proportionnel à $\exp(j(\omega t - \underline{k}x))$ , la partie réelle de $\underline{k}$ à la vitesse de phase et la partie imaginaire de $\underline{k}$ à une dépendance spatiale de l'amplitude.
<b>6.2.2. Paquet d'ondes</b>	
Superposition de deux ondes de fréquences proches dans un milieu non absorbant et dispersif.	Déterminer la vitesse de groupe. Associer la vitesse de groupe à la propagation de l'enveloppe du paquet d'ondes.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler la propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu dispersif et visualiser le phénomène d'étalement.
Domaine spectral d'un paquet d'onde de durée finie.	Énoncer et exploiter la relation entre les ordres de grandeur de la durée temporelle d'un paquet d'onde et la largeur fréquentielle de son spectre.
<b>6.2.3. Ondes électromagnétiques planes dans des milieux conducteurs</b>	
Conducteur ohmique de conductivité réelle : effet de peau.	Identifier une analogie formelle avec les phénomènes de diffusion. Établir l'expression de l'épaisseur de peau. Citer l'ordre de grandeur de l'épaisseur de peau du cuivre à 50 Hz. Associer l'atténuation de l'onde à une dissipation d'énergie.
Modèle du conducteur parfait en présence d'un champ électromagnétique variable.	Justifier que les champs électrique et magnétique sont nuls dans le conducteur.
Onde plane transverse électrique harmonique dans un plasma dilué. Conductivité complexe du milieu. Fréquence de coupure. Vitesse de phase, vitesse de groupe. Ondes évanescentes.	Exprimer la conductivité complexe du milieu et établir la relation de dispersion. Relier la fréquence de coupure aux caractéristiques du plasma et citer son ordre de grandeur dans le cas de l'ionosphère. Associer le caractère imaginaire pur de la conductivité complexe à l'absence de puissance moyenne échangée entre le champ et les porteurs. Distinguer qualitativement les ondes évanescentes et les ondes progressives du point de vue du transport de l'énergie.

La partie « **Interfaces entre deux milieux** » est consacrée à la réflexion et à la transmission d'ondes à une interface plane sous incidence normale en acoustique et en électromagnétisme. Les relations de passage pour le champ électromagnétique sont affirmées, leurs démonstrations ne relèvent pas du programme. La détermination de l'intensité d'un courant à partir du vecteur densité de courant surfacique n'est pas un objectif de formation.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.3. Interfaces entre deux milieux</b>	
<b>6.3.1. Cas des ondes sonores</b>	
Réflexion, transmission d'une onde sonore sur une interface plane entre deux fluides : coefficients de réflexion et de transmission en amplitude des vitesses, des surpressions et des puissances sonores.	Expliciter des conditions aux limites à une interface. Établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion en amplitude de surpression, en amplitude de vitesse ou en puissance dans le cas d'une onde plane progressive sous incidence normale. Relier l'adaptation des impédances au transfert maximal de puissance.
<b>6.3.2. Cas des ondes électromagnétiques</b>	
Relations de passage du champ électromagnétique en présence d'une distribution surfacique de charge ou de courant.	Interpréter le vecteur densité de courant surfacique comme un modèle pour décrire un déplacement de charges à travers un domaine d'épaisseur faible devant l'échelle de description. Utiliser les relations de passage fournies.
Réflexion d'une onde électromagnétique polarisée rectilignement sur un conducteur parfait, en incidence normale. Pression de radiation.	Exploiter la continuité de la composante tangentielle du champ électrique pour justifier l'existence d'une onde réfléchie et calculer celle-ci. Établir l'expression du champ électromagnétique de l'onde réfléchie et du vecteur densité de courant surfacique. Calculer le coefficient de réflexion en puissance. Déterminer la pression de radiation à l'aide de l'expression fournie de la force de Laplace.

## 7. Transformations de la matière : aspects thermodynamiques et cinétiques

Les transformations de la matière ont été abordées au premier semestre de la classe de PCSI ; le critère d'évolution spontanée d'un système chimique en transformation y a été présenté et utilisé sans être démontré. Ce critère a été remobilisé au second semestre lors de l'étude des transformations chimiques en solution aqueuse.

Le but de cette partie est double : aborder les transferts thermiques et établir, puis exploiter le critère d'évolution spontanée d'un système engagé dans une transformation physico-chimique, ce qui nécessite l'introduction de la fonction enthalpie libre et du potentiel chimique.

Dans la partie « **Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques** », l'étude des transferts thermiques, abordée en première année dans le cadre du cours de physique relatif aux transformations physiques du corps pur, est ici généralisée aux transformations physico-chimiques. Les enthalpies standard de réaction sont considérées comme indépendantes de la température.

Les notions et contenus sont illustrés à travers des applications liées à la vie quotidienne (contenu calorique des aliments, pouvoirs calorifiques des carburants, etc.), à la recherche (apports des techniques calorimétriques modernes, etc.) ou au domaine industriel. Un prolongement est proposé dans le cadre de l'étude thermique au sein des réacteurs continus dans la partie portant sur les procédés industriels continus.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>7.1. Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques</b>	
État standard. Enthalpie standard de réaction. Loi de Hess. Enthalpie standard de formation, état standard de référence d'un élément.	Déterminer l'enthalpie standard de réaction à l'aide de tables de données thermodynamiques. Associer le signe de l'enthalpie standard de réaction au caractère endothermique ou exothermique de la réaction.
Effets thermiques en réacteur monobare : <ul style="list-style-type: none"> <li>- transfert thermique associé à la transformation chimique en réacteur monobare, isotherme ;</li> <li>- variation de température en réacteur monobare, adiabatique.</li> </ul>	Prévoir, à partir de données thermodynamiques, le sens et estimer la valeur du transfert thermique entre un système, siège d'une transformation physico-chimique et le milieu extérieur. Évaluer la température atteinte par un système siège d'une transformation chimique supposée monobare et réalisée dans un réacteur adiabatique.  <b>Mettre en œuvre une transformation physico-chimique en réacteur adiabatique monobare pour déterminer une enthalpie standard de réaction.</b>

Dans la partie « **Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques** », on adopte pour les potentiels chimiques une expression générale :  $\mu_i = \mu_{i,ref} + RT \ln(a_i)$  qui fait référence aux activités  $a_i$  introduites en première année. L'établissement de cette expression est hors programme. L'influence de la pression sur le potentiel chimique d'un constituant en phase condensée pure n'est pas abordée. On se limite aux cas d'une espèce chimique pure, d'une espèce en solution aqueuse très diluée et d'une espèce en mélange de gaz parfaits avec référence à l'état standard. Pour le calcul des grandeurs standard de réaction, les enthalpies et entropies standard de réaction sont supposées indépendantes de la température. Les grandeurs standard de réaction permettent la détermination de la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre  $K^\circ$  d'une réaction, valeur qui était simplement donnée en première année. C'est ainsi l'occasion de revenir sur la détermination de la composition du système physico-chimique en fin d'évolution.

La notion d'affinité chimique n'est pas utilisée, le sens d'évolution spontanée d'un système hors d'équilibre, à température et pression fixées, est déterminé par le signe de l'enthalpie libre de réaction  $\Delta_r G$ .

Enfin, l'étude de l'influence de la modification d'un paramètre (pression, température ou composition) sur un système chimique permet d'aborder la problématique de l'optimisation des conditions opératoires d'un procédé chimique.

Les illustrations et applications sont choisies dans le domaine industriel, dans la vie courante et au niveau du laboratoire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>7.2. Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques</b>	
Enthalpie libre.	Justifier que l'enthalpie libre est le potentiel thermodynamique adapté à l'étude des transformations isothermes, isobares et spontanées. Exprimer l'entropie créée en fonction de la variation d'enthalpie libre.
Identités thermodynamiques. Potentiel chimique.	Citer les expressions des différentielles de U, H, G. Distinguer les caractères intensif ou extensif des variables utilisées.
Potentiel chimique du corps pur.	Identifier le potentiel chimique d'un corps pur à son enthalpie libre molaire.
Conditions d'équilibre d'un corps pur sous plusieurs phases.	Établir l'égalité des potentiels chimiques pour un corps pur en équilibre sous plusieurs phases. En déduire l'existence d'une courbe d'équilibre sur un diagramme (P,T).
Paramètres intensifs.	Identifier un jeu de paramètres intensifs indépendants permettant la description d'un système physico-chimique en équilibre.
Évolution d'un système sous plusieurs phases.	Utiliser le potentiel chimique pour prévoir l'évolution d'un système contenant une espèce chimique dans plusieurs phases.
Potentiel chimique d'une espèce chimique dans un mélange ; enthalpie libre d'un système chimique. Activité.	Donner l'expression (admise) du potentiel chimique d'un constituant en fonction de son activité. Exprimer l'enthalpie libre d'un système chimique en fonction des potentiels chimiques.
Enthalpie de réaction, entropie de réaction, enthalpie libre de réaction et grandeurs standard associées. Relation entre enthalpie libre de réaction et quotient de réaction ; équilibre physico-chimique ; évolution d'un système chimique.	Justifier qualitativement ou prévoir le signe de l'entropie standard de réaction. Relier création d'entropie et enthalpie libre de réaction lors d'une transformation d'un système physico-chimique à pression et température fixées. Prévoir le sens d'évolution à pression et température fixées d'un système physico-chimique dans un état donné à l'aide de l'enthalpie libre de réaction. Déterminer les grandeurs standard de réaction à partir des tables de données thermodynamiques et de la loi de Hess.

Constante thermodynamique d'équilibre ; relation de Van 't Hoff.	Citer et exploiter la relation de Van 't Hoff. Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à une température quelconque.  <b>Déterminer l'évolution de la valeur d'une constante thermodynamique d'équilibre en fonction de la température.</b>
État final d'un système : équilibre chimique ou transformation totale.	Déterminer la composition chimique d'un système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.
Optimisation thermodynamique d'un procédé chimique : <ul style="list-style-type: none"> <li>- par modification de la valeur de <math>K^\circ</math> ;</li> <li>- par modification de la valeur du quotient réactionnel.</li> </ul>	Identifier les paramètres d'influence et leur contrôle pour optimiser une synthèse ou minimiser la formation d'un produit secondaire indésirable.

Les transformations chimiques de la matière réalisées au laboratoire mettent en jeu de faibles quantités de matière et sont conduites en réacteur fermé. À l'échelle industrielle, les transformations mettent en jeu des quantités de matière beaucoup plus élevées et sont souvent conduites en réacteur ouvert pour assurer un fonctionnement continu. L'objectif de cette partie « **Procédés industriels continus : aspects cinétiques et thermodynamiques** » est une initiation aux bilans de matière et d'énergie effectués sur des réacteurs ouverts continus.

L'étude des opérations unitaires s'inscrit dans le prolongement des connaissances acquises en physique, notamment en mécanique des fluides, et en chimie, en particulier en cinétique en réacteur fermé et en thermodynamique, domaines qui sont à la base du génie des procédés et de la technologie chimique.

Sensibiliser les étudiants aux enjeux spécifiques du secteur industriel est un élément constitutif de leur formation. Des procédés chimiques innovants s'imposent pour développer des techniques et des appareils adaptés permettant d'obtenir des rendements supérieurs à ceux des procédés conventionnels, tout en limitant leurs impacts environnementaux, en mettant au point des procédés plus sûrs, moins consommateurs d'énergie, de matières premières et de solvants et également moins polluants.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>7.3. Procédés industriels continus : aspects cinétiques et thermodynamiques</b>	
<b>D'un protocole de laboratoire à un procédé industriel.</b>	
Opérations unitaires d'un procédé.	Exploiter un schéma de procédé légendé pour identifier les différentes opérations unitaires.
Procédés discontinus ou continus.	Identifier un procédé discontinu ou continu.
Procédés continus en régime stationnaire : débit de matière en masse et en quantité de matière, bilan de matière.	Effectuer un bilan de matière sur une espèce chimique à partir de données sur les compositions et les débits entrants et sortants.

<p><b>Cinétique de transformations en réacteur ouvert.</b></p> <p>Modèle du réacteur parfaitement agité continu en régime stationnaire dans le cas d'un écoulement de débits volumiques égaux à l'entrée et à la sortie.</p>	<p>Effectuer un bilan de quantité de matière sur une espèce chimique.</p>
<p>Taux de conversion d'un réactif. Temps de passage.</p>	<p>Relier le taux de conversion du réactif au temps de passage pour une transformation de loi de vitesse de réaction donnée.</p>
<p>Modèle du réacteur chimique en écoulement piston isotherme en régime stationnaire dans le cas de débits volumiques égaux à l'entrée et à la sortie du réacteur ; dimensionnement d'un réacteur en écoulement piston.</p>	<p>Établir un bilan de quantité de matière sur une espèce chimique. Relier le taux de conversion en sortie d'un réacteur en écoulement piston et le temps de passage pour une transformation modélisée par une loi de vitesse donnée.</p>
<p><b>Étude thermique d'un réacteur ouvert.</b></p> <p>Bilan énergétique sur un réacteur parfaitement agité continu en régime stationnaire dans le cas de débits volumiques égaux à l'entrée et à la sortie.</p>	<p>Effectuer un bilan énergétique sur un réacteur ouvert afin d'établir une relation entre les températures d'entrée et de sortie, le taux de conversion et le flux thermique éventuellement échangé.</p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, déterminer le(s) point(s) de fonctionnement (température et taux de conversion) d'un réacteur ouvert siège d'une transformation modélisée par une réaction isotherme unique et en discuter la stabilité.</p>

## 8. Aspects thermodynamiques et cinétiques de l'électrochimie

Les aspects thermodynamiques et cinétiques des réactions d'oxydo-réduction sont appliqués notamment à la corrosion d'une part et aux dispositifs électrochimiques que sont les piles et les accumulateurs d'autre part. L'illustration des notions gagne à s'appuyer sur des applications concrètes comme par exemple la mise en œuvre de capteurs électrochimiques dans l'analyse de l'eau, de l'air ou d'effluents. L'approche de l'électrochimie proposée ici privilégie les raisonnements qualitatifs et les aspects expérimentaux, plutôt que les développements théoriques et formels.

La partie « **Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction** » se fonde sur les acquis de première année relatifs à l'étude des réactions d'oxydo-réduction et des piles, ainsi que sur la partie de thermodynamique chimique de seconde année pour relier les grandeurs thermodynamiques aux potentiels.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>8.1. Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction</b>	
Relation entre enthalpie libre de réaction et potentiels des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.	Citer et exploiter la relation entre l'enthalpie libre de réaction et les potentiels des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.
Relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard des couples impliqués.	Déterminer l'enthalpie libre standard d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples. Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple d'oxydo-réduction à partir de données thermodynamiques.

La partie « **Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction : courbe courant-potentiel** » se fonde sur les acquis de cinétique chimique de première année et les prolongent par le tracé et l'exploitation de courbes courant-potentiel.

Les courbes courant-potentiel, dont le tracé est proposé en capacité expérimentale, sont un outil essentiel dans la compréhension et la modélisation des systèmes électrochimiques.

L'écart entre le potentiel d'une électrode et son potentiel d'équilibre est appelé surpotentiel plutôt que surtension pour des raisons pédagogiques, en cohérence avec le vocabulaire anglo-saxon correspondant.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>8.2. Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction : courbe courant-potentiel</b>	
Courbes courant-potentiel sur une électrode en régime stationnaire : <ul style="list-style-type: none"> <li>- surpotentiel ;</li> <li>- systèmes rapides et systèmes lents ;</li> <li>- nature de l'électrode ;</li> <li>- courant de diffusion limite ;</li> <li>- vagues successives ;</li> <li>- domaine d'inertie électrochimique du solvant.</li> </ul>	Décrire le montage à trois électrodes permettant de tracer des courbes courant-potentiel. Relier vitesse de réaction électrochimique et intensité du courant. Identifier le caractère lent ou rapide d'un système à partir des courbes courant-potentiel. Identifier les espèces électroactives pouvant donner lieu à une limitation en courant par diffusion. Identifier des paliers de diffusion limite sur des relevés expérimentaux. Relier, à l'aide de la loi de Fick, l'intensité du courant de diffusion limite à la concentration du réactif et à la surface immergée de l'électrode. Tracer l'allure de courbes courant-potentiel de branches d'oxydation ou de réduction à partir de données fournies, de potentiels standard, concentrations et surpotentiels.  <b>Tracer et exploiter des courbes courant-potentiel.</b>



La partie « **Stockage et conversion d'énergie dans des dispositifs électrochimiques** » s'appuie sur les courbes courant-potentiel pour étudier le fonctionnement des piles et leur recharge, ainsi que les électrolyseurs. Ces courbes permettent en effet de déterminer différentes caractéristiques : réactions aux électrodes, tension à vide, tension à imposer pour une recharge, etc.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>8.3. Stockage et conversion d'énergie dans des dispositifs électrochimiques</b>	
<p><b>Conversion d'énergie chimique en énergie électrique : fonctionnement des piles.</b></p> <p>Transformations spontanées et réaction modélisant le fonctionnement d'une pile électrochimique.</p>	<p>Établir l'inégalité reliant la variation d'enthalpie libre et le travail électrique.</p> <p>Relier la tension à vide d'une pile et l'enthalpie libre de la réaction modélisant son fonctionnement.</p> <p>Déterminer la capacité électrique d'une pile.</p>
<p>Courbes courant-potentiel et fonctionnement d'une pile électrochimique.</p>	<p>Exploiter les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'une pile électrochimique et tracer sa caractéristique.</p> <p>Citer les paramètres influençant la résistance interne d'une pile électrochimique.</p>
<p><b>Conversion d'énergie électrique en énergie chimique.</b></p> <p>Transformations forcées lors d'une électrolyse et de la recharge d'un accumulateur.</p>	<p>Exploiter les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'un électrolyseur et prévoir la valeur de la tension minimale à imposer.</p> <p>Exploiter les courbes courant-potentiel pour justifier les contraintes (purification de la solution électrolytique, choix des électrodes) dans la recharge d'un accumulateur.</p> <p>Déterminer la masse de produit formé pour une durée et des conditions données d'électrolyse.</p> <p>Déterminer un rendement faradique à partir d'informations fournies concernant le dispositif étudié.</p>
<p>Stockage et conversion d'énergie chimique.</p>	<p><b>Étudier le fonctionnement d'une pile ou d'un électrolyseur pour effectuer des bilans de matière et des bilans électriques.</b></p>

La lutte contre la corrosion est un enjeu économique actuel et la compréhension des phénomènes de corrosion et des facteurs influençant cette corrosion est essentielle pour effectuer des choix de méthodes de protection. La partie « **Corrosion humide ou électrochimique** » exploite les courbes courant-potentiel pour interpréter les phénomènes de corrosion, de protection et de passivation. On se limite à la corrosion uniforme et à la corrosion galvanique de deux métaux en contact. Les tracés de diagrammes de Tafel ou d'Evans sont hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>8.4. Corrosion humide ou électrochimique</b>	
Corrosion uniforme en milieu acide ou en milieu neutre oxygéné : potentiel de corrosion, courant de corrosion. Corrosion d'un système de deux métaux en contact.	Positionner un potentiel de corrosion sur un tracé de courbes courant-potentiel. Interpréter le phénomène de corrosion uniforme d'un métal ou de deux métaux en contact en utilisant des courbes courant-potentiel ou d'autres données expérimentales, thermodynamiques et cinétiques. Déterminer une vitesse de corrosion. Citer des facteurs favorisant la corrosion.
Protection contre la corrosion : <ul style="list-style-type: none"> <li>- revêtement ;</li> <li>- anode sacrificielle ;</li> <li>- protection électrochimique par courant imposé.</li> </ul>	Exploiter des tracés de courbes courant-potentiel pour expliquer qualitativement : <ul style="list-style-type: none"> <li>- la qualité de la protection par un revêtement métallique ;</li> <li>- le fonctionnement d'une anode sacrificielle.</li> </ul>
Passivation.	Interpréter le phénomène de passivation sur une courbe courant-potentiel.  <b>Mettre en évidence le phénomène de corrosion et les facteurs l'influençant.</b>

### Annexe 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en annexe 1 du programme de physique de PCSI. À elles deux, ces listes regroupent le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée. Une utilisation de matériel hors de ces listes lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une aide.

#### 1. Domaine conversion de puissance

- Wattmètre numérique.
- Transformateur à noyau ferromagnétique.
- Machine à courant continu.
- Alimentation stabilisée.

#### 2. Domaine électrique

- Oscilloscope numérique avec analyseur de spectre.
- Microcontrôleur.
- CAN et CNA.
- ALI.
- Multiplieur analogique.

	Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Risque chimique</b></li> </ul> Règles de sécurité au laboratoire. Classes et catégories de danger. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Mentions de danger (H) et conseils de prudence (P). Fiches de sécurité.	Relever les indications sur le risque associé au prélèvement, au mélange et au stockage des produits chimiques et adopter une attitude responsable lors de leur utilisation.
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Risque électrique</b></li> </ul>	Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Risque optique</b></li> </ul>	Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Risques liés à la pression et à la température</b></li> </ul>	Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.
<b>4. Prévention de l'impact environnemental</b> Traitement et rejet des espèces chimiques.	Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

## Contenus thématiques

L'organisation des semestres est la suivante.

### Premier semestre

#### Thème 1 : ondes et signaux (1)

- 1.1. Formation des images
- 1.2. Signaux électriques dans l'ARQS
- 1.3. Circuit linéaire du premier ordre
- 1.4. Oscillateurs libres et forcés
- 1.5. Filtrage linéaire
- 1.6. Propagation d'un signal

#### Thème 2 : mouvements et interactions (1)

- 2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point
- 2.2. Lois de Newton
- 2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel

#### Thème 4 : constitution et transformations de la matière (1)

- 4.1. Transformations de la matière
  - 4.1.1. Description d'un système et de son évolution vers un état final
  - 4.1.2. Évolution temporelle d'un système chimique

- 4.2. Relations entre la structure des entités chimiques et les propriétés physiques macroscopiques
  - 4.2.1 Structure des entités chimiques
  - 4.2.2. Relations structure des entités - propriétés physiques macroscopiques

## Deuxième semestre

### Thème 2 : mouvements et interactions (2)

- 2.4. Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires
- 2.5. Moment cinétique
- 2.6. Mouvements dans un champ de force centrale conservatif
- 2.7. Mouvement d'un solide

### Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts

- 3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre
- 3.2. Énergie échangée par un système au cours d'une transformation
- 3.3. Premier principe. Bilans d'énergie
- 3.4. Deuxième principe. Bilans d'entropie
- 3.5. Machines thermiques

### Thème 1 : ondes et signaux (2)

- 1.7. Induction et forces de Laplace
  - 1.7.1. Champ magnétique
  - 1.7.2. Actions d'un champ magnétique
  - 1.7.3. Lois de l'induction
  - 1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps
  - 1.7.5. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire

### Thème 4 : constitution et transformations de la matière (2)

- 4.3. Structure et propriétés physiques des solides
- 4.4. Transformations chimiques en solution aqueuse
  - 4.4.1. Réactions acide-base et de précipitation
  - 4.4.2. Réactions d'oxydo-réduction

## A. Premier semestre

### Thème 1 : ondes et signaux (1)

La partie 1.1. « **Formation des images** » traite de la formation des images et propose une ouverture sur la notion de guidage de la lumière par une fibre optique. Cette partie est l'occasion d'interroger le concept de modèle en physique et d'en identifier les limites de validité. Elle permet également d'aborder de nombreuses applications technologiques ; certaines sont précisées par le programme, d'autres sont laissées à l'appréciation des enseignants (lunette, microscope, optique d'un smartphone, etc.). L'approche expérimentale doit être privilégiée dans ce domaine de la physique qui s'y prête particulièrement bien.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Formation des images</b>	
<b>Sources lumineuses</b> Modèle de la source ponctuelle monochromatique. Spectre.	Caractériser une source lumineuse par son spectre. Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
<b>Modèle de l'optique géométrique</b> Modèle de l'optique géométrique. Notion de rayon lumineux. Indice d'un milieu transparent.	Définir le modèle de l'optique géométrique. Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique.
Réflexion, réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Établir la condition de réflexion totale.
<b>Conditions de l'approximation de Gauss et applications</b> Stigmatisme. Miroir plan.	Construire l'image d'un objet par un miroir plan.
Conditions de l'approximation de Gauss.	Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences. Relier le stigmatisme approché aux caractéristiques d'un détecteur.
Lentilles minces dans l'approximation de Gauss.	Définir les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence. Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux, identifier sa nature réelle ou virtuelle. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et de Newton. Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente.
<b>Modèles de quelques dispositifs optiques</b> L'œil. Punctum proximum, punctum remotum.	Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur plan fixe. Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.
L'appareil photographique.	Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur. Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné.  <b>Étudier l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image.</b>
La fibre optique à saut d'indice.	Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.

La partie 1.2. « **Signaux électriques dans l'ARQS** » pose les bases nécessaires à l'étude des circuits dans l'Approximation des Régimes Quasi Stationnaires (ARQS). Si le programme se concentre sur

l'étude des dipôles R, L et C, il est possible, lors des travaux pratiques, de faire appel à des composants intégrés ou non linéaires (filtres à capacité commutée, échantillonneur-bloqueur, diodes, photorésistances, etc.) dès lors qu'aucune connaissance préalable n'est nécessaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Signaux électriques dans l'ARQS</b>	
Charge électrique, intensité du courant. Potentiel, référence de potentiel, tension. Puissance.	Justifier que l'utilisation de grandeurs électriques continues est compatible avec la quantification de la charge électrique. Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charge. Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence. Relier la loi des nœuds au postulat de la conservation de la charge. Utiliser la loi des mailles. Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur. Citer les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d'application.
Dipôles : résistances, condensateurs, bobines, sources décrites par un modèle linéaire.	Utiliser les relations entre l'intensité et la tension. Citer des ordres de grandeurs des composants R, L, C. Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance. Exprimer l'énergie stockée dans un condensateur ou une bobine. Modéliser une source en utilisant la représentation de Thévenin.
Association de deux résistances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente. Établir et exploiter les relations des diviseurs de tension ou de courant.
Résistance de sortie, résistance d'entrée.	<b>Évaluer une résistance d'entrée ou de sortie à l'aide d'une notice ou d'un appareil afin d'appréhender les conséquences de leurs valeurs sur le fonctionnement d'un circuit.</b>  <b>Étudier l'influence des résistances d'entrée ou de sortie sur le signal délivré par un GBF, sur la mesure effectuée par un oscilloscope ou un multimètre.</b>

Les deux parties **1.3. « Circuit linéaire du premier ordre »** et **1.4. « Oscillateurs libres et forcés »** abordent l'étude des circuits linéaires du premier et du second ordre en régime libre puis forcé. Il s'agit avant tout de comprendre les principes des méthodes mises en œuvre et leur exploitation pour étudier le comportement d'un signal traversant un système linéaire. Le choix a été fait de présenter simultanément les oscillateurs électriques et mécaniques de manière à mettre l'accent sur les analogies formelles et comportementales.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3. Circuit linéaire du premier ordre</b>	
Régime libre, réponse à un échelon de tension.	<p>Distinguer, sur un relevé expérimental, régime transitoire et régime permanent au cours de l'évolution d'un système du premier ordre soumis à un échelon de tension.</p> <p>Interpréter et utiliser la continuité de la tension aux bornes d'un condensateur ou de l'intensité du courant traversant une bobine.</p> <p>Établir l'équation différentielle du premier ordre vérifiée par une grandeur électrique dans un circuit comportant une ou deux mailles.</p> <p>Déterminer la réponse temporelle dans le cas d'un régime libre ou d'un échelon de tension.</p> <p>Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire.</p> <p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un circuit linéaire du premier ordre et analyser ses caractéristiques. Confronter les résultats expérimentaux aux expressions théoriques.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : mettre en œuvre la méthode d'Euler à l'aide d'un langage de programmation pour simuler la réponse d'un système linéaire du premier ordre à une excitation de forme quelconque.</p>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Oscillateurs libres et forcés</b>	
Oscillateur harmonique. Exemples du circuit LC et de l'oscillateur mécanique.	<p>Établir et reconnaître l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique ; la résoudre compte tenu des conditions initiales.</p> <p>Caractériser l'évolution en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation.</p> <p>Réaliser un bilan énergétique.</p>
Circuit RLC série et oscillateur mécanique amorti par frottement visqueux.	<p>Analyser, sur des relevés expérimentaux, l'évolution de la forme des régimes transitoires en fonction des paramètres caractéristiques.</p> <p>Prévoir l'évolution du système à partir de considérations énergétiques.</p> <p>Écrire sous forme canonique l'équation différentielle afin d'identifier la pulsation propre et le facteur de qualité.</p>

	<p>Décrire la nature de la réponse en fonction de la valeur du facteur de qualité. Déterminer la réponse détaillée dans le cas d'un régime libre ou d'un système soumis à un échelon en recherchant les racines du polynôme caractéristique. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire selon la valeur du facteur de qualité.</p> <p><b>Mettre en évidence la similitude des comportements des oscillateurs mécanique et électronique.</b></p> <p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un système linéaire du deuxième ordre et analyser ses caractéristiques.</b></p>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique.
Impédances complexes.	Établir et citer l'impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine.
Association de deux impédances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux impédances par une impédance équivalente.
Oscillateur électrique ou mécanique soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance.	<p>Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé. Relier l'acuité d'une résonance au facteur de qualité. Déterminer la pulsation propre et le facteur de qualité à partir de graphes expérimentaux d'amplitude et de phase.</p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental visant à caractériser un phénomène de résonance.</b></p>

L'objectif principal de la partie **1.5. « Filtrage linéaire »** n'est pas de former les étudiants aux aspects techniques des calculs des fonctions de transfert et des tracés de diagrammes de Bode mais de mettre l'accent sur l'interprétation des propriétés du signal de sortie connaissant celles du signal d'entrée et d'appréhender le rôle central de la linéarité des systèmes utilisés.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.5. Filtrage linéaire</b>	
Signaux périodiques.	<p>Analyser la décomposition fournie d'un signal périodique en une somme de fonctions sinusoïdales. Définir la valeur moyenne et la valeur efficace d'un signal. Établir par le calcul la valeur efficace d'un signal sinusoïdal. Interpréter le fait que le carré de la valeur efficace d'un signal périodique est égal à la somme des carrés des valeurs efficaces de ses harmoniques.</p>



<p>Fonction de transfert harmonique. Diagramme de Bode.</p>	<p>Tracer le diagramme de Bode (amplitude et phase) associé à une fonction de transfert d'ordre 1. Utiliser une fonction de transfert donnée d'ordre 1 ou 2 (ou ses représentations graphiques) pour étudier la réponse d'un système linéaire à une excitation sinusoïdale, à une somme finie d'excitations sinusoïdales, à un signal périodique. Utiliser les échelles logarithmiques et interpréter les zones rectilignes des diagrammes de Bode en amplitude d'après l'expression de la fonction de transfert.</p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'utilité des fonctions de transfert pour un système linéaire à un ou plusieurs étages.</b></p>
<p>Modèles de filtres passifs : passe-bas et passe-haut d'ordre 1, passe-bas et passe-bande d'ordre 2.</p>	<p>Choisir un modèle de filtre en fonction d'un cahier des charges. Expliciter les conditions d'utilisation d'un filtre en tant que moyennneur, intégrateur, ou dérivateur. Expliquer l'intérêt, pour garantir leur fonctionnement lors de mises en cascade, de réaliser des filtres de tension de faible impédance de sortie et forte impédance d'entrée. Expliquer la nature du filtrage introduit par un dispositif mécanique (sismomètre, amortisseur, accéléromètre, etc.).</p> <p><b>Étudier le filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal à partir d'une analyse spectrale.</b></p> <p><b>Détecter le caractère non linéaire d'un système par l'apparition de nouvelles fréquences.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : simuler, à l'aide d'un langage de programmation, l'action d'un filtre sur un signal périodique dont le spectre est fourni. Mettre en évidence l'influence des caractéristiques du filtre sur l'opération de filtrage.</p>

Dans la partie **1.6.** consacrée à la « **Propagation d'un signal** », il est recommandé de s'appuyer sur une approche expérimentale ou sur des logiciels de simulation pour permettre aux étudiants de faire le lien entre l'observation de signaux qui se propagent et la traduction mathématique de cette propagation, sans qu'aucune référence ne soit faite à une équation d'onde. L'étude de la somme de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence et du phénomène d'interférences associé permet de mettre en évidence le rôle essentiel joué par le déphasage entre les deux signaux dans le signal résultant. L'étude des interférences lumineuses est l'occasion d'introduire la notion de différence de chemin optique et de la relier au déphasage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.6. Propagation d'un signal</b>	
Exemples de signaux. Signal sinusoïdal.	Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.
<b>Propagation d'un signal dans un milieu illimité, non dispersif et transparent</b> Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle non dispersive. Célérité, retard temporel.	Écrire les signaux sous la forme $f(x-ct)$ ou $g(x+ct)$ . Écrire les signaux sous la forme $f(t-x/c)$ ou $g(t+x/c)$ . Prévoir, dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle à position fixée et l'évolution spatiale à différents instants.
Modèle de l'onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle. Vitesse de phase, déphasage, double périodicité spatiale et temporelle.	Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique, mécanique et électromagnétique. Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de phase. Relier le déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation.  <b>Mesurer la vitesse de phase, la longueur d'onde et le déphasage dû à la propagation d'un phénomène ondulatoire.</b>
Milieux dispersifs ou non dispersifs.	Définir un milieu dispersif. Citer des exemples de situations de propagation dispersive et non dispersive.
<b>Phénomène d'interférences</b> Interférences entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence.	Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives. Déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage.
Interférences entre deux ondes lumineuses de même fréquence. Exemple du dispositif des trous d'Young éclairé par une source monochromatique. Différence de chemin optique. Conditions d'interférences constructives ou destructives. Formule de Fresnel.	Relier le déphasage entre les deux ondes à la différence de chemin optique. Établir l'expression littérale de la différence de chemin optique entre les deux ondes. Exploiter la formule de Fresnel fournie pour décrire la répartition d'intensité lumineuse.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser et caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes.</b>

## Thème 2 : mouvements et interactions (1)

La partie 2.1 « **Description et paramétrage du mouvement d'un point** » vise notamment à mettre en place les principaux systèmes de coordonnées : cartésiennes, polaires, cylindriques et sphériques. Le but est de permettre aux étudiants de disposer d'outils efficaces pour décrire une grande variété de

mouvements de points. Pour atteindre cet objectif, il convient de les familiariser progressivement avec les projections et dérivations de vecteurs ainsi qu'avec l'algébrisation des grandeurs dans un contexte relevant de la physique. Enfin, cette partie est l'occasion de procéder à des analyses qualitatives des comportements cinématiques de systèmes réels assimilés à un point, notamment sur les exemples simples des mouvements rectilignes et circulaires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point</b>	
<b>Repérage dans l'espace et dans le temps</b> Espace et temps classiques. Notion de référentiel. Caractère relatif du mouvement. Caractère absolu des distances et des intervalles de temps.	Citer une situation où la description classique de l'espace ou du temps est prise en défaut.
<b>Cinématique du point</b> Description du mouvement d'un point. Vecteurs position, vitesse et accélération. Systèmes de coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques.	Exprimer à partir d'un schéma le déplacement élémentaire dans les différents systèmes de coordonnées, construire le trièdre local associé et en déduire géométriquement les composantes du vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes et cylindriques. Établir les expressions des composantes des vecteurs position, déplacement élémentaire, vitesse et accélération dans les seuls cas des coordonnées cartésiennes et cylindriques.
	Identifier les degrés de liberté d'un mouvement. Choisir un système de coordonnées adapté au problème.
Mouvement à vecteur accélération constant.	Exprimer le vecteur vitesse et le vecteur position en fonction du temps. Établir l'expression de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.
Mouvement circulaire uniforme et non uniforme.	Exprimer les composantes du vecteur position, du vecteur vitesse et du vecteur accélération en coordonnées polaires planes.
Repérage d'un point dont la trajectoire est connue. Vitesse et accélération dans le repère de Frenet pour une trajectoire plane.	Situer qualitativement la direction du vecteur vitesse et du vecteur accélération pour une trajectoire plane. Exploiter les liens entre les composantes du vecteur accélération, la courbure de la trajectoire, la norme du vecteur vitesse et sa variation temporelle.
	<b>Réaliser et exploiter quantitativement un enregistrement vidéo d'un mouvement : évolution temporelle des vecteurs vitesse et accélération.</b>

Dans la partie **2.2.** intitulée « **Lois de Newton** », on cherche d'abord à renforcer les compétences des étudiants relatives à la mise en équations d'un problème, qu'il s'agisse des étapes de bilans de forces ou de projection de la deuxième loi de Newton sur la base choisie. On cherche par ailleurs, sur l'exemple de quelques mouvements simples, à renforcer les compétences d'analyse qualitative d'une équation différentielle : stabilité des solutions, positions d'équilibre, type d'évolution, durée ou période typique d'évolution, etc. Cette pratique s'articule avec l'utilisation d'un langage de programmation pour

résoudre des équations différentielles. Enfin, il s'agit aussi de confronter les étudiants aux limites de validité de certains modèles de forces, et ainsi de donner toute leur importance aux étapes de modélisation et de validation d'un modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Lois de Newton</b>	
<b>Quantité de mouvement</b> Masse d'un système. Conservation de la masse pour système fermé.	Exploiter la conservation de la masse pour un système fermé.
Quantité de mouvement d'un point et d'un système de points. Lien avec la vitesse du centre de masse d'un système fermé.	Établir l'expression de la quantité de mouvement pour un système de deux points sous la forme : $\mathbf{p} = m\mathbf{v}(G)$ .
Première loi de Newton : principe d'inertie. Référentiels galiléens.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens.
Notion de force. Troisième loi de Newton.	Établir un bilan des forces sur un système ou sur plusieurs systèmes en interaction et en rendre compte sur un schéma.
Deuxième loi de Newton.	Déterminer les équations du mouvement d'un point matériel ou du centre de masse d'un système fermé dans un référentiel galiléen.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier une loi de force par exemple à l'aide d'un microcontrôleur.</b>
Force de gravitation. Modèle du champ de pesanteur uniforme au voisinage de la surface d'une planète. Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme.	Étudier le mouvement d'un système modélisé par un point matériel dans un champ de pesanteur uniforme en l'absence de frottement.
Modèles d'une force de frottement fluide. Influence de la résistance de l'air sur un mouvement de chute.	Exploiter, sans la résoudre analytiquement, une équation différentielle : analyse en ordres de grandeur, détermination de la vitesse limite, utilisation des résultats obtenus par simulation numérique. Écrire une équation adimensionnée.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides.</b>
Tension d'un fil. Pendule simple.	Établir l'équation du mouvement du pendule simple. Justifier l'analogie avec l'oscillateur harmonique dans le cadre de l'approximation linéaire.

La partie **2.3. « Approche énergétique du mouvement d'un point matériel »** vise à construire une démarche alternative et complémentaire pour l'étude d'une situation relevant de la mécanique – et plus généralement de la physique – fondée sur la conservation de certaines grandeurs – ici, l'énergie mécanique. Cette approche est l'occasion d'illustrer la capacité prédictive des analyses graphiques et numériques, par exemple pour pouvoir décrire un comportement à partir d'une représentation graphique de l'énergie potentielle dans le cas d'un mouvement conservatif.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel</b>	

<b>Puissance, travail et énergie cinétique</b> Puissance et travail d'une force dans un référentiel.	Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force.
Théorèmes de l'énergie cinétique et de la puissance cinétique dans un référentiel galiléen, dans le cas d'un système modélisé par un point matériel.	Utiliser le théorème approprié en fonction du contexte.
<b>Champ de force conservative et énergie potentielle</b> Énergie potentielle. Lien entre un champ de force conservative et l'énergie potentielle. Gradient.	Établir et citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur (champ uniforme), de l'énergie potentielle gravitationnelle (champ créé par un astre ponctuel), de l'énergie potentielle élastique. Déterminer l'expression d'une force à partir de l'énergie potentielle, l'expression du gradient étant fournie. Dédire qualitativement, en un point du graphe d'une fonction énergie potentielle, le sens et l'intensité de la force associée.
<b>Énergie mécanique</b> Énergie mécanique. Théorème de l'énergie mécanique. Mouvement conservatif.	Distinguer force conservative et force non conservative. Reconnaître les cas de conservation de l'énergie mécanique. Utiliser les conditions initiales.
Mouvement conservatif à une dimension.	Identifier sur un graphe d'énergie potentielle une barrière et un puits de potentiel. Dédire d'un graphe d'énergie potentielle le comportement qualitatif : trajectoire bornée ou non, mouvement périodique, positions de vitesse nulle.
Positions d'équilibre. Stabilité.	Dédire d'un graphe d'énergie potentielle l'existence de positions d'équilibre. Analyser qualitativement la nature, stable ou instable, de ces positions.
Petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre stable, approximation locale par un puits de potentiel harmonique.	Établir l'équation différentielle du mouvement au voisinage d'une position d'équilibre.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre numériquement une équation différentielle du deuxième ordre non-linéaire et faire apparaître l'effet des termes non-linéaires.

## Thème 4 : constitution et transformations de la matière (1)

### 4.1. Transformations de la matière

L'objectif de cette partie est d'amener les étudiants à mobiliser de manière autonome les notions et modèles pour décrire, au niveau macroscopique, un système physico-chimique et son évolution. Il convient que les problématiques abordées, les illustrations et les applications prennent largement appui sur des transformations chimiques rencontrées dans la vie courante, au laboratoire, en milieu industriel ou dans le monde du vivant.

Les concepts développés dans la partie **4.1.1. « Description d'un système et de son évolution vers un état final »** permettent d'envisager l'optimisation des transformations ou des analyses. L'étude quantitative de l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique, est réalisée à partir d'une modélisation par une seule réaction chimique symbolisée par une équation de réaction à laquelle est associée une constante thermodynamique d'équilibre. Il s'agit de prévoir le sens d'évolution de systèmes homogènes ou hétérogènes et de déterminer leur composition dans l'état final.

Les compétences relatives à cette partie du programme sont ensuite réinvesties au cours de l'année, plus particulièrement au second semestre lors des transformations en solution aqueuse, et en seconde année, notamment dans le cadre de la thermodynamique chimique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1.1. Description d'un système et de son évolution vers un état final</b>	
<b>Système physico-chimique</b> Espèces physico-chimiques.	Recenser les espèces physico-chimiques présentes dans un système.
Corps purs et mélanges : concentration en quantité de matière, fraction molaire, pression partielle. Composition d'un système physico-chimique Variables intensives et extensives.	Décrire la composition d'un système à l'aide des grandeurs physiques pertinentes.  Identifier le caractère extensif ou intensif d'une variable.
<b>Transformation chimique d'un système</b> Modélisation d'une transformation par une ou plusieurs réactions chimiques.	Écrire l'équation de la réaction (ou des réactions) qui modélise(nt) une transformation chimique donnée.
Équation de réaction ; constante thermodynamique d'équilibre.	<b>Déterminer une constante d'équilibre.</b>
Évolution d'un système lors d'une transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique : avancement, activité, quotient réactionnel, critère d'évolution.	Décrire qualitativement et quantitativement un système chimique dans l'état initial ou dans un état d'avancement quelconque. Exprimer l'activité d'une espèce chimique pure ou dans un mélange dans le cas de solutions aqueuses très diluées ou de mélanges de gaz parfaits avec référence à l'état standard. Exprimer le quotient réactionnel. Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique.
Composition chimique du système dans l'état final : état d'équilibre chimique, transformation totale.	Identifier un état d'équilibre chimique. Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique ou de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.  <u>Capacité numérique</u> : déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, l'état final d'un système, siège d'une transformation, modélisée par une réaction à partir des conditions initiales et valeur de la constante d'équilibre.

La partie **4.1.2. « Évolution temporelle d'un système chimique »** permet de dégager expérimentalement les facteurs cinétiques concentration et température. Cette mise en évidence est prolongée par les premières modélisations macroscopiques d'évolution des concentrations avec des lois

de vitesse d'ordre simple et d'influence de la température avec la loi d'Arrhenius.

Les déterminations d'ordre global ou apparent mettent en œuvre la méthode différentielle ou intégrale, et peuvent s'effectuer à l'aide de logiciels dédiés ou de programmes élaborés en langage de programmation, pour l'exploitation des mesures expérimentales dans le cadre d'un réacteur fermé parfaitement agité.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1.2. Évolution temporelle d'un système chimique</b>	
<p><b>Cinétique en réacteur fermé de composition uniforme</b>            Vitesses de consommation d'un réactif et de formation d'un produit.            Vitesse de réaction pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique supposée sans accumulation d'intermédiaires.</p>	<p>Relier la vitesse de réaction, dans les cas où elle est définie, à la vitesse de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit.</p>
<p>Lois de vitesse : réactions sans ordre, réactions avec ordre simple (0, 1, 2), ordre global, ordre apparent.            Temps de demi-vie d'un réactif, temps de demi-réaction.</p>	<p>Exprimer la loi de vitesse si la réaction chimique admet un ordre et déterminer la valeur de la constante cinétique à une température donnée.            Déterminer la vitesse de réaction à différentes dates en utilisant une méthode numérique ou graphique.            Déterminer un ordre de réaction à l'aide de la méthode différentielle ou à l'aide des temps de demi-réaction.            Confirmer la valeur d'un ordre par la méthode intégrale, en se limitant strictement à une décomposition d'ordre 0, 1 ou 2 d'un unique réactif, ou se ramenant à un tel cas par dégénérescence de l'ordre ou conditions initiales stœchiométriques.</p> <p><b>Établir une loi de vitesse à partir du suivi temporel d'une grandeur physique.</b></p>
<p>Loi d'Arrhenius ; énergie d'activation.</p>	<p>Déterminer la valeur de l'énergie d'activation d'une réaction chimique à partir de valeurs de la constante cinétique à différentes températures.</p> <p><b>Déterminer l'énergie d'activation d'une réaction chimique.</b></p>

## 4.2. Relations entre la structure des entités chimiques et les propriétés physiques macroscopiques

Décrivant la matière au niveau macroscopique par des espèces chimiques aux propriétés physiques et chimiques caractéristiques, le chimiste la modélise au niveau microscopique par des entités chimiques dont les structures électroniques et géométriques permettent d'interpréter et de prévoir ces propriétés.

La partie **4.2.1 « Structure des entités chimiques »** aborde l'étude de la constitution de la matière au niveau microscopique en s'appuyant sur le tableau périodique des éléments, outil essentiel du chimiste, dans l'objectif de développer progressivement les compétences relatives à l'utilisation des informations qu'il contient pour prévoir, dans cette partie, le nombre de liaisons d'un atome et la nature (polaire, ionique) des liaisons chimiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2.1 Structure des entités chimiques</b>	
<b>Modèle de la liaison covalente</b> Liaison covalente localisée. Schéma de Lewis d'une molécule ou d'un ion monoatomique ou d'un ion polyatomique pour les éléments des blocs s et p.	Citer les ordres de grandeur de longueurs et d'énergies de liaisons covalentes. Déterminer, pour les éléments des blocs s et p, le nombre d'électrons de valence d'un atome à partir de la position de l'élément dans le tableau périodique. Établir un schéma de Lewis pertinent pour une molécule ou un ion. Identifier les écarts à la règle de l'octet.
<b>Géométrie et polarité des entités chimiques</b> Électronégativité : liaison polarisée, moment dipolaire, molécule polaire.	Associer qualitativement la géométrie d'une entité à une minimisation de son énergie. Comparer les électronégativités de deux atomes à partir de données ou de leurs positions dans le tableau périodique. Prévoir la polarisation d'une liaison à partir des électronégativités comparées des deux atomes mis en jeu. Relier l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent à la structure géométrique donnée d'une molécule. Déterminer direction et sens du vecteur moment dipolaire d'une liaison ou d'une molécule de géométrie donnée.

**La partie 4.2.2. « Relations structure des entités - propriétés physiques macroscopiques »** a pour objectif de permettre l'identification des interactions entre entités moléculaires ou ioniques afin d'interpréter, de prévoir ou de comparer certaines propriétés physiques : température de changement d'état, miscibilité, solubilité.

De nombreuses illustrations et applications dans la vie courante, au niveau du laboratoire ou dans le domaine du vivant peuvent être proposées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2.2. Relations structure des entités - propriétés physiques macroscopiques</b>	
<b>Interaction entre entités</b> Interactions de van der Waals. Liaison hydrogène ou interaction par pont hydrogène.	Citer les ordres de grandeur énergétiques des interactions de van der Waals et de liaisons hydrogène. Interpréter l'évolution de températures de changement d'état de corps purs moléculaires à l'aide de l'existence d'interactions de van der Waals ou par pont hydrogène.



**Solubilité ; miscibilité.**

Grandeurs caractéristiques et propriétés de solvants moléculaires : moment dipolaire, permittivité relative, caractère protogène. Mise en solution d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.

Associer une propriété d'un solvant moléculaire à une ou des grandeurs caractéristiques. Interpréter la miscibilité ou la non-miscibilité de deux solvants. Interpréter la solubilité d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.

**B. Second semestre****Thème 2 : mouvements et interactions (2)**

Au second semestre, le thème « **Mouvements et interactions** » est structuré en quatre parties : mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires ; moment cinétique ; mouvements dans un champ de force centrale conservatif et mouvement d'un solide. Pour les trois dernières parties, l'accent est porté sur les lois de conservation du moment cinétique, de l'énergie mécanique et de la quantité de mouvement comme outils d'étude des mouvements.

La partie 2.4. « **Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires** » introduit l'expression de la force de Lorentz ainsi que deux situations de base sur lesquelles les étudiants doivent être autonomes dans la résolution, attestant en cela de l'acquisition d'une certaine aisance à ce stade de leur formation. Des situations physiques variées sont en capacité d'illustrer concrètement cette partie qui ne doit pas se réduire à des développements calculatoires ou des illustrations graphiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.4. Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétostatique, uniformes et stationnaires</b>	
Force de Lorentz exercée sur une charge ponctuelle ; champs électrique et magnétique.	Évaluer les ordres de grandeur des forces électrique ou magnétique et les comparer à ceux des forces gravitationnelles.
Puissance de la force de Lorentz.	Justifier qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme.	Mettre en équation le mouvement et le caractériser comme un mouvement à vecteur accélération constant. Effectuer un bilan énergétique pour déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiel.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétostatique uniforme dans le cas où le vecteur vitesse initial est perpendiculaire au champ magnétostatique.	Déterminer le rayon de la trajectoire et le sens de parcours.

La partie **2.5. « Moment cinétique »** est l'occasion d'introduire les notions de moment cinétique et de moment d'une force. L'un des objectifs visés est que les étudiants disposent de représentations concrètes qui permettent de donner du sens aux grandeurs vectorielles et scalaires utilisées ; c'est notamment pour cela que le bras de levier est introduit. Comme souligné précédemment, l'accent est mis sur l'identification des situations où le moment cinétique est conservé.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.5. Moment cinétique</b>	
Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un point et par rapport à un axe orienté.	Relier la direction et le sens du vecteur moment cinétique aux caractéristiques du mouvement.
Moment cinétique d'un système discret de points par rapport à un axe orienté.	Utiliser le caractère algébrique du moment cinétique scalaire.
Moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté.	Exprimer le moment d'une force par rapport à un axe orienté en utilisant le bras de levier.
Théorème du moment cinétique en un point fixe dans un référentiel galiléen. Conservation du moment cinétique.	Identifier les cas de conservation du moment cinétique.

La partie **2.6. « Mouvements dans un champ de force centrale conservatif »** est notamment motivée par ses nombreuses applications possibles. On discute la nature de la trajectoire sur un graphe donnant l'énergie potentielle effective et, dans le cas d'un champ newtonien (lois de Kepler), on ne poursuit l'étude que dans le cas d'une trajectoire circulaire. Le caractère elliptique des trajectoires associées à un état lié est affirmé sans qu'aucune étude géométrique des ellipses ne soit prévue ; on utilise dans ce cas les constantes du mouvement (moment cinétique et énergie mécanique) pour exprimer l'énergie de la trajectoire elliptique en fonction du demi-grand axe.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.6. Mouvements dans un champ de force centrale conservatif</b>	
Point matériel soumis à un champ de force centrale.	Établir la conservation du moment cinétique à partir du théorème du moment cinétique. Établir les conséquences de la conservation du moment cinétique : mouvement plan, loi des aires.
<b>Point matériel soumis à un champ de force centrale conservatif</b> Conservation de l'énergie mécanique. Énergie potentielle effective. État lié et état de diffusion.	Exprimer l'énergie mécanique d'un système conservatif ponctuel à partir de l'équation du mouvement. Exprimer la conservation de l'énergie mécanique et construire une énergie potentielle effective. Décrire qualitativement le mouvement radial à l'aide de l'énergie potentielle effective. Relier le caractère borné du mouvement radial à la valeur de l'énergie mécanique.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, obtenir des trajectoires d'un point matériel soumis à un champ de force centrale conservatif.

<b>Cas particulier du champ newtonien</b> Lois de Kepler.	Énoncer les lois de Kepler pour les planètes et les transposer au cas des satellites terrestres.
Cas particulier du mouvement circulaire : satellite, planète.	Établir que le mouvement est uniforme et déterminer sa période. Établir la troisième loi de Kepler dans le cas particulier de la trajectoire circulaire. Exploiter sans démonstration sa généralisation au cas d'une trajectoire elliptique.
Énergie mécanique dans le cas du mouvement circulaire et dans le cas du mouvement elliptique.	Exprimer l'énergie mécanique pour le mouvement circulaire. Exprimer l'énergie mécanique pour le mouvement elliptique en fonction du demi-grand axe.
<b>Satellites terrestres</b> Satellites géostationnaire, de localisation et de navigation, météorologique.	Différencier les orbites des satellites terrestres en fonction de leurs missions. Déterminer l'altitude d'un satellite géostationnaire et justifier sa localisation dans le plan équatorial.

Concernant le solide en rotation autour d'un axe fixe dans la partie **2.7. « Mouvement d'un solide »**, il s'agit de définir le mouvement en remarquant que tout point du solide décrit un cercle autour de l'axe avec une même vitesse angulaire et de déterminer la vitesse de chaque point en fonction de celle-ci et de la distance à l'axe de rotation.

Des exemples de dynamique du solide sont introduits (translation et rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen), avec toutefois des limitations strictes : l'étude générale d'un mouvement composé d'une translation dans un référentiel galiléen et d'une rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel barycentrique ne figure pas au programme. L'étude du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe gardant une direction fixe dans un référentiel galiléen mais pour lequel l'axe de rotation est en mouvement est exclue. Cette partie se termine par l'étude d'un système déformable pour souligner le rôle des forces intérieures dans le bilan énergétique d'un système.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.7. Mouvement d'un solide</b>	
<b>Description du mouvement d'un solide dans deux cas particuliers</b> Définition d'un solide.	Différencier un solide d'un système déformable.
Translation.	Reconnaître et décrire une translation rectiligne ainsi qu'une translation circulaire.
Rotation autour d'un axe fixe.	Décrire la trajectoire d'un point quelconque du solide et exprimer sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.
<b>Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide mobile autour d'un axe fixe</b> Moment cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe : moment d'inertie.	Exploiter, pour un solide, la relation entre le moment cinétique scalaire, la vitesse angulaire de rotation et le moment d'inertie fourni. Relier qualitativement le moment d'inertie à la répartition des masses.
Couple.	Définir un couple.

Liaison pivot.	Définir une liaison pivot et justifier le moment qu'elle peut produire.
Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.	Exploiter le théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.
Pendule pesant.	Établir l'équation du mouvement. Établir une intégrale première du mouvement.  <b>Réaliser l'étude énergétique d'un pendule pesant et mettre en évidence une diminution de l'énergie mécanique.</b>  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, mettre en évidence le non isochronisme des oscillations.
<b>Approche énergétique du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté, dans un référentiel galiléen</b> Énergie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Utiliser l'expression de l'énergie cinétique, l'expression du moment d'inertie étant fournie.
Théorème de l'énergie cinétique pour un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Établir, dans ce cas, l'équivalence entre le théorème scalaire du moment cinétique et celui de l'énergie cinétique.
<b>Système déformable</b> Théorème de l'énergie cinétique pour un système déformable.	Prendre en compte le travail des forces intérieures. Utiliser sa nullité dans le cas d'un solide.  <b>Conduire le bilan énergétique du tabouret d'inertie.</b>

### Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts

Après avoir mis l'accent sur le passage fondamental d'une réalité microscopique à des grandeurs mesurables macroscopiques, cette partie propose, en s'appuyant sur des exemples concrets, de poursuivre la description et l'étude de la matière à l'échelle macroscopique, et d'aborder les deux principes fondamentaux de la thermodynamique. Les capacités identifiées doivent être introduites en s'appuyant dès que possible sur des dispositifs expérimentaux qui permettent ainsi leur acquisition progressive et authentique.

On utilise les notations suivantes : pour une grandeur extensive « A », « a » sera la grandeur massique associée et « A<sub>m</sub> » la grandeur molaire associée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre</b>	
Échelles microscopique, mésoscopique, et macroscopique. Libre parcours moyen.	Définir l'échelle mésoscopique et en expliquer la nécessité. Citer quelques ordres de grandeur de libres parcours moyens.

État microscopique et état macroscopique.	Préciser les paramètres nécessaires à la description d'un état microscopique et d'un état macroscopique sur un exemple.
Distribution des vitesses moléculaires d'un gaz (homogénéité et isotropie). Vitesse quadratique moyenne. Température cinétique. Exemple du gaz parfait monoatomique : $E_c = 3/2kT$ .	Calculer l'ordre de grandeur d'une vitesse quadratique moyenne dans un gaz parfait.
Système thermodynamique.	Identifier un système ouvert, un système fermé, un système isolé.
État d'équilibre d'un système soumis aux seules forces de pression. Pression, température, volume, équation d'état. Grandeur extensive, grandeur intensive. Exemples du gaz parfait et d'une phase condensée indilatable et incompressible.	Calculer une pression à partir d'une condition d'équilibre mécanique. Déduire une température d'une condition d'équilibre thermique. Citer quelques ordres de grandeur de volumes molaires ou massiques dans les conditions usuelles de pression et de température. Citer et utiliser l'équation d'état des gaz parfaits.
Énergie interne d'un système. Capacité thermique à volume constant dans le cas du gaz parfait.	Exprimer l'énergie interne d'un gaz parfait monoatomique à partir de l'interprétation microscopique de la température.  Exploiter la propriété $U_m = U_m(T)$ pour un gaz parfait.
Énergie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée considérée incompressible et indilatable.	Exploiter la propriété $U_m = U_m(T)$ pour une phase condensée incompressible et indilatable.
Approximation des phases condensées peu compressibles et peu dilatables.	Interpréter graphiquement la différence de compressibilité entre un liquide et un gaz à partir d'isothermes expérimentales.
Du gaz réel au gaz parfait.	Comparer le comportement d'un gaz réel au modèle du gaz parfait sur des réseaux d'isothermes expérimentales en coordonnées de Clapeyron ou d'Amagat.
Corps pur diphasé en équilibre. Diagramme de phases (P,T). Cas de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme de Clapeyron (P,v), titre en vapeur.	Analyser un diagramme de phase expérimental (P,T). Proposer un jeu de variables d'état suffisant pour caractériser l'état d'équilibre d'un corps pur diphasé soumis aux seules forces de pression. Positionner les phases dans les diagrammes (P,T) et (P,v). Déterminer la composition d'un mélange diphasé en un point d'un diagramme (P,v).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Énergie échangée par un système au cours d'une transformation</b>	
Transformation thermodynamique subie par un système. Évolutions isochore, isotherme, isobare, monobare, monotherme.	Définir un système adapté à une problématique donnée. Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final.
Travail des forces de pression. Transformations isochore, monobare.	Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron.
Transferts thermiques. Transformation adiabatique. Thermostat, transformations monotherme et isotherme.	Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement. Identifier dans une situation expérimentale le ou les systèmes modélisables par un thermostat.

Concernant les bilans d'énergie abordés dans la partie 3.3. « **Premier principe. Bilans d'énergie** », les expressions des fonctions d'état  $U_m(T, V_m)$  et  $H_m(T, P)$  sont données si le système ne relève pas du modèle gaz parfait ou du modèle de la phase condensée incompressible et indilatable.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.3. Premier principe. Bilans d'énergie</b>	
Premier principe de la thermodynamique.	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail et transfert thermique. Utiliser le premier principe de la thermodynamique entre deux états voisins. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne. Distinguer le statut de la variation de l'énergie interne du statut des termes d'échange. Calculer le transfert thermique sur un chemin donné connaissant le travail et la variation de l'énergie interne.
Enthalpie d'un système. Capacité thermique à pression constante dans le cas du gaz parfait et d'une phase condensée incompressible et indilatable.	Exprimer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final. Exprimer l'enthalpie $H_m(T)$ du gaz parfait à partir de l'énergie interne. Justifier que l'enthalpie $H_m$ d'une phase condensée peu compressible et peu dilatable peut être considérée comme une fonction de l'unique variable $T$ . Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.
Enthalpie associée à une transition de phase : enthalpie de fusion, enthalpie de vaporisation, enthalpie de sublimation.	Exploiter l'extensivité de l'enthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phases.

	<b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie de fusion, etc.).</b>
--	--

Concernant la partie **3.4. « Deuxième principe. Bilans d'entropie »**, l'expression de la fonction d'état entropie est systématiquement donnée et sa construction n'est pas une capacité visée. On cite sans aucun développement quantitatif son interprétation en termes de désordre statistique, de façon à faciliter une interprétation intuitive des bilans d'entropie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.4. Deuxième principe. Bilans d'entropie</b>	
Fonction d'état entropie.	Interpréter qualitativement l'entropie en termes de désordre statistique à l'aide de la formule de Boltzmann fournie.
Deuxième principe de la thermodynamique : entropie créée, entropie échangée. $\Delta S = S_{\text{ech}} + S_{\text{créé}}$ avec $S_{\text{ech}} = \sum Q_i / T_i$ .	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan entropique. Relier la création d'entropie à une ou plusieurs causes physiques de l'irréversibilité. Analyser le cas particulier d'un système en évolution adiabatique.
Variation d'entropie d'un système.	Utiliser l'expression fournie de la fonction d'état entropie. Exploiter l'extensivité de l'entropie.
Loi de Laplace.	Citer et utiliser la loi de Laplace et ses conditions d'application.
Cas particulier d'une transition de phase.	Citer et utiliser la relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie associées à une transition de phase : $\Delta h_{12}(T) = T \Delta s_{12}(T)$

Dans la partie **3.5. « Machines thermiques »**, l'enseignement de la thermodynamique est orienté vers des applications industrielles réelles et motivantes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.5. Machines thermiques</b>	
Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.	Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Définir un rendement ou une efficacité et les relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Justifier et utiliser le théorème de Carnot. Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération.  <b>Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.</b>

## Thème 1 : Onde et signaux (2)

La partie **1.7. « Induction et forces de Laplace »** s'appuie sur les nombreuses applications présentes dans notre environnement immédiat : boussole, moteur électrique, alternateur, transformateur, haut-parleur, plaques à induction, carte RFID... Il s'agit de restituer toute la richesse de ces applications dans un volume horaire modeste, ce qui limite les géométries envisagées et le formalisme utilisé. Le point de vue adopté cherche à mettre l'accent sur les phénomènes et sur la modélisation sommaire de leurs applications. Toute étude du champ électromoteur est exclue. L'induction et les forces de Laplace dans un circuit mobile sont introduites dans le cas d'un champ uniforme et stationnaire, soit dans le modèle des rails de Laplace, soit dans celui d'un cadre rectangulaire en rotation. Ce dernier modèle permet d'introduire la notion de dipôle magnétique et une analogie de comportement permet de l'étendre au cas de l'aiguille d'une boussole.

Le succès de cet enseignement suppose le respect de ces limitations : il ne s'agit pas d'une étude générale des phénomènes d'induction. Corrélativement, l'enseignement de cette partie doit impérativement s'appuyer sur une démarche expérimentale authentique, qu'il s'agisse d'expériences de cours ou d'activités expérimentales.

La partie **1.7.1 « Champ magnétique »** vise à relier le champ magnétique et ses sources ; l'accent est mis sur le concept de champ vectoriel, l'analyse des symétries et des invariances, l'exploitation des représentations graphiques et la connaissance d'ordres de grandeur.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.1. Champ magnétique</b>	
Sources de champ magnétique ; cartes de champ magnétique.	Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible et l'emplacement des sources. Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme. Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.
Symétries et invariances des distributions de courant.	Exploiter les propriétés de symétrie et d'invariance des sources pour prévoir des propriétés du champ créé.
Lien entre le champ magnétique et l'intensité du courant.	Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.
Moment magnétique.	Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. Associer à un aimant un moment magnétique par analogie avec une boucle de courant. Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

Dans la partie **1.7.2 « Actions d'un champ magnétique »**, l'enseignant est libre d'introduire la force de Laplace avec ou sans référence à la force de Lorentz. Il s'agit ici de se doter d'expressions opérationnelles pour étudier le mouvement dans un champ uniforme et stationnaire (soit d'une barre en translation, soit d'un moment magnétique en rotation modélisé par un cadre rectangulaire).



Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.2. Actions d'un champ magnétique</b>	
Densité linéique de la force de Laplace dans le cas d'un élément de courant filiforme.	Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.
Résultante et puissance des forces de Laplace.	Établir et citer l'expression de la résultante des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire. Exprimer la puissance des forces de Laplace.
Couple et puissance des actions mécaniques de Laplace dans le cas d'une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.	Établir et exploiter l'expression du moment du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique. Exprimer la puissance des actions mécaniques de Laplace.
Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.	<b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'action d'un champ magnétique uniforme sur une boussole.</b>
Effet moteur d'un champ magnétique tournant.	<b>Créer un champ magnétique tournant à l'aide de deux ou trois bobines et mettre en rotation une aiguille aimantée.</b>

La partie **1.7.3 « Lois de l'induction »** repose sur la loi de Faraday qui se prête parfaitement à une introduction expérimentale et qui constitue un bel exemple d'illustration de l'histoire des sciences. On évoque, à ce sujet, les différents points de vue possibles sur le même phénomène selon le référentiel dans lequel on se place.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.3. Lois de l'induction</b>	
<b>Flux d'un champ magnétique</b> Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
<b>Loi de Faraday</b> Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.	<b>Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.</b>
Loi de modulation de Lenz.	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Force électromotrice induite, loi de Faraday.	Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

La partie **1.7.4 « Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps »** aborde le phénomène d'auto-induction puis le couplage par mutuelle inductance entre deux circuits fixes. Elle traite du modèle du transformateur de tensions.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps</b>	

<b>Auto-induction</b> Flux propre et inductance propre.	Différencier le flux propre des flux extérieurs. Utiliser la loi de modération de Lenz. Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.
<b>Cas de deux bobines en interaction</b> Inductance mutuelle entre deux bobines.	Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale ».
Circuits électriques à une maille couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.	Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.
Transformateur de tension.	Établir la loi des tensions.
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.

La partie 1.7.5 « **Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire** » est centrée sur la conversion de puissance. Des situations géométriques simples permettent de dégager les paramètres physiques pertinents afin de modéliser le principe d'un moteur à courant continu ou un dispositif de freinage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7.5. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire</b>	
<b>Conversion de puissance mécanique en puissance électrique</b> Rail de Laplace. Spire rectangulaire soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et en rotation uniforme autour d'un axe fixe orthogonal au champ magnétique.	Interpréter qualitativement les phénomènes observés. Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Effectuer un bilan énergétique. Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
Freinage par induction.	Expliquer l'origine des courants de Foucault et en citer des exemples d'utilisation.
<b>Conversion de puissance électrique en puissance mécanique</b> Moteur à courant continu à entrefer plan.	<b>Mettre en évidence qualitativement les courants de Foucault.</b>  Analyser le fonctionnement du moteur à courant continu à entrefer plan en s'appuyant sur la configuration des rails de Laplace.

Citer des exemples d'utilisation du moteur à courant continu.
---

### Thème 4 : constitution et transformations de la matière (2)

Les modèles de description microscopique des solides sont présentés dans la partie 4.3. « **Structure et propriétés physiques des solides** » à partir de l'observation et des propriétés macroscopiques de différents solides cristallisés que l'enseignant est libre de choisir. L'introduction du modèle du cristal parfait se fait sur l'exemple de la maille cubique à faces centrées (CFC), seule maille dont la connaissance est exigible ; l'ensemble des notions associées à cette première étude est réinvesti pour étudier d'autres structures cristallines dont la constitution est alors fournie.

L'objectif principal de l'étude des cristaux métalliques, covalents et ioniques est d'aborder une nouvelle fois la notion de modèle : les allers-retours entre le niveau macroscopique (solides de différentes natures) et la modélisation microscopique (cristal parfait) permettent de montrer les limites du modèle du cristal parfait et de confronter les prédictions faites par ce modèle aux valeurs expérimentales mesurées sur le solide réel (distances internucléaires et interatomiques, masse volumique, etc). Ce chapitre constitue une occasion de revenir sur les positions relatives des éléments dans le tableau périodique, en lien avec la nature des interactions assurant la cohésion des édifices présentés, ainsi que sur les interactions intermoléculaires et la notion de solubilisation pour les solides ioniques et moléculaires. Une réflexion sur les modèles conduisant à la détermination des différents types de rayons à partir des méthodes expérimentales d'analyse des structures des solides peut être proposée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.3. Structure et propriétés physiques des solides</b>	
<b>Modèle du cristal parfait</b> Solide amorphe, solide cristallin, solide semi-cristallin ; variétés allotropiques.	<b>Illustrer l'influence des conditions expérimentales sur la formation de solides et de solides cristallins.</b>
Description du cristal parfait ; population, coordinence, compacité, masse volumique. Rayons métallique, covalent, de van der Waals ou ionique.	Décrire un cristal parfait comme un assemblage de mailles parallélépipédiques. Déterminer la population, la coordinence et la compacité pour une structure fournie. Déterminer la valeur de la masse volumique d'un matériau cristallisé selon une structure cristalline fournie. Relier le rayon métallique, covalent, de van der Waals ou ionique, selon le cas, aux paramètres d'une maille donnée.
Description des modèles d'empilement compact de sphères identiques.	Localiser les interstices tétraédriques et octaédriques entre les plans d'empilement.
Maille conventionnelle CFC et ses sites interstitiels.	Localiser, dénombrer les sites tétraédriques et octaédriques d'une maille CFC et déterminer leur habitabilité.
Limites du modèle du cristal parfait.	Confronter des données expérimentales aux prévisions du modèle.

<b>Métaux</b> Cohésion et propriétés physiques des métaux.	Positionner dans le tableau périodique et reconnaître les métaux et non métaux. Relier les caractéristiques de la liaison métallique (ordre de grandeur énergétique, non directionnalité) aux propriétés macroscopiques des métaux.
<b>Solides covalents et moléculaires</b> Cohésion et propriétés physiques des solides covalents et moléculaires.	Relier les caractéristiques des liaisons covalentes, des interactions de van der Waals et des interactions par pont hydrogène (directionnalité ou non, ordre de grandeur des énergies mises en jeu) et les propriétés macroscopiques des solides correspondants.
<b>Solides ioniques</b> Cohésion et propriétés physiques des solides ioniques.	Relier les caractéristiques de l'interaction ionique dans le cadre du modèle du solide ionique parfait (ordre de grandeur de l'énergie d'interaction, non directionnalité, charge localisée) avec les propriétés macroscopiques des solides ioniques.

#### 4.4. Transformations chimiques en solution aqueuse

Les transformations chimiques en solution aqueuse jouent un rôle essentiel en chimie, en biochimie, dans le domaine du vivant et dans les procédés industriels. Un nombre considérable de développements technologiques et d'analyses environnementales (traitement des eaux, méthodes d'analyse, extraction d'ions métalliques des minerais, générateurs électrochimiques, lutte contre la corrosion, etc.) repose sur des transformations acido-basiques, de solubilisation-précipitation et d'oxydo-réduction en solution aqueuse dont la maîtrise est importante pour prévoir, interpréter et optimiser les phénomènes mis en jeu.

L'objectif de cette partie est donc de présenter différents types de réactions susceptibles d'intervenir en solution aqueuse, d'en déduire des diagrammes de prédominance ou d'existence d'espèces chimiques, notamment des diagrammes potentiel-pH, et de les utiliser comme outil de prévision et d'interprétation des transformations chimiques quel que soit le milieu donné. Les conventions de tracé seront toujours précisées.

Les choix pédagogiques relatifs au contenu des séances de travail expérimental permettront de contextualiser ces enseignements. Les dosages par titrage sont étudiés exclusivement en travaux pratiques. L'analyse des conditions choisies ou la réflexion conduisant à une proposition de protocole expérimental pour atteindre un objectif donné constituent des mises en situation des enseignements évoqués précédemment. Ces séances de travail expérimental constituent une nouvelle occasion d'aborder qualité et précision de la mesure.

Les différentes transformations en solution aqueuse abordées dans la partie **4.4.1. « Réactions acide-base et de précipitation »** constituent des illustrations de l'évolution des systèmes chimiques introduites au premier semestre, les étudiants étant amenés à déterminer l'état final d'un système en transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique. On montrera qu'il est ainsi possible d'analyser et de simplifier une situation complexe pour parvenir à la décrire rigoureusement et quantitativement, en l'occurrence dans le cas des solutions aqueuses par une seule réaction. Il est cependant important de noter qu'on évite tout calcul inutile de concentration, en privilégiant l'utilisation des diagrammes pour valider le choix de la réaction mise en jeu. Dans ce cadre, aucune formule de calcul de pH n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4.1. Réactions acide-base et de précipitation</b>	
<p><b>Réactions acido-basiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante d'acidité ;</li> <li>- diagramme de prédominance, de distribution ;</li> <li>- exemples usuels d'acides et bases : nom, formule et nature – faible ou forte – des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, acétique, de la soude, l'ion hydrogénocarbonate, l'ammoniac.</li> </ul> <p><b>Réactions de dissolution ou de précipitation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante de l'équation de dissolution, produit de solubilité <math>K_s</math> ;</li> <li>- solubilité et condition de précipitation ;</li> <li>- domaine d'existence ;</li> <li>- facteurs influençant la solubilité.</li> </ul>	<p>Identifier le caractère acido-basique d'une réaction en solution aqueuse. Écrire l'équation de la réaction modélisant une transformation en solution aqueuse en tenant compte des caractéristiques du milieu réactionnel (nature des espèces chimiques en présence, pH...) et des observations expérimentales. Déterminer la valeur de la constante d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques sont connues. Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique. Prévoir l'état de saturation ou de non saturation d'une solution. Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires. Exploiter des courbes d'évolution de la solubilité d'un solide en fonction d'une variable.</p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction acide-base et une réaction de précipitation pour réaliser une analyse quantitative en solution aqueuse.</b></p> <p><b>Illustrer un procédé de retraitement, de recyclage, de séparation en solution aqueuse.</b></p>

L'analyse de transformations mettant en jeu des oxydants et réducteurs usuels et des piles permettent d'aborder, dans la partie **4.4.2. « Réactions d'oxydo-réduction »** les différents concepts associés aux phénomènes d'oxydo-réduction en solution aqueuse. La relation de Nernst (admise en première année) ainsi que la relation entre la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction et les potentiels standard permettent de prévoir l'évolution des systèmes et le caractère favorisé des transformations.

Afin de pouvoir étudier l'influence du milieu sur les espèces oxydantes ou réductrices présentes, les acquis sur les réactions acido-basiques et de précipitation-solubilisation en solution aqueuse sont réinvestis.

Enfin, les diagrammes potentiel-pH sont présentés puis superposés pour prévoir ou interpréter thermodynamiquement des transformations chimiques ; la confrontation avec la réalité amenant à aborder éventuellement des blocages cinétiques en lien avec l'évolution temporelle des systèmes étudiée au premier semestre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4.2. Réactions d'oxydo-réduction</b>	
<b>Oxydants et réducteurs, réactions d'oxydo-réduction</b> Nombre d'oxydation. Exemples d'oxydants et de réducteurs minéraux usuels : nom, nature et formule des ions thiosulfate, permanganate, hypochlorite, du peroxyde d'hydrogène.	Relier la position d'un élément dans le tableau périodique et le caractère oxydant ou réducteur du corps simple correspondant. Prévoir les nombres d'oxydation extrêmes d'un élément à partir de sa position dans le tableau périodique. Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple.
Pile, tension à vide, potentiel d'électrode, formule de Nernst, électrodes de référence.	Décrire le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode.
Diagrammes de prédominance ou d'existence.	Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.
Aspect thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction. Dismutation et médiamutation.	Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples.  <b>Mettre en œuvre une réaction d'oxydo-réduction pour réaliser une analyse quantitative en solution aqueuse.</b>  <b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement.</b>
<b>Diagrammes potentiel-pH</b> Principe de construction, lecture et utilisation d'un diagramme potentiel-pH.	Identifier les différents domaines d'un diagramme fourni associés à des espèces chimiques données. Déterminer la valeur de la pente d'une frontière dans un diagramme potentiel-pH. Justifier la position d'une frontière verticale. Prévoir le caractère thermodynamiquement favorisé ou non d'une transformation par superposition de diagrammes
Diagramme potentiel-pH de l'eau	Prévoir la stabilité des espèces dans l'eau. Prévoir une dismutation ou médiamutation en fonction du pH du milieu. Confronter les prévisions à des données expérimentales et interpréter d'éventuels écarts en termes cinétiques.  <b>Mettre en œuvre des réactions d'oxydo-réduction en s'appuyant sur l'utilisation de diagrammes potentiel-pH.</b>

	Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.
- <b>Risque chimique</b> Règles de sécurité au laboratoire. Classes et catégories de danger. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Mentions de danger (H) et conseils de prudence (P). Fiches de sécurité.	Relever les indications sur le risque associé au prélèvement, au mélange et au stockage des produits chimiques et adopter une attitude responsable lors de leur utilisation.
- <b>Risque électrique</b>	Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
- <b>Risque optique</b>	Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.
- <b>Risques liés à la pression et à la température</b>	Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.
<b>2. Prévention de l'impact environnemental</b> Traitement et rejet des espèces chimiques.	Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

## Contenus thématiques

Les contenus de la formation sont organisés autour de six thèmes.

### 1. Thermodynamique et mécanique des fluides appliquées aux machines thermiques

- 1.1. Éléments de statique des fluides dans un référentiel galiléen
- 1.2. Expression différentielle des principes de la thermodynamique
- 1.3. Diagrammes d'état des fluides réels purs
- 1.4. Description d'un fluide en écoulement stationnaire dans une conduite
- 1.5. Énergétique des fluides en écoulement dans une conduite
- 1.6. Thermodynamique industrielle
- 1.7. Transfert d'énergie par conduction thermique à une dimension en coordonnées cartésiennes.

### 2. Électronique

- 2.1. Stabilité des systèmes linéaires
- 2.2. Rétroaction
- 2.3. Oscillateurs
- 2.4. Électronique numérique

### 3. Optique ondulatoire

- 3.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021

<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>

Physique-chimie PT

- 3.2. Superposition d'ondes lumineuses
- 3.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young
- 3.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson

#### 4. Électromagnétisme

- 4.1. Électrostatique
- 4.2. Magnétostatique
- 4.3. Équations de Maxwell
- 4.4. Énergie du champ électromagnétique
- 4.5. Propagation

#### 5. Transformations chimiques de la matière : aspects thermodynamiques

- 5.1. Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques
- 5.2. Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques

#### 6. Aspects thermodynamique et cinétique de l'électrochimie

- 6.1. Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction
- 6.2. Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction : courbe courant-potentiel
- 6.3. Stockage et conversion d'énergie chimique dans des dispositifs électrochimiques
- 6.4. Corrosion humide et électrochimique

### 1. Thermodynamique et mécanique des fluides appliquées aux machines thermiques

Cette partie du programme de la classe de PT s'intéresse aux phénomènes liés à l'écoulement d'un fluide et à la conduction thermique dans les machines thermiques. Elle est essentiellement abordée à travers la mise en œuvre de bilans d'énergie. Elle prolonge le programme de thermodynamique de la classe de PTSI en introduisant le formalisme de la thermodynamique différentielle.

Les principes de la thermodynamique pour un système fermé sont repris sous forme infinitésimale. Les identités thermodynamiques sont introduites dans le but d'établir et de comprendre les allures des courbes dans les diagrammes thermodynamiques ; il ne s'agit pas de les exploiter pour retrouver les expressions des fonctions d'état, ces dernières devant toujours être fournies. L'application des deux principes aux fluides en écoulement stationnaire dans les systèmes ouverts conduit ensuite à l'analyse de quelques systèmes industriels.

On introduit également en classe de PT des notions de base de mécanique des fluides. L'objectif est de décrire les écoulements simples de fluides dans les machines thermiques en évoquant les phénomènes de perte de charge et le rôle de la viscosité. L'approche se fonde exclusivement sur la notion de bilan macroscopique : toute formulation locale de la mécanique des fluides, notamment à l'aide d'opérateurs vectoriels, est exclue. Enfin, on aborde la conduction thermique à l'aide de bilans infinitésimaux, la loi de Newton étant introduite pour faire le lien avec la thermodynamique industrielle.

La partie « **Éléments de statique des fluides dans un référentiel galiléen** » introduit sur le support concret de la statique des fluides le principe du découpage d'un domaine physique (volume, surface) en éléments infinitésimaux et la sommation d'une grandeur extensive (force) pour ce découpage. La poussée d'Archimède est présentée comme la résultante des forces de pression.



Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Éléments de statique des fluides dans un référentiel galiléen</b>	
Forces surfaciques, forces volumiques. Champ de pression.	Distinguer les forces de pression des forces de pesanteur.
Statique dans le champ de pesanteur uniforme.	Établir la relation entre la dérivée de la pression, la masse volumique, et le champ de pesanteur. Établir l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas d'un fluide incompressible et dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le cadre du modèle du gaz parfait. Comparer les variations de pression dans le cas de l'océan et de l'atmosphère.
Résultante de forces de pression. Poussée d'Archimède.	Exprimer la force de pression sur une surface élémentaire en fonction de la pression. Exprimer une surface élémentaire dans un système de coordonnées adapté. Utiliser les symétries pour déterminer la direction d'une résultante de forces de pression. Exprimer une résultante de forces de pression sur une paroi ou sur un objet immergé.

La partie « **Expression différentielle des principes de la thermodynamique** » présente les principes de la thermodynamique sous forme différentielle. Dans le but d'unifier la présentation en physique et en chimie, les identités thermodynamiques sont introduites dans le cas d'un système de composition variable. Toute étude générale de la notion de potentiel thermodynamique est hors-programme.

Pour une grandeur extensive  $A$ , on note  $a$  la grandeur massique associée et  $A_m$  la grandeur molaire associée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Expression différentielle des principes de la thermodynamique</b>	
Échelle mésoscopique, transformation infinitésimale.	Découper un système en sous-systèmes élémentaires. Découper une transformation finie en une succession de transformations infinitésimales.
Premier principe pour une transformation infinitésimale d'un système fermé. Deuxième principe pour une transformation infinitésimale d'un système fermé.	Appliquer les principes pour obtenir une équation différentielle relative au système considéré.
Potentiel thermodynamique. Fonction enthalpie libre $G$ .	Justifier que $G$ est un potentiel thermodynamique adapté à l'étude des transformations isothermes, isobares et spontanées.

Identités thermodynamiques pour un système fermé de composition variable. Potentiel chimique.	Citer les expressions des différentielles de U, H, G. Définir la température thermodynamique, la pression thermodynamique et le potentiel chimique. Distinguer les caractères intensif ou extensif des variables utilisées. Écrire les principes et les identités thermodynamiques par unité de masse du système. Exprimer l'enthalpie libre d'un système chimique en fonction des potentiels chimiques.
-----	-----
Système fermé de composition constante.	Exprimer les identités thermodynamiques.

L'étude des « **Diagrammes d'état des fluides réels purs** » est l'occasion de réinvestir les notions de thermodynamique différentielle. On y exploite également des diagrammes et tables de fluides réels afin d'habituer les étudiants à ne pas se limiter à des situations « idéales » (gaz parfait, etc.).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3. Diagrammes d'état des fluides réels purs</b>	
Notion de phase.	Définir et dénombrer les phases d'un système physico-chimique.
-----	-----
Évolution et équilibre d'un corps pur lors d'un changement d'état isotherme.	Écrire et utiliser les conditions d'évolution et d'équilibre en termes de potentiel chimique. Justifier le caractère isobare d'un changement d'état isotherme.
-----	-----
Enthalpie et entropie de changement d'état.	Citer l'ordre de grandeur de l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau. Calculer l'énergie récupérable par transfert thermique lors d'une liquéfaction isobare. Relier l'entropie de changement d'état à l'enthalpie de changement d'état.
-----	-----
Titre massique.	Utiliser la règle des moments.
-----	-----
Diagrammes de Clapeyron (P,v), entropique (T,s), de Mollier (h,s) et des frigoristes (log P,h).	Représenter, pour chaque diagramme, l'allure des courbes isothermes, isobares, isentropiques et isenthalpiques. Établir l'équation de ces courbes dans la limite du gaz parfait et dans celle du liquide incompressible et indilatable. Exploiter un diagramme pour déterminer la valeur d'une grandeur physique.
-----	-----
Tables thermodynamiques.	Exploiter les tables thermodynamiques pour calculer des grandeurs physiques dans le domaine diphasique, ou pour prévoir l'état physique d'un fluide.

La partie « **Description d'un fluide en écoulement stationnaire dans une conduite** » introduit le point de vue eulérien pour l'étude des écoulements. Il s'agit de décrire simplement un écoulement en identifiant des tubes de courant sur lesquels des bilans peuvent ensuite être effectués.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Description d'un fluide en écoulement stationnaire dans une conduite</b>	
Grandeurs eulériennes. Régime stationnaire.	Décrire localement les propriétés thermodynamiques et mécaniques d'un fluide à l'aide des grandeurs intensives pertinentes.
Lignes et tubes de courant. Débit massique.	Exprimer le débit massique. Exploiter la conservation du débit massique le long d'un tube de courant.
Débit volumique.	Justifier l'intérêt d'utiliser le débit volumique pour l'étude d'un fluide de volume massique uniforme en écoulement.
Écoulements laminaires et turbulents. Nombre de Reynolds.	Relier le régime d'écoulement au nombre de Reynolds.

Dans la partie « **Énergétique des fluides en écoulement dans une conduite** », on effectue des bilans énergétiques dans une conduite. On se place dans un premier temps dans le cadre de la dynamique des fluides parfaits. Toute utilisation de l'équation d'Euler ou de Navier-Stokes est exclue. La relation de Bernoulli est établie. Les pertes de charge dans les conduites sont ensuite prises en compte et, dans ce cadre, les étudiants sont initiés à la lecture d'abaques. Enfin, les transferts thermiques sont pris en compte afin d'exprimer les principes de la thermodynamique pour un système en écoulement.

<b>1.5. Énergétique des fluides en écoulement dans une conduite</b>	
Fluides parfaits. Fluides newtoniens : notion de viscosité.	Citer des ordres de grandeur de viscosité dynamique de gaz et de liquides (air, eau et lubrifiant). Relier l'expression de la force surfacique de cisaillement au profil de vitesse dans le cas d'un écoulement parallèle. Exploiter les conditions aux limites du champ de vitesse d'un fluide dans une conduite.
Relation de Bernoulli.	Définir un volume et une surface de contrôle. Établir et exploiter la relation de Bernoulli pour un écoulement parfait, incompressible en écoulement stationnaire.
Pertes de charges singulière et régulière. Bilan d'énergie.	Modifier la relation de Bernoulli afin de tenir compte de la dissipation d'énergie. Établir un bilan de puissance pour un circuit hydraulique ou pneumatique avec ou sans pompe.  <b>Mettre en évidence une perte de charge.</b>

Travail indiqué massique d'une machine.	Relier la notion de travail indiqué massique à la présence de parties mobiles.
Premier et deuxième principes pour un écoulement stationnaire unidimensionnel d'un système à une entrée et une sortie.	Établir et utiliser les premier et deuxième principes formulés avec des grandeurs massiques. Identifier les termes à négliger en fonction du contexte étudié. Relier l'entropie massique créée aux causes d'irréversibilité.
Systèmes à plusieurs entrées et sorties.	Exprimer la conservation du débit massique. Exprimer le premier principe en utilisant les puissances indiquée et thermique.

La partie « **Thermodynamique industrielle** » permet un approfondissement du cours de première année, par l'étude de cycles industriels. On se limite à des calculs relatifs au modèle du gaz parfait ou à l'utilisation des diagrammes d'état si le fluide est réel. Aucune connaissance relative à la technologie des installations ou aux différents types de cycles n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.6. Thermodynamique industrielle</b>	
<b>1.6.1. Étude de quelques dispositifs d'une installation industrielle</b>	
Compresseur et turbine calorifugés.	Établir et exploiter la variation d'enthalpie massique pour une transformation réversible. Établir et exploiter la variation d'enthalpie massique pour une transformation irréversible, le rendement isentropique étant défini et fourni.
Mélangeur et séparateur isobares calorifugés.	Établir et exploiter les relations entre enthalpies et débits massiques.
Échangeur thermique calorifugé.	Établir et exploiter la relation entre les puissances thermiques reçues par les deux écoulements.
Détendeur calorifugé (laminage).	Établir et exploiter la nature isenthalpique de la transformation.
Tuyère calorifugée.	Établir la relation entre la vitesse de sortie des gaz et la variation d'enthalpie.
<b>1.6.2. Cycles industriels</b>	

Moteurs, réfrigérateurs, pompes à chaleur.	<p>Repérer, pour une machine dont les éléments constitutifs sont donnés, les sources thermiques, le sens des échanges thermiques et mécaniques.</p> <p>Relier le fonctionnement d'une machine au sens de parcours du cycle dans un diagramme thermodynamique.</p> <p>Exploiter des diagrammes et des tables thermodynamiques pour déterminer les grandeurs thermodynamiques intéressantes.</p> <p>Définir et exprimer le rendement, l'efficacité ou le coefficient de performance de la machine.</p> <p>Citer des ordres de grandeur de puissances thermique et mécanique mises en jeu pour différentes tailles de dispositifs.</p> <p>Utiliser des documents ou des logiciels afin de discuter l'amélioration de cycles industriels : rôle du préchauffage, de la surchauffe, du choix du fluide.</p>
--	--

La partie « **Transfert d'énergie par conduction thermique à une dimension en coordonnées cartésiennes** » aborde l'étude de la conduction thermique dans les solides. On se limite à l'étude de problèmes à une dimension en coordonnées cartésiennes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7 Transfert d'énergie par conduction thermique à une dimension en coordonnées cartésiennes.</b>	
Vecteur densité de flux thermique.	Définir et algébriser le flux thermique échangé à travers une interface.
Loi de Fourier.	<p>Lier la non-uniformité de la température à l'existence d'un flux thermique et interpréter son sens.</p> <p>Utiliser la loi de Fourier.</p> <p>Citer des ordres de grandeur de conductivité thermique dans le domaine de l'habitat.</p>
Bilan d'énergie.	Établir l'équation différentielle entre la température et le vecteur densité de flux thermique.
Équation de la diffusion thermique sans terme source.	<p>Établir l'équation de la diffusion thermique.</p> <p>Interpréter qualitativement l'irréversibilité du phénomène.</p> <p>Relier le temps et la longueur caractéristiques d'un phénomène de diffusion au coefficient de diffusion thermique par une analyse dimensionnelle.</p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion thermique à une dimension par une méthode des différences finies dérivée de la</p>

	méthode d'Euler explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.
Analogie électrique dans le cas du régime stationnaire.	Définir la résistance thermique. Exploiter l'analogie lors d'un bilan thermique.
Loi de Newton.	Exploiter la loi de Newton fournie pour prendre en compte les échanges conducto-convectifs.

## 2. Électronique

Ce module renforce et complète l'étude des circuits électriques linéaires menée dans la partie « **Ondes et signaux** » du programme de première année. Ainsi, les notions de filtrage et d'analyse spectrale sont réinvesties, en particulier dans les activités expérimentales. Le programme de deuxième année ajoute la rétroaction et le bouclage des systèmes linéaires dans le but d'aborder la stabilité, les oscillateurs et la réalisation de filtres actifs.

Ces différentes thématiques sont illustrées à l'aide de l'amplificateur linéaire intégré (ALI) dont l'étude n'est pas une fin en soi mais un outil permettant des réalisations expérimentales variées. Par ailleurs, des exemples de manifestations des non-linéarités sont abordés à l'occasion de la saturation d'un amplificateur ou de la réalisation d'une fonction mémoire (comparateur à hystérésis).

Afin de compléter l'approche analogique des circuits électriques, un module à vocation expérimentale est consacré au traitement numérique des signaux à travers les sujets suivants :

- la conversion analogique numérique ;
- l'échantillonnage et le repliement de spectre ;
- le filtrage numérique.

La partie « **Stabilité des systèmes linéaires** » s'intéresse aux propriétés des systèmes linéaires déjà abordés en première année. Les capacités relatives au filtrage et à la décomposition harmonique d'un signal périodique sont reprises. L'étude est complétée par une analyse de la stabilité des systèmes du premier et du second ordre en examinant le régime transitoire associé à l'équation différentielle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1. Stabilité des systèmes linéaires</b>	
Fonction de transfert d'un système entrée-sortie linéaire continu et invariant.	Transposer la fonction de transfert opérationnelle dans les domaines fréquentiel (fonction de transfert harmonique) ou temporel (équation différentielle).
Stabilité.	Étudier la stabilité d'un système d'ordre 1 ou 2 à partir des signes des coefficients de l'équation différentielle ou de la fonction de transfert.

La partie « **Rétroaction** » illustre quelques propriétés relatives à la rétroaction sur l'exemple de l'amplificateur linéaire intégré. L'étude des circuits est strictement limitée à des situations pouvant être facilement abordées avec les outils introduits en première année (loi des mailles, loi des nœuds, diviseur de tension). La vitesse limite de balayage de l'ALI est évoquée en travaux pratiques afin d'identifier les distorsions harmoniques traduisant un comportement non

linéaire du système étudié. Les limitations associées aux courants de polarisation et la tension de décalage ne sont pas étudiées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Rétroaction</b>	
Modèle de l'ALI défini par des courants de polarisation nuls, une résistance de sortie nulle, une fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire, une saturation de la tension de sortie.	Citer les hypothèses du modèle et les ordres de grandeur du gain différentiel statique et du temps de réponse. Modéliser un ALI fonctionnant en régime linéaire à l'aide d'un schéma bloc.
Limites du modèle : vitesse limite de balayage, saturation de l'intensité du courant de sortie.	<b>Détecter, dans un montage à ALI, les manifestations de la vitesse limite de balayage et de la saturation de l'intensité du courant de sortie.</b>
Montages amplificateur non inverseur et comparateur à hystérésis.	Analyser la stabilité du régime linéaire. Établir la conservation du produit gain-bande passante du montage non inverseur.
ALI idéal de gain infini en régime linéaire.	Identifier la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse comme un indice de fonctionnement en régime linéaire. Établir la relation entrée-sortie des montages non inverseur, suiveur, inverseur, intégrateur. Déterminer les impédances d'entrée de ces montages. Expliquer l'intérêt, pour garantir leur fonctionnement lors de mises en cascade, de réaliser des filtres de tension, de forte impédance d'entrée et de faible impédance de sortie.
ALI idéal de gain infini en régime saturé.	Établir la relation entrée-sortie du comparateur simple. Associer, pour une entrée sinusoïdale, le caractère non-linéaire du système et la génération d'harmoniques en sortie. Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis. Définir le phénomène d'hystérésis en relation avec la notion de mémoire.

La partie « **Oscillateurs** » s'intéresse à une étude non exhaustive des oscillateurs en électronique. Les exemples sont choisis à l'initiative du professeur et les calculs des fonctions de transfert des filtres ne constituent pas un objectif de formation. En travaux pratiques, on complète l'étude par une analyse spectrale des signaux.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.3. Oscillateurs</b>	

Oscillateur quasi-sinusoïdal réalisé en bouclant un filtre du deuxième ordre avec un amplificateur.	<p>Exprimer les conditions théoriques (gain et fréquence) d'auto-oscillation sinusoïdale d'un système linéaire bouclé. Analyser, à partir de l'équation différentielle, l'inégalité que doit vérifier le gain de l'amplificateur afin d'assurer le démarrage des oscillations. Interpréter le rôle des non-linéarités dans la stabilisation de l'amplitude des oscillations.</p> <p><b>Mettre en œuvre un oscillateur quasi-sinusoïdal et analyser les spectres des signaux générés.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler l'évolution temporelle d'un signal généré par un oscillateur.</p>
Oscillateur de relaxation associant un intégrateur et un comparateur à hystérésis.	<p>Décrire les différentes séquences de fonctionnement. Exprimer les conditions de basculement. Déterminer l'expression de la période.</p>
Générateur de signaux non sinusoïdaux.	<p><b>Mettre en œuvre un oscillateur de relaxation et analyser les spectres des signaux générés.</b></p>

La partie « **Électronique numérique** » est étudiée de manière expérimentale et aborde la question du traitement numérique du signal dans le prolongement du programme de première année.

Le phénomène de repliement de spectre est expliqué qualitativement par exemple à l'aide d'une analogie stroboscopique, l'objectif étant de mettre en place la condition de Nyquist-Shannon et de réaliser convenablement une acquisition numérique en vue d'une analyse spectrale. Afin de mettre en évidence d'autres effets associés à l'échantillonnage, on réalise de manière comparative un filtre analogique passe-bas et un filtre numérique remplissant la même fonction. Ce dernier est réalisé à l'aide d'une chaîne de traitement : CAN, algorithme numérique, CNA. On étudie expérimentalement l'influence de la fréquence d'échantillonnage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.4. Électronique numérique</b>	
Échantillonnage.	<b>Mettre en évidence l'influence de la fréquence d'échantillonnage.</b>
Condition de Nyquist-Shannon.	<p>Utiliser la condition de Nyquist-Shannon.</p> <p><b>Mettre en évidence le phénomène de repliement de spectre dû à l'échantillonnage lors de l'utilisation d'un oscilloscope numérique ou d'une carte d'acquisition.</b></p>



Analyse spectrale numérique.	<b>Choisir les paramètres (durée, nombre d'échantillons, fréquence d'échantillonnage) d'une acquisition numérique afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon.</b>
Filtrage numérique.	<u>Capacité numérique</u> : réaliser, à l'aide d'un langage de programmation, un filtrage numérique passe-bas d'un signal issu d'une acquisition et mettre en évidence la limitation introduite par l'échantillonnage.

### 3. Optique ondulatoire

Le programme d'optique ondulatoire de la classe de PT s'inscrit dans le prolongement de la partie « **Propagation d'un signal** » du thème « **Ondes et signaux** » du programme de la classe de PTSI. Il s'agit pour les étudiants d'approfondir l'étude des phénomènes d'interférences lumineuses, conséquences de la nature ondulatoire de la lumière.

Si le formalisme utilisé permet une modélisation précise des phénomènes décrits, il convient néanmoins de privilégier les aspects expérimentaux et d'utiliser tous les supports de visualisation (expériences de cours, simulations, animations, etc.) pour aider les étudiants dans la construction de leurs représentations. L'enseignant peut souligner que ces phénomènes, étudiés dans le cadre de l'optique, sont généralisables à tout comportement ondulatoire. L'approche expérimentale est centrée sur la mise en œuvre des trous d'Young, de l'interféromètre de Michelson compensé (parallélisme compensatrice/séparatrice pré-réglé) et de dispositifs d'interférences à N ondes.

La partie « **Modèle scalaire des ondes lumineuses** » introduit les outils nécessaires pour décrire les phénomènes d'interférences. Le programme utilise le mot « intensité » pour décrire la grandeur détectée mais on peut utiliser indifféremment les mots « intensité » ou « éclaircissement » sans chercher à les distinguer à ce niveau. L'intensité lumineuse est introduite comme une puissance par unité de surface. Le théorème de Malus (orthogonalité des rayons de lumière et des surfaces d'ondes) est admis.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses</b>	
Modèle de propagation dans l'approximation de l'optique géométrique.	Utiliser une grandeur scalaire pour décrire un signal lumineux.
Chemin optique. Déphasage dû à la propagation. Surfaces d'ondes. Théorème de Malus (admis).	Exprimer le retard de phase en un point (par rapport à un autre) en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique.
Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	Associer une description de la formation des images en termes de rayon de lumière et de surfaces d'onde. Utiliser la propriété énonçant que le chemin optique séparant deux points conjugués est indépendant du rayon de lumière choisi.

Modèle d'émission. Relation (admise) entre le temps de cohérence et la largeur spectrale.	Citer l'ordre de grandeur du temps de cohérence $\Delta t$ de quelques sources de lumière. Utiliser la relation $\Delta f \cdot \Delta t \approx 1$ pour lier la durée des trains d'ondes et la largeur spectrale $\Delta \lambda$ de la source.
Détecteurs. Intensité lumineuse.	Relier l'intensité lumineuse à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire optique. Citer l'ordre de grandeur du temps d'intégration de quelques capteurs optiques.  <b>Mettre en œuvre une expérience utilisant un capteur photographique numérique.</b>

Dans la partie « **Superposition d'ondes lumineuses** », la formule de Fresnel, admise en classe de première année, est démontrée. L'étude de la superposition de N ondes cohérentes ne doit pas donner lieu à des développements calculatoires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Superposition d'ondes lumineuses</b>	
Superposition d'ondes incohérentes entre elles.	Justifier et exploiter l'additivité des intensités.
Superposition de deux ondes cohérentes entre elles : formule de Fresnel. Facteur de contraste.	Vérifier que les principales conditions pour que le phénomène d'interférences apparaisse (égalité des pulsations et déphasage constant dans le temps) sont réunies. Établir et exploiter la formule de Fresnel. Associer un bon contraste à des intensités voisines.
Superposition de N ondes cohérentes, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique. Réseau par transmission.	Établir l'expression de la différence de marche entre deux motifs consécutifs. Établir la relation fondamentale des réseaux liant la condition d'interférences constructives à la valeur de la différence de marche entre deux motifs consécutifs.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant un phénomène d'interférences à N ondes.</b> <b>Relier qualitativement le nombre de traits d'un réseau à la largeur des franges brillantes.</b>

Dans la partie « **Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young** », les trous d'Young permettent de confronter théorie et expérience. Les fentes d'Young peuvent être abordées mais de manière exclusivement expérimentale. Aucune connaissance sur un autre diviseur du front d'onde n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young</b>	
Trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source à distance finie et observation à grande distance finie. Ordre d'interférences.	Exprimer et utiliser l'ordre d'interférences.  <b>Mettre en œuvre une expérience d'interférences : trous d'Young ou fentes d'Young. Montrer la non-localisation des franges d'interférences.</b>
Franges d'interférences. Interfrange.	Justifier la forme des franges observées.
Variations de l'ordre d'interférences avec la position ou la longueur d'onde de la source ; perte de contraste par élargissement spatial ou spectral de la source.	Utiliser un critère de brouillage des franges pour interpréter des observations expérimentales.

Dans la partie « **Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson** », l'étude de l'interféromètre de Michelson en lame d'air permet de confronter théorie et expérience. L'étude de l'interféromètre de Michelson en coin d'air est abordée de manière exclusivement expérimentale. Pour la modélisation d'un interféromètre de Michelson, on suppose la séparatrice infiniment mince.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson</b>	
Interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (admise) des franges.	Citer les conditions d'éclairage et d'observation en lame d'air et en coin d'air.
Lame d'air : franges d'égale inclinaison.	Établir et utiliser l'expression de l'ordre d'interférence en fonction de la longueur d'onde, de l'épaisseur de la lame d'air équivalente et de l'angle d'inclinaison des rayons.  <b>Régler un interféromètre de Michelson compensé pour une observation en lame d'air avec une source étendue à l'aide d'un protocole fourni. Mettre en œuvre un protocole pour accéder à l'ordre de grandeur de la longueur de cohérence d'une raie et à l'écart spectral d'un doublet à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</b>
Coin d'air : franges d'égale épaisseur.	Utiliser l'expression admise de la différence de marche en fonction de l'épaisseur.  <b>Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</b>

	<b>Interpréter qualitativement les observations en lumière blanche.</b>
--	---

#### 4. Électromagnétisme

Le programme d'électromagnétisme de la classe de PT s'inscrit dans le prolongement des parties « **Propagation d'un signal** » et « **Induction et forces de Laplace** » du thème « **Ondes et signaux** » du programme de PTSI. Il s'agit pour les étudiants de découvrir les lois locales et intégrales qui gouvernent les champs électrique et magnétique et des applications dans des domaines variés.

Si certaines notions ont été abordées en classe de première année de PTSI, le formalisme utilisé constitue bien souvent pour les étudiants une première découverte ; il convient pour l'enseignant d'être particulièrement attentif aux difficultés potentielles des étudiants et d'utiliser tous les outils de visualisation (expériences de cours, simulations, animations, etc.) pour aider les étudiants dans la construction de leurs représentations.

L'étude des champs électrostatique et magnétostatique est présentée en deux parties distinctes ; l'enseignant est libre, s'il le souhaite, de procéder à une présentation unifiée de la notion de champ statique. Pour les calculs de champs, l'accent est mis sur les situations à haut degré de symétrie qui permettent l'utilisation efficace des propriétés de flux ou de circulation. Les équations locales des champs statiques sont introduites comme cas particuliers des équations de Maxwell.

La loi de Biot et Savart et la notion de potentiel vecteur ne relèvent pas du programme. Les relations de passage relatives au champ électromagnétique peuvent être exploitées, mais doivent être systématiquement fournies en cas de besoin.

Après une présentation des équations de Maxwell et des aspects énergétiques, le programme analyse le phénomène de propagation d'une onde électromagnétique dans le vide, la structure des champs associés et la réflexion des ondes sur un conducteur parfait. La propagation dans les milieux est abordée en se limitant à l'étude d'une onde électromagnétique dans un milieu ohmique et dans un guide d'onde modélisé par deux plans infinis.

Les notions abordées la partie « **Électrostatique** » sont centrées sur les distributions de charges, le champ et le potentiel. Pour le champ électrique et le potentiel, on se limite aux expressions explicites dans le cas de charges ponctuelles et sous forme intégrale dans le cas de distributions continues.

L'accent est mis sur les propriétés intégrales du champ et sur le théorème de Gauss pour des situations présentant un haut degré de symétrie.

Des capacités sur la lecture des lignes de champ et des surfaces équipotentielles sont développées. Le condensateur plan est introduit mais l'étude des conducteurs en équilibre électrostatique ne relève pas du programme. Une approche énergétique est conduite dans le cas d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrique extérieur. Les analogies avec la gravitation sont centrées sur l'application du théorème de Gauss.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1. Électrostatique</b>	
Loi de Coulomb. Champ électrostatique. Principe de superposition.	Exprimer le champ électrostatique créé par une distribution discrète de charges. Citer quelques ordres de grandeur de champs électrostatiques.

Distributions continues de charges volumique, surfacique, linéique.	Décomposer une distribution en des distributions plus simples dans le but de calculer un champ électrostatique par superposition. Choisir un type de distribution continue adaptée à la situation modélisée. Justifier qualitativement le choix d'une modélisation d'une distribution de charges par une distribution infinie. Évaluer la charge totale d'une distribution continue dans des situations à géométries simples.
Symétries et invariances du champ électrostatique.	Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de charges. Identifier les invariances d'une distribution de charges. Exploiter les symétries et les invariances d'une distribution de charges pour caractériser le champ électrostatique créé.
Circulation du champ électrostatique. Potentiel électrostatique.	Relier le champ électrostatique au potentiel. Exprimer le potentiel créé par une distribution discrète de charges. Calculer un champ électrostatique à partir du potentiel, l'expression de l'opérateur gradient étant fournie dans le cas des coordonnées sphériques et cylindriques. Exprimer une différence de potentiel comme une circulation du champ électrostatique.
Flux du champ électrostatique. Théorème de Gauss.	Utiliser le théorème de Gauss pour déterminer le champ électrostatique créé par une distribution présentant un haut degré de symétrie.
Systèmes modélisés par une sphère, un cylindre infini et du plan infini.	Établir les expressions des champs électrostatiques créés en tout point de l'espace par une sphère uniformément chargée en volume, par un cylindre infini uniformément chargé en volume et par un plan infini uniformément chargé en surface. Établir et exploiter qu'à l'extérieur d'une distribution à symétrie sphérique, le champ électrostatique créé est le même que celui d'une charge ponctuelle concentrant la charge totale et placée au centre de la distribution.
Condensateur plan modélisé par la superposition de deux distributions surfaciques infinies de charges opposées.	Établir l'expression de la capacité d'un condensateur plan dans le vide.

Lignes de champ, tubes de champ, surfaces équipotentiels.	<p>Orienter les lignes de champ du champ électrostatique créé par une distribution de charges.</p> <p>Représenter les surfaces équipotentiels connaissant les lignes de champ et inversement.</p> <p>Associer, en dehors des sources, les variations de l'intensité du champ électrostatique à la position relative des lignes de champ.</p> <p>Vérifier qu'une carte de lignes de champ est compatible avec les symétries et les invariances d'une distribution.</p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, tracer quelques lignes de champ et lignes équipotentiels pour une distribution donnée.</p>
Énergie potentielle électrostatique d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrostatique extérieur.	Établir et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrostatique extérieur.
Champ de gravitation.	Utiliser le théorème de Gauss dans le cas de la gravitation.

L'étude de la magnétostatique menée dans la partie « **Magnétostatique** » s'appuie le plus possible sur les différents aspects qualitatifs et quantitatifs vus en première année de PTSI ; les étudiants sont donc déjà familiarisés avec le concept de champ magnétostatique. La loi de Biot et Savart n'est pas introduite ; l'utilisation de celle-ci pour calculer un champ magnétostatique est donc exclue.

Les distributions de courants surfaciques ne sont pas introduites à ce niveau du programme, elles le sont uniquement à l'occasion de la réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait.

On aborde les propriétés intégrales du champ et on utilise le théorème d'Ampère pour des calculs dans des cas présentant un haut degré de symétrie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2. Magnétostatique</b>	
Vecteur densité de courant volumique. Intensité du courant. Distributions de courant volumique et linéique.	Relier l'intensité du courant et le flux du vecteur densité de courant volumique.
Symétries et invariances des distributions de courant.	Exploiter les propriétés de symétrie et d'invariance des sources pour prévoir des propriétés du champ créé.

Propriétés de flux et de circulation. Théorème d'Ampère.	Identifier les situations pour lesquelles le champ magnétostatique peut être calculé à l'aide du théorème d'Ampère. Choisir un contour, une surface et les orienter pour appliquer le théorème d'Ampère en vue de déterminer l'expression d'un champ magnétique. Utiliser une méthode de superposition. Citer quelques ordres de grandeur de valeurs de champs magnétostatiques.
Modèles du fil rectiligne infini de section non nulle et du solénoïde infini.	Établir les expressions des champs magnétostatiques créés en tout point de l'espace par un fil rectiligne infini de section non nulle, parcouru par des courants uniformément répartis en volume, par un solénoïde infini en admettant que le champ est nul à l'extérieur.
Lignes de champ, tubes de champ.	Orienter les lignes de champ du champ magnétostatique créé par une distribution de courants. Associer les variations de l'intensité du champ magnétostatique à l'évolution de la position relative des lignes de champ. Vérifier qu'une carte de lignes de champ est compatible avec les symétries et les invariances d'une distribution.

Dans la partie « **Équations de Maxwell** », une vision cohérente des lois de l'électromagnétisme est présentée. Elle constitue une première approche quantitative du phénomène de propagation et permet également de revenir qualitativement sur l'induction étudiée en classe de première année de PTSI.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.3. Équations de Maxwell</b>	
Principe de la conservation de la charge : formulation locale.	Établir l'équation locale de la conservation de la charge dans le cas à une dimension. Citer l'équation locale de la conservation de la charge à l'aide de l'opérateur divergence.
Équations de Maxwell : formulations locale et intégrale.	Associer l'équation de Maxwell-Faraday à la loi de Faraday. Citer, utiliser et interpréter les équations de Maxwell sous forme intégrale. Relier qualitativement le couplage spatio-temporel entre champ électrique et champ magnétique au phénomène de propagation. Déduire l'équation locale de la conservation de la charge.

Équations de propagation des champs dans une région vide de charges et de courants.	Établir les équations de propagation à partir des équations de Maxwell.
Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) magnétique.	Simplifier les équations de Maxwell et l'équation de conservation de la charge dans le cadre de l'ARQS en admettant que les courants de déplacement sont négligeables.
Cas des champs statiques : équations locales.	Établir les lois locales des champs statiques à partir des équations de Maxwell.
Équation de Poisson et équation de Laplace de l'électrostatique.	Établir les équations de Poisson et de Laplace de l'électrostatique.

Dans la partie « **Énergie du champ électromagnétique** », on s'intéresse à l'aspect énergétique de l'électromagnétisme. Aucun modèle relatif à la loi d'Ohm locale n'est exigible ; l'accent est mis sur les échanges d'énergie entre la matière et le champ électromagnétique, sur l'utilisation du flux du vecteur de Poynting pour évaluer une puissance rayonnée à travers une surface et sur les bilans d'énergie et de puissance.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4. Énergie du champ électromagnétique</b>	
Densité volumique de force électromagnétique. Puissance volumique cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge.	Établir et utiliser l'expression de la puissance volumique cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge.
Loi d'Ohm locale ; effet Joule.	Analyser les aspects énergétiques dans le cas particulier d'un milieu ohmique.
Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting : bilan d'énergie.	Utiliser le flux du vecteur de Poynting à travers une surface orientée pour évaluer la puissance rayonnée. Effectuer un bilan d'énergie sous forme locale et intégrale. Interpréter chaque terme de l'équation locale de Poynting, celle-ci étant donnée.

La partie « **Propagation** », articulée autour des ondes électromagnétiques, est l'occasion d'illustrer l'efficacité du formalisme local des équations de Maxwell en insistant sur les aspects qualitatifs et sur la variété des applications qui en découlent.

Si le modèle de l'onde plane est présenté dans le cadre de l'espace vide de courant et de charge, l'étude des ondes électromagnétiques dans un milieu ohmique permet d'enrichir les compétences des étudiants sur les phénomènes de propagation en abordant l'effet de peau. La réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait et son confinement dans une cavité permettent aux étudiants d'aborder la notion d'onde stationnaire et de découvrir des savoir-faire spécifiques permettant leur étude efficace. La notion de densité de courant surfacique est introduite, mais le calcul de l'intensité à travers un segment ne relève pas du programme.



Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.5. Propagation</b>	
Onde plane dans l'espace vide de charge et de courant ; onde plane progressive et aspects énergétiques.	Citer les solutions de l'équation de d'Alembert à une dimension. Décrire la structure d'une onde plane et d'une onde plane progressive dans l'espace vide de charge et de courant.
Onde plane progressive monochromatique.	Expliquer le caractère idéal du modèle de l'onde plane monochromatique. Citer les domaines du spectre des ondes électromagnétiques et leur associer des applications. Exprimer le vecteur de Poynting et l'énergie électromagnétique volumique associés à une onde plane progressive monochromatique. Effectuer une étude énergétique dans le cas d'une onde plane progressive
États de polarisation d'une onde plane progressive et monochromatique : polarisation rectiligne. Polariseurs.	Reconnaître une onde plane polarisée rectilignement.  <b>Mettre en évidence une polarisation rectiligne.</b>
Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu ohmique dans le cadre de l'ARQS magnétique. Effet de peau.	Établir et interpréter l'expression de la grandeur caractéristique d'atténuation de l'onde électromagnétique dans un milieu ohmique.
Réflexion sous incidence normale d'une onde plane, progressive et monochromatique polarisée rectilignement sur un plan conducteur parfait. Onde stationnaire.	Exploiter la nullité (admise) des champs dans un métal parfait. Établir l'expression de l'onde réfléchie en exploitant les relations de passage fournies. Interpréter qualitativement la présence de courants localisés en surface. Caractériser une onde stationnaire.
Applications aux cavités à une dimension. Modes d'onde stationnaire.	Établir la condition de quantification des solutions.  <b>Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique dans le domaine des ondes centimétriques.</b>

## 5. Transformations chimiques de la matière : aspects thermodynamiques

Les transformations chimiques de la matière ont été abordées en classe de PTSI ; le critère d'évolution spontanée d'un système chimique en transformation y a été présenté sans être démontré. Ce dernier a été remobilisé lors de l'étude des transformations chimiques en solution aqueuse.

Le but de cette partie est d'une part d'aborder les transferts thermiques et d'autre part d'établir puis exploiter le critère d'évolution spontanée d'un système engagé dans une transformation physico-chimique.

Dans la partie « **Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques** », l'étude des transferts thermiques, abordée en première année dans le cadre du cours de physique relatif aux transformations physiques du corps pur, est ici généralisée aux transformations physico-chimiques. Les enthalpies standard de réaction sont considérées comme indépendantes de la température.

Les notions et contenus sont illustrés à travers des applications liées à la vie quotidienne (contenu calorique des aliments, pouvoirs calorifiques des carburants, etc.), à la recherche (apports des techniques calorimétriques modernes, etc.) ou au domaine industriel.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.1. Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques</b>	
État standard. Enthalpie standard de réaction. Loi de Hess. Enthalpie standard de formation, état standard de référence d'un élément.	Déterminer l'enthalpie standard de réaction à l'aide de tables de données thermodynamiques. Associer le signe de l'enthalpie standard de réaction au caractère endothermique ou exothermique de la réaction.
Effets thermiques pour une transformation monobare : <ul style="list-style-type: none"> <li>- transfert thermique associé à la transformation chimique en réacteur monobare, isotherme ;</li> <li>- variation de température en réacteur adiabatique, monobare.</li> </ul>	Prévoir, à partir de données thermodynamiques, le sens et une estimation de la valeur du transfert thermique entre un système, siège d'une transformation physico-chimique, et le milieu extérieur. Évaluer la température atteinte par un système siège d'une transformation chimique supposée monobare et réalisée dans un réacteur adiabatique.  <u>Capacité numérique</u> : simuler, à l'aide d'un langage de programmation, l'évolution temporelle de la température pour un système siège d'une transformation adiabatique modélisée par une seule réaction chimique dont les caractéristiques cinétiques et l'enthalpie standard de réaction sont données.  <b>Déterminer une enthalpie standard de réaction.</b>

La fonction enthalpie libre  $G$  et la notion de potentiel chimique ont été introduites dans la partie « **Expression différentielle des principes de la thermodynamique** ». Dans la partie « **Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques** », on adopte pour les potentiels chimiques une expression générale :

$\mu_i = \mu_{i,\text{réf}} + RT \ln(a_i)$  qui fait référence aux activités  $a_i$  introduites en première année.

L'établissement de cette expression est hors programme. L'influence de la pression sur le potentiel chimique d'un constituant en phase condensée pure n'est pas abordée. On se limite aux cas d'une espèce chimique pure, d'une espèce en solution aqueuse très diluée et d'une espèce en mélange de gaz parfaits avec référence à l'état standard.

Pour le calcul des grandeurs standard de réaction, les enthalpies et entropies standard de réaction sont supposées indépendantes de la température en dehors des changements d'états. Les grandeurs standard de réaction permettent la détermination, à une température donnée, de la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre  $K^\circ$  caractéristique d'une réaction, valeur qui était systématiquement donnée en première année. C'est ainsi l'occasion de revenir sur la détermination de la composition d'un système physico-chimique en fin d'évolution.

La notion d'affinité chimique n'est pas utilisée, le sens d'évolution spontanée d'un système hors d'équilibre, à température et pression fixées, est déterminé par le signe de l'enthalpie libre de réaction  $\Delta_r G$ .

Enfin, l'étude de l'influence de la modification d'un paramètre (pression, température ou composition) sur un système chimique permet d'aborder la problématique de l'optimisation des conditions opératoires d'un procédé chimique.

Les illustrations et applications sont choisies dans le domaine industriel, dans la vie courante et au niveau du laboratoire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.2. Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques</b>	
Enthalpie standard de réaction, entropie standard de réaction et grandeurs standard associées. Relation entre enthalpie libre de réaction et quotient de réaction ; évolution d'un système chimique.	Justifier qualitativement ou prévoir le signe de l'enthalpie libre de réaction. Relier création d'entropie et enthalpie libre de réaction lors d'une transformation d'un système physico-chimique à pression et température fixées. Prévoir le sens d'évolution à pression et température fixées d'un système physico-chimique dans un état donné à l'aide de l'enthalpie libre de réaction. Déterminer les grandeurs standard de réaction à partir des tables de données thermodynamiques et de la loi de Hess. Déterminer les grandeurs standard de réaction d'une réaction dont l'équation est combinaison linéaire d'autres équations de réaction.

Constante thermodynamique d'équilibre ; relation de Van 't Hoff.	Citer et exploiter la relation de Van 't Hoff. Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à une température quelconque.  <b>Déterminer l'évolution de la valeur d'une constante thermodynamique d'équilibre en fonction de la température.</b>
État final d'un système : équilibre chimique ou transformation totale.	Déterminer la composition chimique d'un système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.
Optimisation thermodynamique d'un procédé chimique : - par modification de la valeur de $K^\circ$ ; - par modification de la valeur du quotient de réaction.	Identifier les paramètres d'influence et leur contrôle pour optimiser une synthèse ou minimiser la formation d'un produit secondaire indésirable.

## 6. Aspects thermodynamique et cinétique de l'électrochimie

Les aspects thermodynamiques et cinétiques des réactions d'oxydo-réduction sont appliqués notamment à la corrosion d'une part et aux dispositifs électrochimiques que sont les piles et les accumulateurs d'autre part. L'illustration des notions gagne à s'appuyer sur des applications concrètes comme par exemple la mise en œuvre de capteurs électrochimiques dans l'analyse de l'eau, de l'air ou d'effluents.

L'approche de l'électrochimie proposée privilégie les raisonnements qualitatifs et les aspects expérimentaux, plutôt que les développements théoriques et formels.

La partie « **Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction** » se fonde sur les acquis de première année relatifs à l'étude des réactions d'oxydo-réduction et des piles, ainsi que sur la partie de thermodynamique chimique de seconde année pour relier les grandeurs thermodynamiques aux potentiels et potentiels standard.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.1. Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction</b>	
Relation entre enthalpie libre de réaction et potentiels des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.	Citer et exploiter la relation entre l'enthalpie libre de réaction et les potentiels des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.
Relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard des couples impliqués.	Déterminer l'enthalpie libre standard d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples. Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple d'oxydo-réduction à partir de données thermodynamiques.

La partie « **Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction : courbe courant-potentiel** » se fonde sur les acquis de cinétique chimique de première année et les prolongent par le tracé et l'exploitation de courbes courant-potentiel.

Les courbes courant-potentiel, dont le tracé est proposé en capacité expérimentale, sont un outil essentiel dans la compréhension et la modélisation des systèmes électrochimiques.

L'écart entre le potentiel d'une électrode et son potentiel d'équilibre est appelé surpotentiel plutôt que surtension pour des raisons pédagogiques, en cohérence avec le vocabulaire anglo-saxon correspondant.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.2. Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction : courbe courant-potentiel</b>	
Courbes courant-potentiel sur une électrode en régime stationnaire : <ul style="list-style-type: none"> <li>- surpotentiel ;</li> <li>- systèmes rapides et systèmes lents ;</li> <li>- nature de l'électrode ;</li> <li>- courant de diffusion limite ;</li> <li>- vagues successives ;</li> <li>- domaine d'inertie électrochimique du solvant.</li> </ul>	Décrire le montage à trois électrodes permettant de tracer des courbes courant-potentiel. Relier vitesse de réaction électrochimique et intensité du courant. Identifier le caractère lent ou rapide d'un système à partir des courbes courant-potentiel. Identifier les espèces électroactives pouvant donner lieu à une limitation en courant par diffusion. Relier qualitativement ou quantitativement, à partir de relevés expérimentaux, l'intensité du courant de diffusion limite à la concentration du réactif et à la surface immergée de l'électrode. Tracer l'allure de courbes courant-potentiel de branches d'oxydation ou de réduction à partir de données fournies, de potentiels standard, concentrations et surpotentiels.  <b>Tracer et exploiter des courbes courant-potentiel.</b>

La partie « **Stockage et conversion d'énergie dans des dispositifs électrochimiques** » s'appuie sur les courbes courant-potentiel pour étudier le fonctionnement des piles et leur recharge, ainsi que les électrolyseurs. Ces courbes permettent de déterminer différentes caractéristiques : réactions aux électrodes, tension à vide, tension à imposer pour une recharge, etc.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.3. Stockage et conversion d'énergie chimique dans des dispositifs électrochimiques</b>	
<b>Conversion d'énergie chimique en énergie électrique : fonctionnement des piles.</b>  Transformations spontanées et réaction modélisant le fonctionnement d'une pile électrochimique.	Établir l'inégalité reliant la variation d'enthalpie libre et le travail électrique.

	Relier la tension à vide d'une pile et l'enthalpie libre de la réaction modélisant son fonctionnement. Déterminer la capacité électrique d'une pile.
Courbes courant-potentiel et fonctionnement d'une pile électrochimique.	Exploiter les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'une pile électrochimique et tracer sa caractéristique. Citer les paramètres influençant la résistance interne d'une pile électrochimique.
<b>Conversion d'énergie électrique en énergie chimique.</b>  Transformations forcées lors d'une électrolyse et de la recharge d'un accumulateur.	Exploiter les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'un électrolyseur et prévoir la valeur de la tension minimale à imposer. Exploiter les courbes courant-potentiel pour justifier les contraintes (purification de la solution électrolytique, choix des électrodes) dans la recharge d'un accumulateur. Déterminer la masse de produit formé pour une durée et des conditions données d'électrolyse. Déterminer un rendement faradique à partir d'informations fournies concernant le dispositif étudié.
Stockage et conversion d'énergie chimique.	<b>Étudier le fonctionnement d'une pile ou d'un électrolyseur pour effectuer des bilans de matière et des bilans électriques.</b>

La lutte contre la corrosion est un enjeu économique actuel et la compréhension des phénomènes de corrosion et des facteurs influençant cette corrosion est essentielle pour effectuer des choix de méthodes de protection. La partie « **Corrosion humide ou électrochimique** » exploite les courbes courant-potentiel pour interpréter les phénomènes de corrosion, de protection et de passivation. On se limite à la corrosion uniforme et à la corrosion galvanique de deux métaux en contact. Les tracés de diagrammes de Tafel ou d'Evans sont hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.4. Corrosion humide ou électrochimique</b>	
Corrosion uniforme en milieu acide ou en milieu neutre oxygéné : potentiel de corrosion, courant de corrosion. Corrosion d'un système de deux métaux en contact.	Positionner un potentiel de corrosion sur un tracé de courbes courant-potentiel. Interpréter le phénomène de corrosion uniforme d'un métal ou de deux métaux en contact en utilisant des courbes courant-potentiel ou d'autres données

	expérimentales, thermodynamiques et cinétiques. Citer des facteurs favorisant la corrosion.
Protection contre la corrosion : - revêtement ; - anode sacrificielle ; - protection électrochimique par courant imposé.	Exploiter des tracés de courbes courant-potentiel pour expliquer qualitativement : - la qualité de la protection par un revêtement métallique ; - le fonctionnement d'une anode sacrificielle.
Passivation.	Interpréter le phénomène de passivation sur une courbe courant-potentiel.  <b>Mettre en évidence le phénomène de corrosion et de protection et les facteurs l'influençant.</b>

### Annexe 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en annexe 1 du programme de physique-chimie de PTSI. À elles deux, ces listes regroupent le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée. Une utilisation de matériel hors de ces listes lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une aide.

#### 1. Domaine optique

- Polariseur.
- Interféromètre de Michelson motorisé.
- Capteur photographique numérique.
- Spectromètre à fibre optique.

#### 2. Domaine électrique

- Oscilloscope numérique avec analyseur de spectre.
- Carte d'acquisition dont l'API est publiée.
- Microcontrôleur.
- Émetteur et récepteur dans le domaine des ondes centimétriques.

#### 3. Domaine de la chimie

- Calorimètre.
- Électrode de référence.
- Électrolyseur et électrodes.

### Annexe 2 : outils mathématiques

Les outils mathématiques dont la maîtrise est nécessaire à la mise en œuvre du programme de physique de la classe de PT sont d'une part ceux qui figurent dans l'annexe 2 du programme de la classe de PTSI et d'autre part ceux qui figurent dans la liste ci-dessous.

Le thème « analyse vectorielle » prolonge l'outil « gradient » abordé en première année, en introduisant de nouveaux opérateurs : seules les expressions des opérateurs en coordonnées cartésiennes sont exigibles. Les expressions des opérateurs en coordonnées cylindriques et

## Contenus thématiques

L'organisation des semestres est la suivante.

### Premier semestre

#### Thème 1 : ondes et signaux (1)

- 1.1. Propagation d'un signal
- 1.2. Formation des images
- 1.3. Signaux électriques dans l'ARQS
- 1.4. Circuit linéaire du premier ordre et oscillateurs libres

#### Thème 4 : constitution et transformations de la matière (1)

- 4.1. Molécules, ions et cristaux
- 4.2. Relations structure des entités - propriétés physiques macroscopiques
- 4.3. Transformations de la matière
- 4.4. Évolution temporelle d'un système chimique

#### Thème 2 : mouvements et interactions

- 2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point
- 2.2. Lois de Newton
- 2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel
- 2.4. Mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe

### Deuxième semestre

#### Thème 1 : ondes et signaux (2)

- 1.5. Oscillateurs forcés
- 1.6. Filtrage linéaire
- 1.7. Champ magnétique
- 1.8. Actions d'un champ magnétique
- 1.9. Lois de l'induction
- 1.10. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps
- 1.11. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire
- 1.12. Convertisseurs électromécaniques

#### Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts

- 3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre
- 3.2. Énergie échangée par un système au cours d'une transformation
- 3.3. Premier principe. Bilans d'énergie
- 3.4. Deuxième principe. Bilans d'entropie
- 3.5. Machines thermiques

#### Thème 4 : constitution et transformations de la matière (2)

- 4.5. Réactions acide-base et de précipitation
- 4.6. Réactions d'oxydo-réduction



## A. Premier semestre

### Thème 1 : ondes et signaux (1)

Dans la partie 1.1. « **Propagation d'un signal** », il est recommandé de s'appuyer sur l'approche expérimentale et sur des logiciels de simulation pour permettre aux étudiants de faire le lien entre l'observation physique des signaux qui se propagent et leurs représentations spatiales et temporelles. L'introduction de la somme de deux sinusoides à travers le phénomène d'interférences permet de faire ressortir le rôle essentiel que joue le déphasage entre deux signaux dans le signal résultant obtenu. L'approche de la diffraction est purement descriptive et expérimentale, et envisagée comme une propriété universelle des ondes ; l'objectif est notamment d'introduire l'approximation de l'optique géométrique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Propagation d'un signal</b>	
Signaux.	Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.
Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle linéaire non dispersive. Célérité, retard temporel.	Écrire les signaux sous la forme $f(x-ct)$ ou $g(x+ct)$ . Écrire les signaux sous la forme $f(t-x/c)$ ou $g(t+x/c)$ . Prévoir, dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle à position fixée, et l'évolution spatiale à un instant donné.
Onde progressive sinusoïdale : phase, double périodicité spatiale et temporelle.	Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustiques et électromagnétiques. Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.  <b>Mesurer la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale.</b>
Interférences entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence. Déphasage.	Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives.  <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser le phénomène d'interférences de deux ondes.</b>
Diffraction à l'infini.	Utiliser la relation $\theta \approx \lambda/d$ entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture.  <b>Choisir les conditions expérimentales permettant de mettre en évidence le phénomène de diffraction en optique ou en mécanique.</b>

La partie 1.2. « **Formation des images** » portant sur l'optique géométrique ne doit pas être enseignée ou évaluée pour elle-même mais avec comme objectifs principaux de servir de point d'appui pour des approches expérimentales en première année et pour l'étude de l'optique physique en deuxième année.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Formation des images</b>	

Lumière : aspects particulaire et ondulatoire. Énergie d'un photon.	Utiliser l'expression reliant l'énergie d'un photon à la fréquence.
<b>Sources lumineuses</b> Modèle de la source ponctuelle monochromatique.	Caractériser une source lumineuse par son spectre. Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
Indice d'un milieu transparent.	Établir la relation entre la longueur d'onde dans le vide et la longueur d'onde dans un milieu.
<b>Modèle de l'optique géométrique</b> Approximation de l'optique géométrique et modèle du rayon lumineux.	Définir le modèle de l'optique géométrique et indiquer ses limites.
Réflexion - Réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Établir la condition de réflexion totale.
<b>Conditions de l'approximation de Gauss et applications</b> Stigmatisme. Miroir plan.	Construire l'image d'un objet par un miroir plan, identifier sa nature réelle ou virtuelle.
Conditions de l'approximation de Gauss.	Énoncer les conditions permettant un stigmatisme approché et les relier aux caractéristiques d'un détecteur.
Lentilles minces. Formules de conjugaison et de grandissement transversal.	Utiliser les définitions et les propriétés du centre optique, des foyers, de la distance focale, de la vergence. Construire l'image d'un objet réel ou virtuel situé à distance finie ou infinie à l'aide des rayons lumineux, identifier sa nature réelle ou virtuelle. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal (de Descartes uniquement).  <b>Mettre en œuvre un dispositif optique d'utilisation courante modélisable à l'aide de deux lentilles.</b>
<b>Modèles de quelques dispositifs optiques</b> L'œil. Punctum proximum, punctum remotum.	Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur fixe. Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.
L'appareil photographique.	Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille mince et d'un capteur. Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné.  <b>Étudier l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image.</b>
La fibre optique à saut d'indice.	Établir les expressions du cône d'acceptance et de la dispersion intermodale d'une fibre à saut d'indice.

La partie **1.3. « Signaux électriques dans l'ARQS »** pose les bases nécessaires à l'étude des circuits dans l'Approximation des Régimes Quasi Stationnaires (ARQS). Si le programme se concentre sur l'étude des dipôles R, L et C, il est possible, lors des travaux pratiques, de faire appel à des composants intégrés ou non linéaires (filtres à capacité commutée, diodes, photorésistances, etc.) dès lors qu'aucune connaissance préalable n'est nécessaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3. Signaux électriques dans l'ARQS</b>	
Charge électrique, intensité du courant électrique. Potentiel, référence de potentiel, tension. Puissance.	Utiliser les ordres de grandeur des charges des électrons et des ions en vue de légitimer l'utilisation de grandeurs électriques continues. Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charge. Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence. Relier la loi des nœuds au postulat de la conservation de la charge. Utiliser la loi des nœuds et celle des mailles. Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur. Citer des ordres de grandeur des intensités, des tensions et des puissances dans différents domaines d'application.
Dipôles : résistances, condensateurs, bobines, sources décrites par un modèle linéaire.	Utiliser les relations entre l'intensité et la tension. Citer des ordres de grandeurs de valeurs de résistances, de capacités et d'inductances. Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance. Exprimer l'énergie stockée dans un condensateur ou dans une bobine. Modéliser une source en utilisant la représentation de Thévenin.
Association de deux résistances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente. Établir et exploiter les relations de diviseurs de tension ou de courant.
Résistance de sortie, résistance d'entrée.	Extraire des grandeurs électriques de la notice d'un appareil afin d'appréhender les conséquences de son utilisation sur le fonctionnement d'un circuit.  <b>Étudier l'influence des résistances d'entrée ou de sortie sur le signal délivré par un GBF sur la mesure effectuée par un oscilloscope ou un multimètre.</b>

La partie **1.4. « Circuit linéaire du premier ordre et oscillateurs libres »** aborde l'étude des circuits linéaires du premier et du second ordre en régime libre. Il s'agit avant tout de comprendre les principes des méthodes mises en œuvre et leur exploitation pour étudier l'effet d'un système linéaire sur un signal. Le choix est fait de présenter simultanément les oscillateurs électriques et mécaniques de manière à mettre l'accent sur les analogies formelles et comportementales.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Circuit linéaire du premier ordre et oscillateurs libres</b>	
Régime libre, réponse à un échelon de tension.	<p>Distinguer sur un relevé expérimental, le régime transitoire et le régime permanent d'un signal à la sortie d'un système du premier ordre soumis à un échelon de tension.</p> <p>Utiliser un modèle équivalent aux dipôles pour déterminer les grandeurs électriques en régime permanent.</p> <p>Interpréter et utiliser les continuités de la tension aux bornes d'un condensateur ou de l'intensité du courant traversant une bobine.</p> <p>Établir l'équation différentielle du premier ordre vérifiée par une grandeur électrique dans un circuit comportant une ou deux mailles.</p> <p>Déterminer la réponse temporelle dans le cas d'un régime libre ou d'un échelon de tension.</p> <p>Déterminer un ordre de grandeur de la durée d'un régime transitoire.</p> <p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un circuit linéaire du premier ordre et analyser ses caractéristiques. Confronter les résultats expérimentaux aux résultats d'un modèle.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : mettre en œuvre la méthode d'Euler à l'aide d'un langage de programmation pour simuler la réponse d'un système linéaire du premier ordre à une excitation de forme quelconque.</p>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique.
Oscillateur harmonique. Exemples du mouvement sans frottement d'une masse accrochée à un ressort linéaire sans masse, et du circuit LC.	<p>Établir et reconnaître l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique ; la résoudre compte tenu des conditions initiales.</p> <p>Caractériser l'évolution en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation.</p> <p>Déterminer, en s'appuyant sur des arguments physiques et une analyse dimensionnelle, la position d'équilibre et le mouvement d'une masse fixée à un ressort vertical.</p> <p>Réaliser le bilan énergétique du circuit LC.</p>
Oscillateur amorti. Exemples du mouvement amorti par frottement visqueux d'une masse accrochée à un ressort linéaire sans masse, et du circuit RLC.	<p>Analyser, sur des relevés expérimentaux, l'évolution de la forme des régimes transitoires en fonction des paramètres caractéristiques.</p> <p>Prévoir l'évolution du système à partir de considérations énergétiques.</p> <p>Écrire sous forme canonique l'équation différentielle afin d'identifier la pulsation propre et le facteur de qualité.</p>

	<p>Décrire la nature de la réponse en fonction du facteur de qualité. Établir l'expression de la réponse dans le cas d'un régime libre ou d'un système soumis à un échelon. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire, selon la valeur du facteur de qualité.</p> <p><b>Mettre en évidence la similitude des comportements des oscillateurs mécanique et électronique.</b></p> <p><b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un système linéaire du deuxième ordre et analyser ses caractéristiques.</b></p>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser le bilan énergétique du circuit RLC série.

### Thème 4 : Constitution et transformations de la matière (1)

Un des objectifs de la partie 4.1. « **Molécules, ions et cristaux** » est de proposer une représentation simple d'entités chimiques moléculaires à l'aide du modèle de Lewis. On peut montrer, sur quelques exemples, les limites du modèle de Lewis. Un deuxième objectif est de prévoir les éventuelles polarisations des liaisons dans une entité chimique et d'en déduire les moments dipolaires associés. Les notions sur les cristaux parfaits présents dans cette partie ne doivent conduire à aucun calcul de cristallographie, si ce n'est celui de la valeur de la masse volumique d'un cristal parfait.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1. Molécules, ions et cristaux</b>	
<p><b>Modèle de la liaison covalente</b> Liaison covalente localisée. Schéma de Lewis d'une molécule ou d'un ion monoatomique ou d'un ion polyatomique. Règle de l'octet.</p>	Établir un ou des schémas de Lewis pertinent(s) pour une molécule ou un ion constitué des éléments C, H, O et N.
<p><b>Géométrie et polarité des entités chimiques</b> Électronégativité : liaison polarisée, moment dipolaire, molécule polaire.</p>	<p>Associer qualitativement la géométrie d'une entité à une minimisation de son énergie. Comparer les électronégativités de deux atomes à partir de données ou de leurs positions dans le tableau périodique. Prévoir la polarisation d'une liaison à partir des électronégativités comparées des deux atomes mis en jeu. Relier l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent à la structure géométrique donnée d'une molécule. Déterminer direction et sens du vecteur moment dipolaire d'une liaison ou d'une molécule de géométrie donnée.</p>

Modèle du cristal parfait. Exemples de cristaux métalliques, ioniques et covalents.	Décrire un cristal parfait comme un assemblage de mailles parallélépipédiques. Déterminer la formule chimique qui représente un cristal parfait, sa structure étant donnée. Déterminer la valeur de la masse volumique d'un cristal parfait.  <b>Utiliser un logiciel ou des modèles cristallins pour visualiser des mailles et pour déterminer des paramètres géométriques.</b>
--	--

La partie **4.2. « Relations structure des entités - propriétés physiques macroscopiques »** a pour objectif de permettre l'identification des interactions entre entités moléculaires ou ioniques afin d'interpréter, de prévoir ou de comparer certaines propriétés physiques : température de changement d'état, miscibilité, solubilité dans l'eau.

De nombreuses illustrations et applications dans la vie courante, au niveau du laboratoire ou dans le domaine du vivant peuvent être proposées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2. Relations structure des entités - propriétés physiques macroscopiques</b>	
<b>Interaction entre entités</b> Interactions de van der Waals. Liaison hydrogène ou interaction par pont hydrogène.	Comparer les énergies de l'interaction de van der Waals, de la liaison hydrogène et de la liaison covalente. Interpréter l'évolution de températures de changement d'état de corps purs moléculaires à l'aide de l'existence d'interactions de van der Waals ou par pont hydrogène.
<b>Solubilité ; miscibilité</b> Grandeurs caractéristiques et propriétés de solvants moléculaires : moment dipolaire, caractère protogène. Mise en solution d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.	Interpréter la solubilité d'une espèce chimique moléculaire ou ionique dans l'eau.

L'objectif de la partie **4.3. « Transformations de la matière »** est d'amener les étudiants à mobiliser de manière autonome les notions et modèles pour décrire, au niveau macroscopique, un système physique ou physico-chimique et son évolution. Il convient que les problématiques abordées, les illustrations et les applications prennent largement appui sur des transformations chimiques rencontrées dans la vie courante, au laboratoire, en milieu industriel ou dans le monde du vivant.

Les concepts développés dans cette partie permettent d'envisager l'optimisation des transformations ou des analyses. L'étude quantitative de l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique, est réalisée à partir d'une modélisation par une seule réaction chimique symbolisée par une équation de réaction à laquelle est associée une constante thermodynamique d'équilibre. Il s'agit de prévoir le sens d'évolution de systèmes homogènes ou hétérogènes et de déterminer leur composition dans l'état final. Les compétences relatives à cette partie du programme sont ensuite réinvesties au cours de l'année, plus particulièrement au second semestre lors des transformations en solution aqueuse, et en seconde année, notamment dans le cadre de la thermodynamique chimique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.3. Transformations de la matière</b>	
Transformations physique, chimique, nucléaire.	Identifier la nature d'une transformation.

Transformations physiques. États de la matière : gaz, liquide, solide cristallin, solide amorphe et solide semi-cristallin. Notion de phase.	Identifier la nature d'une transformation physique.
<b>Système physico-chimique</b> Espèces physico-chimiques.	Recenser les espèces physico-chimiques présentes dans un système.
Corps purs et mélanges : concentrations en quantité de matière et en masse, fractions molaire et massique, pression partielle. Composition d'un système physico-chimique.	Décrire la composition d'un système à l'aide de grandeurs physiques pertinentes.
<b>Transformation chimique d'un système</b> Modélisation d'une transformation par une réaction chimique.	Écrire l'équation de la réaction qui modélise une transformation chimique donnée.
Équation de réaction, constante thermodynamique d'équilibre.	<b>Déterminer une constante thermodynamique d'équilibre.</b>
Évolution d'un système lors d'une transformation chimique modélisée par une réaction chimique unique : avancement, activité, quotient de réaction, critère d'évolution.	Décrire qualitativement et quantitativement un système chimique dans l'état initial ou dans un état d'avancement quelconque. Exprimer l'activité d'une espèce chimique pure ou dans un mélange dans le cas de solutions aqueuses très diluées ou de mélange de gaz parfaits avec référence à l'état standard. Exprimer le quotient de réaction. Prévoir le sens d'évolution spontanée d'un système chimique.
Composition chimique du système dans l'état final : état d'équilibre chimique, transformation totale.	Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.  <u>Capacité numérique</u> : déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, l'état final d'un système, siège d'une transformation, modélisée par une réaction chimique unique à partir des conditions initiales et de la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre.

La partie 4.4. « **Évolution temporelle d'un système chimique** » permet de dégager expérimentalement les facteurs cinétiques concentration et température. Cette mise en évidence est prolongée par les premières modélisations macroscopiques d'évolution des concentrations avec des lois de vitesse d'ordre simple et d'influence de la température avec la loi d'Arrhenius. Les déterminations d'ordre global ou apparent mettent en œuvre la méthode intégrale, et peuvent s'effectuer à l'aide de logiciels dédiés ou de programmes élaborés en langage de programmation, pour l'exploitation des mesures expérimentales dans le cadre d'un réacteur fermé parfaitement agité.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4. Évolution temporelle d'un système chimique</b>	

<p>Vitesses volumiques de consommation d'un réactif et de formation d'un produit. Vitesse de réaction pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p>	<p>Relier la vitesse de réaction à la vitesse volumique de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit.</p> <p><b>Déterminer l'influence d'une concentration sur la vitesse d'une réaction chimique.</b></p>
<p>Lois de vitesse : réactions sans ordre, réactions avec ordre simple (0, 1, 2), ordre global, ordre apparent. Temps de demi-réaction.</p>	<p>Exprimer, pour une transformation modélisée par une seule réaction chimique, la loi de vitesse si la réaction chimique admet un ordre. Déterminer la valeur de la constante de vitesse à une température donnée. Déterminer la vitesse de réaction à différentes dates en utilisant une méthode graphique. Déterminer un ordre de réaction à l'aide des temps de demi-réaction. Déterminer la valeur d'un ordre par la méthode intégrale, en se limitant à une décomposition d'ordre 0, 1 ou 2 d'un unique réactif, ou en se ramenant à un tel cas par dégénérescence de l'ordre ou conditions initiales stœchiométriques.</p> <p><b>Établir une loi de vitesse à partir du suivi temporel d'une grandeur physique.</b></p> <p><u>Capacité numérique</u> : mettre en œuvre la méthode d'Euler à l'aide d'un langage de programmation pour simuler l'évolution temporelle de la concentration des constituants.</p>
<p>Loi d'Arrhenius ; énergie d'activation</p>	<p>Déterminer la valeur de l'énergie d'activation d'une réaction chimique à partir de valeurs de la constante cinétique à différentes températures.</p> <p><b>Déterminer l'énergie d'activation d'une réaction chimique.</b></p>

## Thème 2 : mouvements et interactions

La partie 2.1. « **Description et paramétrage du mouvement d'un point** » vise notamment à mettre en place les principaux systèmes de coordonnées : cartésiennes, polaires et cylindriques. Le but est de permettre aux étudiants de disposer d'outils efficaces pour décrire une assez grande variété de mouvements de points. Pour atteindre cet objectif, il convient de les familiariser progressivement avec les projections et dérivations de vecteurs ainsi qu'avec l'algébrisation des grandeurs dans un contexte relevant de la physique. Enfin, cette partie est l'occasion de procéder à des analyses qualitatives des comportements cinématiques de systèmes réels décrits par un point, notamment sur les exemples simples des mouvements rectilignes et circulaires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1. Description et paramétrage du mouvement d'un point</b>	



<p><b>Cinématique du point</b> Espace et temps classiques. Notion de référentiel. Caractère relatif du mouvement. Description du mouvement d'un point. Vecteurs position, vitesse et accélération. Systèmes de coordonnées cartésiennes, polaires et cylindriques.</p>	<p>Utiliser les expressions des composantes des vecteurs position, vitesse et accélération dans le seul cas des coordonnées cartésiennes, polaires et cylindriques.</p>
	<p>Identifier les degrés de liberté d'un mouvement. Choisir un système de coordonnées adapté au problème posé. Construire le trièdre local associé au repérage d'un point.</p>
<p>Mouvement à vecteur accélération constant.</p>	<p>Exprimer les vecteurs position et vitesse en fonction du temps. Établir l'expression de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.</p>
<p>Mouvement circulaire uniforme et non uniforme.</p>	<p>Exprimer les composantes des vecteurs position, vitesse et accélération en coordonnées polaires. Exploiter les liens entre les composantes du vecteur accélération, la courbure de la trajectoire, la norme du vecteur vitesse et sa variation temporelle. Situer qualitativement la direction du vecteur accélération dans la concavité d'une trajectoire plane.</p>
	<p><b>Réaliser et exploiter quantitativement un enregistrement vidéo d'un mouvement : évolution temporelle des vecteurs vitesse et accélération.</b></p>

Dans la partie **2.2. « Lois de Newton »**, on cherche d'abord à renforcer les compétences des étudiants relatives à la mise en équations d'un problème, qu'il s'agisse des étapes de bilans de forces ou de projection de la deuxième loi de Newton sur la base choisie. On vise par ailleurs, sur l'exemple de quelques mouvements simples, à renforcer les compétences d'analyse qualitative d'une équation différentielle : stabilité des solutions, positions d'équilibre, type d'évolution, durée ou période typique d'évolution, etc. Cette pratique s'articule avec l'utilisation d'un langage de programmation pour résoudre des équations différentielles. Enfin, il s'agit aussi de sensibiliser les étudiants aux limites de validité de certains modèles, et ainsi de donner toute leur importance aux étapes de modélisation et de validation d'un modèle. On ne considère que des systèmes fermés. Concernant les satellites et les planètes, on se limite aux mouvements circulaires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Lois de Newton</b>	
Référentiel galiléen. Première loi de Newton.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens.
Notion de force. Troisième loi de Newton.	Établir un bilan des forces et en rendre compte sur un schéma.
Deuxième loi de Newton.	Déterminer les équations du mouvement d'un point matériel.

	<b>Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier une loi de force par exemple à l'aide d'un microcontrôleur.</b>
Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme en l'absence de frottement.	Mettre en équation le mouvement sans frottement d'un point matériel et le caractériser comme un mouvement à vecteur accélération constant.
Modèles d'une force de frottement fluide. Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme en présence de frottement fluide.	Exploiter, sans la résoudre analytiquement, une équation différentielle : analyse en ordres de grandeur, détermination de la vitesse limite, utilisation des résultats obtenus par simulation numérique.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides.</b>  <u>Capacité numérique</u> : tracer la trajectoire d'un point matériel dans le cas d'une chute en présence de frottements.
Tension d'un fil. Pendule simple.	Établir l'équation du mouvement du pendule simple. Justifier l'analogie avec l'oscillateur harmonique dans le cadre de l'approximation linéaire.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre numériquement l'équation différentielle du deuxième ordre non linéaire et mettre en évidence le non-isochronisme des oscillations.
Mouvement dans un champ de gravitation. Mouvements des satellites et des planètes. Orbites circulaires. Période de révolution. Lois de Kepler.	Établir et exploiter la troisième loi de Kepler dans le cas d'un mouvement circulaire.

La partie **2.3. « Approche énergétique du mouvement d'un point matériel »** vise à construire une démarche alternative et complémentaire pour l'étude d'une situation relevant de la mécanique – et plus généralement de la physique – fondée sur la conservation éventuelle de certaines grandeurs – ici, l'énergie mécanique. Cette approche est l'occasion d'illustrer la capacité prédictive des analyses graphiques et numériques, par exemple pour pouvoir décrire un comportement à partir d'une représentation graphique de l'énergie potentielle dans le cas d'un mouvement conservatif.

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<b>2.3. Approche énergétique du mouvement d'un point matériel.</b>	
<b>Puissance, travail et énergie cinétique</b> Travail élémentaire d'une force. Travail d'une force entre deux points. Puissance d'une force.	Déterminer le travail d'une force au cours d'un déplacement élémentaire. Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force.

Théorèmes de l'énergie cinétique et de la puissance cinétique dans un référentiel galiléen.	Utiliser le théorème approprié en fonction du contexte.
<b>Force conservative et énergie potentielle</b>	Distinguer force conservative et force non conservative. Établir et citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur (champ uniforme) et de l'énergie potentielle élastique.
<b>Énergie mécanique</b> Théorème de l'énergie mécanique. Mouvement conservatif.	Identifier les cas de conservation de l'énergie mécanique. Utiliser les conditions initiales.
Mouvement conservatif à une dimension.	Identifier sur un graphe d'énergie potentielle une barrière et un puits de potentiel. Dédire d'un graphe d'énergie potentielle le comportement qualitatif d'un système : trajectoire bornée ou non, mouvement périodique, positions de vitesse nulle.
Positions d'équilibre. Stabilité.	Dédire d'un graphe d'énergie potentielle l'existence de positions d'équilibre, et le caractère stable ou instable de ces positions.
Oscillateurs mécaniques.	Réaliser le bilan énergétique d'un oscillateur mécanique en absence, puis en présence, de frottement en régime libre.

Concernant la partie **2.4. « Mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe »**, il s'agit de définir le mouvement en remarquant que tout point du solide décrit un cercle autour de l'axe avec une même vitesse angulaire et de déterminer la vitesse de chaque point en fonction de celle-ci et de la distance à l'axe de rotation.

L'étude du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe gardant une direction fixe dans un référentiel galiléen mais pour lequel l'axe de rotation est en mouvement est exclue.

Cette partie se termine par l'étude d'un système déformable pour souligner le rôle des forces intérieures dans le bilan énergétique d'un système.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.4. Mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe</b>	
Définition d'un solide.	Différencier un solide d'un système déformable.
Rotation autour d'un axe fixe.	Décrire la trajectoire d'un point quelconque d'un solide en rotation autour d'un axe fixe et exprimer sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.
<b>Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide mobile autour d'un axe fixe</b> Moment cinétique scalaire d'un solide en rotation autour d'un axe. Moment d'inertie.	Exploiter la relation pour le solide entre le moment cinétique scalaire, la vitesse angulaire de rotation et le moment d'inertie fourni. Relier qualitativement le moment d'inertie à la répartition des masses.

Moment d'une force par rapport à un axe orienté.  Couple.	Exprimer le moment d'une force par rapport à un axe orienté, en privilégiant l'utilisation du bras de levier. Définir un couple de forces, le moment d'un couple.
Liaison pivot.	Définir une liaison pivot et justifier la valeur du moment qu'elle peut produire.
Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe orienté dans un référentiel galiléen.	Déterminer l'équation du mouvement, le moment d'inertie du solide par rapport à l'axe de rotation étant donné.
Pendule pesant.	Établir l'équation du mouvement. Établir une intégrale première du mouvement.
<b>Approche énergétique du mouvement d'un solide autour d'un axe fixe orienté, dans un référentiel galiléen</b> Énergie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Utiliser l'expression de l'énergie cinétique, le moment d'inertie étant fourni.
Théorème de l'énergie cinétique pour un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Établir, dans ce cas, l'équivalence entre le théorème scalaire du moment cinétique et celui de l'énergie cinétique.
<b>Système déformable</b> Théorème de l'énergie cinétique pour un système déformable.	Prendre en compte le travail des forces intérieures. Utiliser sa nullité dans le cas d'un solide. Réaliser le bilan énergétique du tabouret d'inertie.

## B. Second semestre

### Thème 1 : Ondes et signaux (2)

Le thème 1 « Ondes et signaux » traite, au second semestre, des oscillations forcées, du filtrage linéaire, de l'induction et de la conversion électromécanique. Il s'appuie sur les nombreuses applications présentes dans notre environnement immédiat : boussole, moteur électrique, alternateur, transformateur, haut-parleur, plaques à induction, carte RFID... Il s'agit de restituer toute la richesse de ces applications dans un volume horaire modeste, ce qui limite les géométries envisagées et le formalisme utilisé. Le point de vue adopté cherche à mettre l'accent sur les phénomènes et sur la modélisation de leurs applications. Toute étude du champ électromoteur est exclue. L'induction et les forces de Laplace dans un circuit mobile sont introduites dans le cas d'un champ uniforme et stationnaire, soit dans le modèle des rails de Laplace, soit dans celui d'un cadre rectangulaire en rotation. Ce dernier modèle permet d'introduire la notion de dipôle magnétique et une analogie de comportement permet de l'étendre au cas de l'aiguille d'une boussole. Le thème s'achève avec l'étude des convertisseurs électromécaniques les plus classiques.

Le succès de cet enseignement suppose le respect de ces limitations : il ne s'agit pas d'une étude générale des phénomènes d'induction. Corrélativement, l'enseignement de cette partie doit impérativement s'appuyer sur une démarche expérimentale authentique, qu'il s'agisse d'expériences de cours ou d'activités expérimentales.

La partie 1.5. « **Oscillateurs forcés** » prolonge l'étude faite au premier semestre sur les oscillateurs libres. Le choix est fait ici aussi de présenter simultanément les oscillateurs électriques et mécaniques de manière à mettre l'accent sur les analogies formelles et comportementales.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.5. Oscillateurs forcés</b>	
Impédances complexes.	Établir et citer l'impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine.
Association de deux impédances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux impédances par une impédance équivalente.
Oscillateur mécanique ou électrique soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance.	Utiliser la représentation complexe pour étudier le régime forcé. Relier l'acuité d'une résonance au facteur de qualité. Déterminer la pulsation propre et le facteur de qualité à partir de graphes expérimentaux d'amplitude et de phase.  <b>Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier le phénomène de résonance.</b>  <u>Capacité numérique</u> : mettre en évidence le rôle du facteur de qualité pour l'étude de la résonance en élongation ou en tension.

L'objectif principal de la partie 1.6. « **Filtrage linéaire** » n'est pas de former les étudiants aux aspects techniques des calculs des fonctions de transfert et des tracés de diagrammes de Bode mais de mettre l'accent sur l'interprétation des propriétés du signal de sortie connaissant celles du signal d'entrée et d'appréhender le rôle central de la linéarité des systèmes utilisés.

Notions et contenus	Capacités exigibles
---------------------	---------------------

<b>1.6. Filtrage linéaire</b>	
Signaux périodiques.	Identifier sur le spectre d'un signal périodique la composante continue, le fondamental et les harmoniques. Définir la valeur moyenne d'un signal et sa valeur efficace.
Fonction de transfert harmonique. Diagramme de Bode.	Prévoir le comportement d'un filtre en hautes et basses fréquences. Tracer le diagramme de Bode (amplitude et phase) associé à une fonction de transfert d'ordre 1. Utiliser une fonction de transfert donnée d'ordre 1 ou 2 (ou ses représentations graphiques) pour étudier la réponse d'un système linéaire à une excitation sinusoïdale, à une somme finie d'excitations sinusoïdales, à un signal périodique. Interpréter les zones rectilignes des diagrammes de Bode fournis d'après l'expression de la fonction de transfert.  <b>Mettre en œuvre un dispositif illustrant la fonction de filtrage d'un système linéaire.</b>
Modèles de filtres passifs : passe-bas et passe-haut d'ordre 1, passe-bas et passe-bande d'ordre 2.	Expliquer l'intérêt, pour garantir leur fonctionnement lors de mises en cascade, de réaliser des filtres de tension de faible impédance de sortie et forte impédance d'entrée. Expliquer la nature du filtrage introduit par un dispositif mécanique (sismomètre, amortisseur, accéléromètre, etc.).  <b>Étudier le filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal à partir d'une analyse spectrale.</b>  <u>Capacité numérique</u> : simuler, à l'aide d'un langage de programmation, l'action d'un filtre sur un signal périodique dont le spectre est fourni. Mettre en évidence l'influence des caractéristiques du filtre sur l'opération de filtrage.

La partie 1.7. « **Champ magnétique** » vise à relier le champ magnétique et ses sources ; l'accent est mis sur le concept de champ vectoriel, l'exploitation des représentations graphiques et la connaissance d'ordres de grandeur.

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<b>1.7. Champ magnétique</b>	

Sources de champ magnétique ; cartes de champ magnétique.	Exploiter une représentation graphique d'un champ vectoriel, identifier les zones de champ uniforme, de champ faible, et l'emplacement des sources. Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. Décrire un dispositif permettant de réaliser un champ magnétique quasi uniforme. Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans une machine électrique, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.
Lien entre le champ magnétique et l'intensité du courant.	Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies.
Moment magnétique.	Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. Associer un moment magnétique à un aimant, par analogie avec une boucle de courant. Citer un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.

Dans la partie 1.8. « **Actions d'un champ magnétique** », il s'agit de se doter d'expressions opérationnelles pour étudier un mouvement dans un champ uniforme et stationnaire : celui d'une barre en translation ou celui d'un moment magnétique en rotation modélisé par un cadre rectangulaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.8. Actions d'un champ magnétique</b>	
Résultante et puissance des forces de Laplace.	Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme. Établir et citer l'expression de la résultante des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice en translation rectiligne sur deux rails parallèles (rails de Laplace) placée dans un champ magnétique extérieur uniforme, stationnaire et orthogonal à la barre. Exprimer la puissance des forces de Laplace.
Couple et puissance des actions mécaniques de Laplace dans le cas d'une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.	Établir et exploiter l'expression du moment du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique. Exprimer la puissance des actions mécaniques de Laplace.
Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.	<b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour étudier l'action d'un champ magnétique uniforme sur une boussole.</b>

Effet moteur d'un champ magnétique tournant.

**Créer un champ magnétique tournant à l'aide de deux ou trois bobines et mettre en rotation une aiguille aimantée.**

La partie **1.9. « Lois de l'induction »** repose sur la loi de Faraday qui se prête parfaitement à une introduction expérimentale et qui constitue un bel exemple d'illustration de l'histoire des sciences. On évoque, à ce sujet, les différents points de vue possibles sur le même phénomène selon le référentiel dans lequel on se place.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.9. Lois de l'induction</b>	
<b>Flux d'un champ magnétique</b> Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
<b>Loi de Faraday</b> Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.	<b>Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.</b>
Loi de modulation de Lenz.	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Force électromotrice induite, loi de Faraday.	Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algèbrisation.

La partie **1.10. « Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps »** aborde le phénomène d'auto-induction puis le couplage par mutuelle inductance entre deux circuits fixes. Elle traite du modèle du transformateur de tension.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.10. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps</b>	
<b>Auto-induction</b> Flux propre et inductance propre.	Différencier le flux propre des flux extérieurs. Vérifier la compatibilité du signe de l'inductance propre avec la loi de modulation de Lenz. Évaluer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur, le champ magnétique créé par la bobine étant donné.  <b>Mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine.</b>
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.
<b>Cas de deux bobines en interaction</b> Inductance mutuelle entre deux bobines.	Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe, de grande longueur, en « influence totale », le champ magnétique créé par une bobine étant donné.



Circuits électriques à une maille couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.	Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.
Transformateur de tension parfait.	Établir la loi des tensions. Citer des applications du transformateur de tension pour le transport d'énergie électrique ou l'isolement.

La partie 1.11. « **Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire** » est centrée sur la conversion de puissance. Des situations géométriques simples permettent de dégager les paramètres physiques pertinents afin de modéliser le principe d'un moteur à courant continu ou un dispositif de freinage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.11. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire</b>	
<b>Conversion de puissance mécanique en puissance électrique</b>	Interpréter qualitativement les phénomènes créés lors du mouvement d'une barre sur des rails de Laplace et lors du mouvement d'une spire rectangulaire soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et en rotation uniforme autour d'un axe fixe orthogonal au champ magnétique. Établir les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Établir et interpréter la relation entre la puissance de la force de Laplace et la puissance électrique. Effectuer un bilan énergétique. Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.
Freinage par induction.	Expliquer l'origine des courants de Foucault et en citer des exemples d'utilisation.  <b>Mettre en évidence qualitativement les courants de Foucault.</b>
<b>Conversion de puissance électrique en puissance mécanique</b> Moteur à courant continu à entrefer plan.	Expliquer le principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu à entrefer plan en utilisant les forces de Laplace. Utiliser la relation entre la puissance de la force de Laplace et la puissance électrique. Effectuer un bilan énergétique.

La partie 1.12 « **Convertisseurs électromécaniques** » présente les convertisseurs de puissance les plus courants. Les principes de fonctionnement sont expliqués sans entrer dans le détail des réalisations technologiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.12. Convertisseurs électromécaniques</b>	

Moteur à courant continu.	Établir les relations reliant respectivement la vitesse de rotation à la force électromotrice et le couple à l'intensité du courant.
Machine synchrone.	Établir la condition d'existence d'un couple moyen non nul d'un moteur synchrone.
Machine asynchrone.	Établir l'expression du couple moyen du moteur asynchrone en fonction de la vitesse de rotation afin de mettre en évidence un fonctionnement moteur et un fonctionnement génératrice.
	Expliquer les avantages et inconvénients des différentes machines et donner des exemples d'utilisation.  <b>Modifier le fonctionnement des moteurs (vitesse ou couple) en agissant sur certains paramètres électriques.</b>

### Thème 3 : l'énergie : conversions et transferts

Après avoir mis l'accent sur le passage d'une réalité microscopique à des grandeurs mesurables macroscopiques, les parties **3.1. « Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre »** et **3.2 « Énergie échangée par un système au cours d'une transformation »** proposent, en s'appuyant sur des exemples concrets, de poursuivre la description et l'étude de la matière à l'échelle macroscopique, et d'aborder les deux principes fondamentaux de la thermodynamique. Les capacités identifiées doivent être introduites en s'appuyant dès que possible sur des dispositifs expérimentaux qui permettent ainsi leur acquisition progressive et authentique.

On utilise les notations suivantes : pour une grandeur extensive « A », « a » sera la grandeur massique associée et «  $A_m$  » la grandeur molaire associée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre</b>	
Échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique.	Définir l'échelle mésoscopique et en expliquer la nécessité.
Système thermodynamique.	Identifier un système ouvert, un système fermé, un système isolé.
État d'équilibre d'un système soumis aux seules forces de pression. Pression, température, volume : équation d'état. Grandeur extensive, grandeur intensive. Exemples du gaz parfait et d'une phase condensée indilatable et incompressible. Exemples d'un gaz réel aux faibles pressions et d'une phase condensée peu compressible et peu dilatable.	Calculer une pression à partir d'une condition d'équilibre mécanique. Déduire une température d'une condition d'équilibre thermique.  Utiliser l'équation d'état des gaz parfaits, l'interpréter à l'échelle microscopique. Comparer, à l'aide de réseaux d'isothermes expérimentales en coordonnées de Clapeyron ou d'Amagat, le comportement d'un gaz réel au modèle du gaz parfait. Citer quelques ordres de grandeur de volumes molaires ou massiques dans les conditions usuelles de pression et de température.

<p><b>Énergie interne d'un système</b> Énergie interne du gaz parfait monoatomique. Énergie interne des gaz parfaits polyatomiques. Capacité thermique à volume constant d'un gaz parfait.</p>	<p>Exprimer l'énergie interne d'un gaz parfait monoatomique en fonction de la température.</p> <p>Exploiter la propriété <math>U_m = U_m(T)</math> pour un gaz parfait.</p>
<p>Énergie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée considérée incompressible et indilatable.</p>	<p>Exploiter la propriété <math>U_m = U_m(T)</math> pour une phase condensée incompressible et indilatable.</p>
<p>Corps pur diphasé en équilibre. Diagramme de phases (P, T). Cas de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme de Clapeyron (P, v), titre en vapeur.</p>	<p>Analyser un diagramme de phases expérimental (P, T).</p> <p>Proposer un jeu de variables d'état suffisant pour caractériser l'état d'équilibre d'un corps pur diphasé soumis aux seules forces de pression.</p> <p>Positionner les phases dans les diagrammes (P, T) et (P, v).</p> <p>Déterminer la composition d'un mélange diphasé en un point d'un diagramme (P, v).</p>

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Énergie échangée par un système au cours d'une transformation</b>	
<p>Transformation thermodynamique subie par un système. Évolutions isochore, monotherme, isotherme, monobare, isobare.</p>	<p>Définir un système adapté à une problématique donnée.</p>
<p>Travail des forces de pression. Transformations isochore, monobare.</p>	<p>Évaluer le travail des forces de pression par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable.</p> <p>Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron.</p>
<p>Transfert thermique. Transformation adiabatique. Thermostat, transformations monotherme et isotherme.</p>	<p>Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement.</p> <p>Identifier, dans une situation expérimentale, le ou les systèmes modélisables par un thermostat.</p> <p>Proposer de manière argumentée le modèle limite le mieux adapté à une situation réelle entre une transformation adiabatique et une transformation isotherme.</p>

Concernant les bilans d'énergie abordés dans la partie 3.3. « **Premier principe. Bilans d'énergie** », les expressions des fonctions d'état  $U_m(T, V_m)$  et  $H_m(T, P)$  sont données si le système ne relève pas du modèle gaz parfait ou du modèle de la phase condensée incompressible et indilatable.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.3. Premier principe. Bilans d'énergie</b>	

Premier principe de la thermodynamique.	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail et transfert thermique. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne. Distinguer le statut de la variation d'énergie interne du statut des termes d'échange. Calculer le transfert thermique sur un chemin donné connaissant le travail et la variation de l'énergie interne.
Enthalpie d'un système. Capacité thermique à pression constante dans le cas du gaz parfait et d'une phase condensée incompressible et indilatable.	Exprimer le premier principe sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final. Exprimer l'enthalpie molaire $H_m(T)$ du gaz parfait à partir de son énergie interne. Justifier sur un exemple que l'enthalpie molaire $H_m$ d'une phase condensée peu compressible et peu dilatable peut être considérée comme une fonction de l'unique variable $T$ . Citer l'ordre de grandeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.
Enthalpie associée à une transition de phase : enthalpie de fusion, enthalpie de vaporisation, enthalpie de sublimation.	Exploiter l'extensivité de l'enthalpie et réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phases.  <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie de fusion, etc.).</b>

Concernant la partie 3.4. « **Deuxième principe. Bilans d'entropie** », l'expression de la fonction d'état entropie est systématiquement donnée et sa construction n'est pas une capacité visée. On cite sans aucun développement quantitatif son interprétation en termes de désordre de façon à faciliter une interprétation intuitive des bilans d'entropie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.4. Deuxième principe. Bilans d'entropie.</b>	
Deuxième principe : fonction d'état entropie, entropie créée, entropie échangée. $\Delta S = S_{\text{éch}} + S_{\text{créée}}$ avec $S_{\text{éch}} = \sum Q_i/T_i$ .	Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan entropique. Relier la création d'entropie à une ou plusieurs causes physiques de l'irréversibilité. Analyser le cas particulier d'un système en évolution adiabatique.
Variation d'entropie d'un système.	Utiliser l'expression fournie de la fonction d'état entropie. Exploiter l'extensivité de l'entropie.
Loi de Laplace.	Citer et utiliser la loi de Laplace après avoir rappelé ses conditions d'application.

Cas particulier d'une transition de phase.	Citer et utiliser la relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie associées à une transition de phase : $\Delta h_{12}(T) = T \Delta s_{12}(T)$ .
--	--

Dans la partie 3.5. « **Machines thermiques** », l'enseignement de la thermodynamique est orienté vers des applications industrielles réelles.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.5. Machines thermiques</b>	
Application du premier principe et du deuxième principe aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.	Donner le sens réel des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Définir un rendement – ou une efficacité – et le relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Démontrer et utiliser le théorème de Carnot. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.  <b>Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.</b>

## Thème 4 : Constitution et transformations de la matière (2)

Les transformations chimiques en solution aqueuse jouent un rôle essentiel en chimie, en biochimie, dans le domaine du vivant et dans les procédés industriels. Un nombre considérable de développements technologiques et d'analyses environnementales (traitement des eaux, méthodes d'analyse, extraction d'ions métalliques des minerais, générateurs électrochimiques, lutte contre la corrosion, etc.) repose sur des transformations acido-basiques, de solubilisation-précipitation et d'oxydo-réduction en solution aqueuse dont la maîtrise est importante pour prévoir, interpréter et optimiser les phénomènes mis en jeu.

L'objectif de cette seconde partie du thème « **Constitution et transformations de la matière** » est donc de présenter différents types de réactions susceptibles d'intervenir en solution aqueuse, d'en déduire des diagrammes de prédominance ou d'existence d'espèces chimiques, et de les utiliser comme outil de prévision et d'interprétation des transformations chimiques quel que soit le milieu donné.

Les choix pédagogiques relatifs au contenu des séances de travail expérimental permettront de contextualiser ces enseignements. Les dosages par titrage sont étudiés exclusivement en travaux pratiques. L'analyse des conditions choisies ou la réflexion conduisant à une proposition de protocole expérimental pour atteindre un objectif donné constituent des mises en situation des enseignements évoqués précédemment. Ces séances de travail expérimental constituent une nouvelle occasion d'aborder qualité et précision de la mesure.

Les différentes transformations en solution aqueuse abordées dans la partie 4.5. « Réactions acide-base et de précipitation » constituent des illustrations de l'évolution des systèmes chimiques introduites au premier semestre, les étudiants étant amenés à déterminer l'état final d'un système en transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique. On montre qu'il est ainsi possible d'analyser et de simplifier une situation complexe pour parvenir à la décrire rigoureusement et quantitativement, en l'occurrence dans le cas des solutions aqueuses par une seule réaction. Il est cependant important de

noter qu'on évite tout calcul inutile de concentration, en privilégiant l'utilisation des diagrammes pour valider le choix de la réaction mise en jeu. Dans ce cadre, aucune formule de calcul de pH n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.5. Réactions acide-base et de précipitation</b>	
<p><b>Réactions acide-base</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante d'acidité ;</li> <li>- diagrammes de prédominance et de distribution.</li> <li>- exemples usuels d'acides et bases : nom, formule et nature - faible ou forte - des acides chlorhydrique et acétique, de la soude, de l'ammoniac.</li> </ul> <p><b>Réactions de dissolution ou de précipitation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- constante de solubilité ;</li> <li>- solubilité et condition de précipitation ;</li> <li>- domaine d'existence ;</li> <li>- facteurs influençant la solubilité.</li> </ul>	<p>Reconnaître une réaction acide-base à partir de son équation.</p> <p>Extraire de ressources disponibles les données thermodynamiques pertinentes pour prévoir qualitativement l'état final d'un système en solution aqueuse ou interpréter des observations expérimentales.</p> <p>Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques d'équilibre sont connues.</p> <p>Retrouver les valeurs de constantes thermodynamiques d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance.</p> <p>Déterminer la composition chimique d'un système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p>Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.</p> <p>Exploiter des courbes d'évolution de la solubilité d'un solide en fonction d'une variable pertinente.</p> <p>Prévoir l'état de saturation d'une solution.</p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction acide-base et une réaction de précipitation pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse.</b></p>

L'analyse de transformations mettant en jeu des oxydants et réducteurs usuels et des piles permettent d'aborder, dans la partie **4.6. « Réactions d'oxydo-réduction »** les différents concepts associés aux phénomènes d'oxydo-réduction en solution aqueuse. La relation de Nernst ainsi que la relation entre la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction et les potentiels standard permettent de prévoir l'évolution des systèmes et le caractère favorisé des transformations.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.6. Réactions d'oxydo-réduction</b>	
<p><b>Oxydants et réducteurs, réactions d'oxydo-réduction</b></p> <p>Nombre d'oxydation.</p> <p>Exemples d'oxydants et de réducteurs minéraux usuels : nom, nature et formule des ions thiosulfate, permanganate, hypochlorite, du peroxyde d'hydrogène.</p>	<p>Relier la position d'un élément dans le tableau périodique et le caractère oxydant ou réducteur du corps simple correspondant.</p> <p>Prévoir les nombres d'oxydation extrêmes d'un élément à partir de sa position dans le tableau périodique.</p> <p>Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple.</p>

Pile, tension à vide, potentiel d'électrode, formule de Nernst, électrodes de référence	Décrire le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode. Déterminer la capacité électrique d'une pile.
Diagrammes de prédominance ou d'existence.	Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.
Aspect thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction. Dismutation et médiamutation.	Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples.  <b>Mettre en œuvre une réaction d'oxydo-réduction pour réaliser une analyse quantitative en solution aqueuse.</b>  <b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement.</b>

### Annexe 1 : matériel

La liste ci-dessous regroupe le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée fournie sous forme de version papier ou numérique. Une utilisation de matériel hors de cette liste lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une introduction guidée suffisamment détaillée.

#### 1. Domaine optique

- Goniomètre
- Viseur à frontale fixe
- Lunette autocollimatrice
- Spectromètre à fibre optique
- Laser à gaz
- Lampes spectrales
- Source de lumière blanche à condenseur

#### 2. Domaine électrique

- Oscilloscope numérique
- Carte d'acquisition et logiciel dédié
- Générateur de signaux Basse Fréquence
- Multimètre numérique
- Émetteur et récepteur acoustique (domaine audible et domaine ultrasonore)
- Microcontrôleur

#### 3. Domaines mécanique et thermodynamique

- Dynamomètre
- Capteur de pression
- Accéléromètre
- Stroboscope
- Webcam avec logiciel dédié
- Appareil photo numérique ou caméra numérique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Prévention des risques au laboratoire</b>	Adopter une attitude responsable et adaptée au travail en laboratoire. Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.
- <b>Risque chimique</b> Règles de sécurité au laboratoire. Classes et catégories de danger. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Mentions de danger (H) et conseils de prudence (P). Fiches de sécurité.	Relever les indications sur le risque associé au prélèvement, au mélange et au stockage des produits chimiques et adopter une attitude responsable lors de leur utilisation.
- <b>Risque électrique</b>	Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
- <b>Risque optique</b>	Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.
- <b>Risques liés à la pression et à la température</b>	Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.
<b>2. Prévention de l'impact environnemental</b> Traitement et rejet des espèces chimiques.	Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

## Contenus thématiques

Les contenus de la formation sont organisés autour de cinq thèmes.

### 1. Thermodynamique et mécanique des fluides appliquées aux machines thermiques

- 1.1. Éléments de statique des fluides dans un référentiel galiléen
- 1.2. Expression différentielle des principes de la thermodynamique
- 1.3. Diagrammes d'état des fluides réels purs
- 1.4. Description d'un fluide en écoulement stationnaire dans une conduite
- 1.5. Énergétique des fluides en écoulement dans une conduite
- 1.6. Thermodynamique industrielle
- 1.7. Transfert d'énergie par conduction thermique à une dimension en coordonnées cartésiennes.

### 2. Électronique

- 2.1. Stabilité des systèmes linéaires
- 2.2. Rétroaction
- 2.3. Oscillateurs
- 2.4. Électronique numérique



**3. Optique ondulatoire**

- 3.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses
- 3.2. Superposition d'ondes lumineuses
- 3.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

**4. Électromagnétisme**

- 4.1. Électrostatique
- 4.2. Magnétostatique
- 4.3. Équations de Maxwell
- 4.4. Propagation

**5. Transformations chimiques de la matière**

- 5.1. Thermodynamique d'un système siège d'une réaction chimique
- 5.2. Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction
- 5.3. Diagrammes potentiel-pH

**1. Thermodynamique et mécanique des fluides appliquées aux machines thermiques**

Cette partie du programme de la classe de TSI2 s'intéresse aux phénomènes liés à l'écoulement d'un fluide et à la conduction thermique dans les machines thermiques. Elle est essentiellement abordée à travers la mise en œuvre de bilans d'énergie. Elle prolonge le programme de thermodynamique de la classe de TSI1 en introduisant le formalisme de la thermodynamique différentielle.

Les principes de la thermodynamique pour un système fermé sont repris sous forme infinitésimale. Les identités thermodynamiques sont introduites dans le but d'établir et de comprendre les allures des courbes dans les diagrammes thermodynamiques ; il ne s'agit pas de les exploiter pour retrouver les expressions des fonctions d'état, ces dernières devant toujours être fournies. L'application des deux principes aux fluides en écoulement stationnaire dans les systèmes ouverts conduit ensuite à l'analyse de quelques systèmes industriels.

On introduit également en classe de TSI2 des notions de base de mécanique des fluides. L'objectif est de décrire les écoulements simples de fluides dans les machines thermiques en évoquant les phénomènes de perte de charge et le rôle de la viscosité. L'approche se fonde exclusivement sur la notion de bilan macroscopique : toute formulation locale de la mécanique des fluides, notamment à l'aide d'opérateurs vectoriels, est exclue. Enfin, on aborde la conduction thermique à l'aide de bilans infinitésimaux, la loi de Newton étant introduite pour faire le lien avec la thermodynamique industrielle.

La partie 1.1 « **Éléments de statique des fluides dans un référentiel galiléen** » introduit sur le contexte de la statique des fluides le principe du découpage d'un domaine physique (volume, surface) en éléments infinitésimaux et la sommation d'une grandeur extensive (force) pour ce découpage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Éléments de statique des fluides dans un référentiel galiléen.</b>	
Forces surfaciques, forces volumiques. Champ de pression.	Distinguer les forces de pression des forces de pesanteur.

Statique des fluides dans le champ de pesanteur uniforme.	Établir la relation entre la dérivée de la pression par rapport à une coordonnée verticale, la masse volumique et le champ de pesanteur. Établir l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas d'un fluide incompressible et dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le cadre du modèle du gaz parfait. Comparer les variations de pression dans le cas de l'océan et de l'atmosphère.
---	--

La partie **1.2 « Expression différentielle des principes de la thermodynamique »** présente les principes de la thermodynamique sous forme différentielle. Dans le but d'unifier la présentation en physique et en chimie, les identités thermodynamiques sont introduites dans le cas d'un système de composition variable. Toute étude générale de la notion de potentiel thermodynamique est hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2. Expression différentielle des principes thermodynamiques.</b>	
Échelle mésoscopique, transformation infinitésimale.	Découper un système en sous-systèmes élémentaires. Découper une transformation finie en une succession de transformations infinitésimales.
Premier principe pour une transformation infinitésimale d'un système fermé. Deuxième principe pour une transformation infinitésimale d'un système fermé.	Appliquer les principes pour obtenir une équation différentielle relative au système considéré.
Potentiel thermodynamique. Fonction enthalpie libre.	Justifier que l'enthalpie libre est un potentiel thermodynamique adapté à l'étude des transformations isothermes, isobares et spontanées.
Identités thermodynamiques pour un système fermé de composition variable. Potentiel chimique.	Citer les expressions des différentielles de l'énergie interne, de l'enthalpie et de l'enthalpie libre. Définir la température thermodynamique, la pression thermodynamique et le potentiel chimique. Distinguer les éventuels caractères intensif ou extensif des variables utilisées. Écrire les principes et les identités thermodynamiques par unité de masse du système. Exprimer l'enthalpie libre d'un système chimique en fonction des potentiels chimiques.

L'étude **1.3 des « Diagrammes d'état des fluides réels purs »** est l'occasion de réinvestir les notions de thermodynamique différentielle. On y exploite également des diagrammes de fluides réels afin d'habituer les étudiants à ne pas se limiter à des situations « idéales » (gaz parfait, etc.).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3. Diagrammes d'état des fluides réels purs.</b>	
Enthalpie et entropie de changement d'état.	Citer l'ordre de grandeur de l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau. Calculer l'énergie récupérable par transfert thermique lors d'une liquéfaction isobare. Relier l'entropie de changement d'état à l'enthalpie de changement d'état.
-----	-----
Titre massique.	Utiliser la règle des moments.
Diagrammes de Clapeyron, entropique et des frigoristes.	Représenter, pour le diagramme de Clapeyron, l'allure des courbes isothermes et isentropiques. Exploiter un diagramme fourni pour déterminer une grandeur physique.

La partie **1.4 « Description d'un fluide en écoulement stationnaire dans une conduite »** introduit le point de vue eulérien pour l'étude des écoulements. Il s'agit de décrire simplement un écoulement en identifiant des tubes de courant sur lesquels des bilans peuvent ensuite être effectués.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.4. Description d'un fluide en écoulement stationnaire dans une conduite.</b>	
Grandeurs eulériennes. Régime stationnaire.	Décrire localement les propriétés thermodynamiques et mécaniques d'un fluide à l'aide des grandeurs intensives pertinentes.
Lignes et tubes de courant. Débit massique.	Exprimer le débit massique en fonction de la vitesse d'écoulement. Exploiter la conservation du débit massique le long d'un tube de courant.
-----	-----
Débit volumique.	Justifier l'intérêt d'utiliser le débit volumique pour l'étude d'un fluide incompressible en écoulement.

Dans la partie **1.5 « Énergétique des fluides en écoulement dans une conduite »**, on effectue des bilans énergétiques dans une conduite. On se place dans un premier temps dans le cadre de la dynamique des fluides parfaits. Toute utilisation de l'équation d'Euler ou de Navier-Stokes est exclue. La relation de Bernoulli est établie. Les pertes de charge dans les conduites sont étudiées. Enfin, les transferts thermiques sont pris en compte afin d'exprimer les principes de la thermodynamique pour un système en écoulement.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.5. Énergétique des fluides en écoulement laminaire stationnaire dans une conduite.</b>	
Fluides parfaits. Fluides newtoniens : notion de viscosité.	Citer des ordres de grandeur de viscosité de gaz et de liquides (air, eau et lubrifiant). Exploiter les conditions aux limites du champ de vitesse d'un fluide dans une conduite. Relier qualitativement l'irréversibilité d'un écoulement à la viscosité.
Relation de Bernoulli.	Définir un volume et une surface de contrôle. Établir et exploiter la relation de Bernoulli pour un fluide parfait, incompressible en écoulement stationnaire.
-----	-----

Perte de charge singulière et régulière.	Modifier la relation de Bernoulli en tenant compte d'un terme de dissipation d'énergie fourni. <b>Mettre en évidence une perte de charge.</b>
Travail indiqué massique d'une machine. Bilan d'énergie.	Relier la notion de travail indiqué massique à la présence de parties mobiles. Établir un bilan de puissance pour un circuit hydraulique ou pneumatique avec ou sans pompe.
Premier et deuxième principes pour un écoulement stationnaire unidimensionnel d'un système à une entrée et une sortie.	Établir et utiliser les premier et deuxième principes formulés avec des grandeurs massiques. Identifier les termes à négliger en fonction du contexte étudié. Relier l'entropie massique créée aux causes d'irréversibilité.

La partie **1.6 « Thermodynamique industrielle »** permet un approfondissement du cours de première année, par l'étude de cycles industriels. On se limite à des calculs dans le cadre du modèle du gaz parfait ou à l'utilisation des diagrammes d'état si le fluide est réel. Aucune connaissance relative à la technologie des installations ou aux différents types de cycles n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.6. Thermodynamique industrielle.</b>	
<b>Étude de quelques dispositifs d'une installation industrielle</b> Compresseur et turbine calorifugés.	Établir et exploiter la variation d'enthalpie massique pour une transformation réversible.
Échangeur thermique calorifugé.	Établir et exploiter la relation entre les puissances thermiques reçues par les deux écoulements.
Détendeur calorifugé (laminage).	Établir et exploiter la nature isenthalpique de la transformation.
<b>Cycles industriels</b> Moteurs, réfrigérateurs, pompes à chaleur.	Repérer, pour une machine dont les éléments constitutifs sont donnés, les sources thermiques, le sens des échanges thermiques et mécaniques. Relier le fonctionnement d'une machine au sens de parcours du cycle dans un diagramme thermodynamique. Exploiter des diagrammes et des tables thermodynamiques pour déterminer les grandeurs thermodynamiques intéressantes. Définir et exprimer le rendement, l'efficacité ou le coefficient de performance d'une machine. Citer des ordres de grandeur de puissances thermique et mécanique mises en jeu pour différentes tailles de dispositifs.

La partie **1.7 « Transfert d'énergie par conduction thermique à une dimension en coordonnées cartésiennes »** aborde l'étude de la conduction thermique dans les solides. On se limite à l'étude de problèmes à une dimension en coordonnées cartésiennes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.7. Transfert d'énergie par conduction thermique à une dimension en coordonnées cartésiennes.</b>	
Flux thermique. Vecteur densité de flux thermique.	Définir et algébriser le flux thermique échangée à travers une interface.
Loi de Fourier.	Relier la non-uniformité de la température à l'existence d'un flux thermique et interpréter son sens. Utiliser la loi de Fourier.
Bilan d'énergie.	Établir la relation entre la température et le vecteur densité de flux thermique.
Équation de la diffusion thermique sans terme source.	Établir l'équation de la diffusion thermique. Interpréter qualitativement l'irréversibilité du phénomène. Relier le temps et la longueur caractéristiques d'un phénomène de diffusion au coefficient de diffusion par une analyse dimensionnelle.  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion thermique à une dimension par une méthode des différences finies dérivée de la méthode d'Euler explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.
Analogie électrique dans le cas du régime stationnaire.	Définir la résistance thermique. Exploiter l'analogie électrique lors d'un bilan thermique.
Loi de Newton.	Exploiter la loi de Newton fournie pour prendre en compte les échanges conducto-convectifs.

## 2. Électronique

Ce module renforce et complète l'étude des circuits électriques linéaires menée dans la partie « **Ondes et signaux** » du programme de première année. Ainsi, les notions de filtrage et d'analyse spectrale sont réinvesties, en particulier dans les activités expérimentales. Le programme de deuxième année ajoute la rétroaction et le bouclage des systèmes linéaires dans le but d'aborder la stabilité, les oscillateurs et la réalisation de filtres actifs.

Ces différentes thématiques sont illustrées à l'aide de l'amplificateur linéaire intégré (ALI) dont l'étude n'est pas une fin en soi mais un outil permettant des réalisations expérimentales variées. Par ailleurs, des exemples de manifestations des non-linéarités sont abordés à l'occasion de la saturation d'un amplificateur ou de la réalisation d'une fonction mémoire (comparateur à hystérésis).

Afin de compléter l'approche analogique des circuits électriques, un module à vocation expérimentale est consacré au traitement numérique des signaux à travers les sujets suivants :

- la conversion analogique numérique ;
- l'échantillonnage et le repliement de spectre ;
- le filtrage numérique.

La partie **2.1 « Rétroaction »** illustre quelques propriétés relatives à la rétroaction sur l'exemple de l'amplificateur linéaire intégré. L'étude des circuits est strictement limitée à des situations pouvant être facilement abordées avec les outils introduits en première année (loi des mailles, loi des nœuds, diviseur de tension). La vitesse limite de balayage de l'ALI est évoquée en travaux pratiques afin d'identifier les

distorsions harmoniques traduisant un comportement non linéaire du système étudié. Les limitations associées aux courants de polarisation et la tension de décalage ne sont pas étudiées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1. Rétroaction.</b>	
Modèle de l'ALI parfait défini par des courants de polarisation nuls, une résistance de sortie nulle, une fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire, une saturation de la tension de sortie.	Citer les hypothèses du modèle et les ordres de grandeur du gain différentiel statique et du temps de réponse. Distinguer les différents régimes de fonctionnement.
Limites du modèle : vitesse limite de balayage, saturation de l'intensité du courant de sortie.	<b>Détecter, dans un montage à ALI, les manifestations de la vitesse limite de balayage et de la saturation de l'intensité du courant de sortie.</b>
ALI idéal (parfait de gain infini) en régime linéaire.	Identifier la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse comme un indice de stabilité du régime linéaire. Établir la relation entrée-sortie des montages non inverseur et suiveur. Expliquer l'intérêt, pour garantir leur fonctionnement lors de mises en cascade, de réaliser des filtres de tension de forte impédance d'entrée et de faible impédance de sortie.
ALI idéal en régime saturé.	Établir la relation entrée-sortie du comparateur simple. Associer, pour une entrée sinusoïdale, le caractère non-linéaire du système et la génération d'harmoniques en sortie. Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis.

La partie **2.2 « Oscillateurs »** s'intéresse à une étude non exhaustive des oscillateurs en électronique. Les exemples sont choisis à l'initiative du professeur et les calculs des fonctions de transfert des filtres ne constituent pas un objectif de formation. En travaux pratiques, on complète l'étude par une analyse spectrale des signaux.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2. Oscillateurs.</b>	
Oscillateur quasi-sinusoïdal réalisé en bouclant un filtre du deuxième ordre avec un amplificateur.	Exprimer les conditions théoriques (gain et fréquence) d'auto-oscillation sinusoïdale d'un système linéaire bouclé. Analyser, à partir de l'équation différentielle, l'inégalité que doit vérifier le gain de l'amplificateur afin d'assurer le démarrage des oscillations. Interpréter le rôle des non linéarités dans la stabilisation de l'amplitude des oscillations.  <b>Mettre en œuvre un oscillateur quasi-sinusoïdal et analyser les spectres des signaux générés.</b>  <u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, simuler l'évolution temporelle d'un signal généré par un oscillateur.

Oscillateur de relaxation associant un intégrateur et un comparateur à hystérésis.	Décrire les différentes séquences de fonctionnement. Exprimer les conditions de basculement. Déterminer l'expression de la période.
Générateur de signaux non sinusoïdaux.	<b>Mettre en œuvre un oscillateur de relaxation et analyser les spectres des signaux générés.</b>

La partie **2.3 « Électronique numérique »** est exclusivement étudiée de manière expérimentale et aborde la question du traitement numérique du signal dans le prolongement du programme de première année.

Le phénomène de repliement de spectre est expliqué qualitativement, l'objectif étant de mettre en place la condition de Nyquist-Shannon et de réaliser convenablement une acquisition numérique en vue d'une analyse spectrale.

Afin de mettre en évidence d'autres effets associés à l'échantillonnage, on réalise de manière comparative un filtre analogique passe-bas et un filtre numérique remplissant la même fonction. Ce dernier est réalisé à l'aide d'une chaîne de traitement : CAN, algorithme numérique, CNA. On étudie expérimentalement l'influence de la fréquence d'échantillonnage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.3. Électronique numérique.</b>	
Échantillonnage.	<b>Mettre en évidence l'influence de la fréquence d'échantillonnage.</b>
Condition de Nyquist-Shannon.	<b>Mettre en évidence le phénomène de repliement de spectre dû à l'échantillonnage lors de l'utilisation d'un oscilloscope numérique ou d'une carte d'acquisition.</b>
Analyse spectrale numérique.	<b>Choisir les paramètres (durée, nombre d'échantillons, fréquence d'échantillonnage) d'une d'acquisition numérique afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon.</b>
Filtrage numérique.	<u>Capacité numérique</u> : réaliser, à l'aide d'un langage de programmation, un filtrage numérique passe-bas d'un signal issu d'une acquisition et mettre en évidence la limitation introduite par l'échantillonnage.

### 3. Optique ondulatoire

Le programme d'optique ondulatoire de la classe de TSI2 s'inscrit dans le prolongement de la partie « Propagation d'un signal » du thème « Ondes et signaux » du programme de la classe de TSI1. Il s'agit pour les étudiants d'approfondir l'étude des phénomènes d'interférences lumineuses, conséquences de la nature ondulatoire de la lumière.

Si le formalisme utilisé permet une modélisation précise des phénomènes décrits, il convient néanmoins de privilégier les aspects expérimentaux et d'utiliser tous les supports de visualisation (expériences de cours, simulations, animations, etc.) pour aider les étudiants dans la construction de leurs représentations. L'enseignant peut souligner que ces phénomènes, étudiés dans le cadre de l'optique, sont généralisables à tout comportement ondulatoire.

L'approche expérimentale est centrée sur la mise en œuvre des trous d'Young et de dispositifs d'interférences à N ondes.

La partie **3.1 « Modèle scalaire des ondes lumineuses »** introduit les outils nécessaires pour décrire les phénomènes d'interférences. Le programme utilise le mot « intensité » pour décrire la grandeur

détectée mais on peut utiliser indifféremment les mots « intensité » ou « éclairement » sans chercher à les distinguer à ce niveau. L'intensité lumineuse est introduite comme une puissance par unité de surface. Le théorème de Malus est admis.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses.</b>	
Grandeur scalaire optique.	Utiliser une grandeur scalaire pour décrire un signal lumineux.
Chemin optique. Déphasage dû à la propagation. Surfaces d'ondes. Théorème de Malus. Principe du retour inverse de la lumière.	Exprimer le retard de phase en un point (par rapport à un autre) en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique.
Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	Associer une description de la formation des images en termes de rayon de lumière et en termes de surfaces d'onde. Utiliser la propriété énonçant que le chemin optique séparant deux points conjugués est indépendant du rayon de lumière choisi.
Détecteurs. Intensité lumineuse.	Relier l'intensité lumineuse à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire optique. Citer l'ordre de grandeur du temps d'intégration de quelques capteurs optiques.

Dans la partie **3.2 « Superposition d'ondes lumineuses »**, la formule de Fresnel, admise en classe de première année, est démontrée. L'étude de la superposition de N ondes cohérentes ne doit pas donner lieu à des développements calculatoires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.2. Superposition d'ondes lumineuses.</b>	
Superposition d'ondes incohérentes entre elles.	Justifier et exploiter l'additivité des intensités.
Superposition de deux ondes cohérentes entre elles, formule de Fresnel. Facteur de contraste.	Vérifier que les principales conditions pour que le phénomène d'interférences apparaisse (égalité des pulsations et déphasage constant dans le temps) sont réunies. Établir et exploiter la formule de Fresnel. Associer un bon contraste à des intensités voisines.
Superposition de N ondes cohérentes, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique. Réseau par transmission.	Établir l'expression de la différence de marche entre deux motifs consécutifs. Établir la relation fondamentale des réseaux liant la condition d'interférences constructives à la valeur de la différence de marche entre deux motifs consécutifs.  <b>Mettre en œuvre un spectroscopie à réseau.</b>

Dans la partie **3.3 « Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young »**, les trous d'Young permettent de confronter théorie et expérience. Les fentes d'Young peuvent être abordées mais de manière exclusivement expérimentale. Aucune connaissance sur un autre diviseur du front d'onde n'est exigible.



Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3.3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young.</b>	
Trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source à distance finie et observation à grande distance finie. Ordre d'interférences.	Exprimer et utiliser l'ordre d'interférences.  <b>Mettre en œuvre une expérience d'interférences : trous d'Young ou fentes d'Young.</b>
Variations de l'ordre d'interférences avec la position du point d'observation ; franges d'interférences. Interfrange.	Justifier la forme des franges observées.

#### 4. Électromagnétisme

Le programme d'électromagnétisme de la classe de TSI2 s'inscrit dans le prolongement du thème « **Ondes et signaux** » du programme de TSI1. Il s'agit pour les étudiants de découvrir les lois locales et intégrales qui gouvernent les champs électrique et magnétique et des applications dans des domaines variés.

Si certaines notions ont été abordées en classe de première année, le formalisme utilisé constitue bien souvent pour les étudiants une première découverte ; il convient pour l'enseignant d'être particulièrement attentif aux difficultés potentielles des étudiants et d'utiliser tous les outils de visualisation (expériences de cours, simulations, animations, etc.) pour aider les étudiants dans la construction de leurs représentations.

Pour les calculs de champs, l'accent est mis sur les situations à haut degré de symétrie qui permettent l'utilisation efficace des propriétés de flux ou de circulation.

La loi de Biot et Savart, les notions de potentiel vecteur et de courant surfacique ne relèvent pas du programme. La relation de passage relative au champ électrique peut être exploitée, mais doit être systématiquement fournie en cas de besoin.

Après une présentation des équations de Maxwell et des aspects énergétiques, le programme analyse le phénomène de propagation d'une onde électromagnétique dans le vide, la structure des champs associés et la réflexion des ondes sur un conducteur parfait.

Les équations locales des champs statiques sont introduites comme cas particuliers des équations de Maxwell.

Les notions abordées la partie **4.1 « Électrostatique »** sont centrées sur les distributions de charges, le champ et le potentiel. Pour le champ et le potentiel, on se limite aux expressions explicites dans le cas d'une charge ponctuelle et sous forme intégrale dans le cas de distributions continues.

L'accent est mis sur les propriétés intégrales du champ et sur le théorème de Gauss pour des situations présentant un haut degré de symétrie.

Des capacités sur la lecture des lignes de champ et des surfaces équipotentielles sont développées. Le condensateur plan est introduit mais l'étude des conducteurs en équilibre électrostatique ne relève pas du programme. Une approche énergétique est conduite dans le cas d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrique extérieur.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.1. Électrostatique.</b>	
Loi de Coulomb. Champ électrostatique.	Exprimer le champ électrostatique créé par une charge ponctuelle.
Distributions continues de charges volumique, surfacique, linéique. Principe de superposition.	Décomposer une distribution en des distributions plus simples dans le but de calculer un champ électrostatique par superposition.

	<p>Choisir un type de distribution continue adaptée à la situation modélisée.</p> <p>Justifier qualitativement le choix d'une modélisation d'une distribution de charges par une distribution infinie.</p> <p>Évaluer la charge totale d'une distribution continue dans des situations à géométrie simple.</p>
Symétries et invariances du champ électrostatique.	<p>Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de charges.</p> <p>Identifier les invariances d'une distribution de charges.</p> <p>Exploiter les symétries et les invariances d'une distribution de charges pour caractériser le champ électrostatique créé.</p>
Circulation du champ électrostatique. Potentiel électrostatique. Gradient.	<p>Relier le champ électrostatique au potentiel.</p> <p>Exprimer le potentiel créé par une charge ponctuelle.</p> <p>Calculer un champ électrostatique à partir du potentiel, l'expression de l'opérateur gradient étant fournie dans le cas des coordonnées sphériques et cylindriques.</p> <p>Exprimer une différence de potentiel comme une circulation du champ électrostatique.</p>
Flux du champ électrostatique. Théorème de Gauss.	<p>Utiliser le théorème de Gauss pour déterminer le champ électrostatique créé par une distribution présentant un haut degré de symétrie.</p>
Systèmes modélisés par une sphère, un cylindre infini et un plan infini.	<p>Établir les expressions des champs électrostatiques créés en tout point de l'espace par une sphère uniformément chargée en volume, par un cylindre infini uniformément chargé en volume et par un plan infini uniformément chargé en surface.</p> <p>Établir et exploiter le fait qu'à l'extérieur d'une distribution à symétrie sphérique, le champ électrostatique créé est le même que celui d'une charge ponctuelle concentrant la charge totale et placée au centre de la distribution.</p>
Condensateur plan modélisé par la superposition de deux distributions surfaciques infinies de charges opposées.	<p>Établir l'expression de la capacité d'un condensateur plan dans le vide en négligeant les effets de bords.</p>
Lignes de champ, tubes de champ, surfaces équipotentielles.	<p>Orienter les lignes de champ électrostatique créées par une distribution de charges.</p> <p>Représenter les surfaces équipotentielles connaissant les lignes de champ et inversement.</p> <p>Associer, en dehors des sources, les variations de l'intensité du champ électrostatique à la position relative des lignes de champ.</p> <p>Vérifier qu'une carte de lignes de champ est compatible avec les symétries et les invariances d'une distribution.</p> <p><u>Capacité numérique</u> : à l'aide d'un langage de programmation, tracer quelques lignes de champ</p>

	et lignes équipotentiels pour une distribution donnée.
Énergie potentielle électrostatique d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrostatique extérieur.	Établir et exploiter l'expression de l'énergie potentielle d'une charge ponctuelle placée dans un champ électrostatique extérieur.

L'étude de la magnétostatique menée dans la partie **4.2 « Magnétostatique »** s'appuie le plus possible sur les différents aspects qualitatifs et quantitatifs vus en première année ; les étudiants sont donc déjà familiarisés avec le concept de champ magnétostatique.

On aborde les propriétés intégrales du champ et on utilise le théorème d'Ampère pour des calculs dans des cas présentant un haut degré de symétrie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.2. Magnétostatique.</b>	
Vecteur densité de courant volumique. Intensité du courant. Distributions de courant électrique volumique et linéique.	Relier l'intensité du courant et le flux du vecteur densité de courant volumique. Justifier la modélisation d'une distribution de courant par une distribution filiforme.
Symétries et invariances des distributions de courant.	Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie d'une distribution de courants. Identifier les invariances d'une distribution de courants. Exploiter les symétries et les invariances d'une distribution de courants pour prévoir des propriétés du champ magnétostatique créé.
Propriétés de flux et de circulation. Théorème d'Ampère.	Identifier les situations pour lesquelles le champ magnétostatique peut être calculé simplement à l'aide du théorème d'Ampère. Choisir un contour, une surface et les orienter pour appliquer le théorème d'Ampère en vue de déterminer l'expression d'un champ magnétostatique créé par une distribution présentant un haut degré de symétrie.
Modèles du fil rectiligne infini de section non nulle et du solénoïde infini.	Justifier le choix d'une modélisation d'une distribution de courants par une distribution infinie. Établir les expressions des champs magnétostatiques créés en tout point de l'espace par un fil rectiligne infini de section non nulle, parcouru par des courants uniformément répartis en volume, par un solénoïde infini en admettant que le champ est nul à l'extérieur.

Lignes de champ, tubes de champ.	Orienter les lignes de champ magnétostatique créées par une distribution de courants. Associer les variations de l'intensité du champ magnétostatique à l'évolution de la position relative des lignes de champ. Vérifier qu'une carte de lignes de champ est compatible avec les symétries et les invariances d'une distribution.
----------------------------------	--

Dans la partie **4.3 « Équations de Maxwell »**, une vision cohérente des lois de l'électromagnétisme est présentée. Elle constitue une première approche quantitative du phénomène de propagation et permet également de revenir qualitativement sur l'induction étudiée en classe de première année. Aucun modèle relatif à la loi d'Ohm locale n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.3. Équations de Maxwell.</b>	
Principe de la conservation de la charge : formulation locale.	Établir l'équation locale de la conservation de la charge dans le cas à une dimension cartésienne.
Équations de Maxwell : formulations locale et intégrale.	Citer, utiliser et interpréter les équations de Maxwell sous forme intégrale. Relier qualitativement le couplage spatiotemporel entre champ électrique et champ magnétique au phénomène de propagation.
Équations de propagation des champs dans une région vide de charges et de courants.	Établir les équations de propagation à partir des équations de Maxwell.
Cas des champs statiques : équations locales.	Établir les lois locales des champs statiques à partir des équations de Maxwell.

La partie **4.4 « Propagation »**, articulée autour des ondes électromagnétiques, est l'occasion d'illustrer l'efficacité du formalisme local des équations de Maxwell en insistant sur les aspects qualitatifs et sur la variété des applications qui en découlent. Quelques aspects énergétiques associés à la propagation d'une onde plane dans l'espace vide de charge et de courant sont abordés ; les échanges d'énergie entre la matière et le champ électromagnétique ne sont pas étudiés.

La réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait et son confinement dans une cavité permettent aux étudiants d'aborder la notion d'onde stationnaire et de découvrir des savoir-faire spécifiques permettant leur étude efficace.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4.4. Propagation.</b>	
Onde plane dans l'espace vide de charge et de courant ; onde plane progressive.	Citer les solutions de l'équation de d'Alembert à une dimension cartésienne. Décrire la structure d'une onde plane et d'une onde plane progressive dans l'espace vide de charge et de courant.
Densité volumique d'énergie électromagnétique, vecteur de Poynting et bilan d'énergie.	Citer et utiliser les expressions du vecteur de Poynting et de l'énergie électromagnétique volumique associés à un champ électromagnétique, en se limitant à des cas simples. Utiliser le flux du vecteur de Poynting à travers une surface orientée pour évaluer la puissance rayonnée pour une onde plane.

	Effectuer un bilan d'énergie sous forme globale pour une onde plane dans l'espace vide de charge et de courant.
Onde plane progressive monochromatique.	Expliquer le caractère idéal du modèle de l'onde plane progressive monochromatique. Citer les domaines du spectre des ondes électromagnétiques et leur associer des applications.
Exemple d'états de polarisation d'une onde plane progressive et monochromatique : polarisation rectiligne. Polariseurs rectilignes.	Identifier l'expression d'une onde plane polarisée rectilignement.  <b>Mettre en évidence une polarisation rectiligne.</b>
Réflexion sous incidence normale d'une onde plane, progressive et monochromatique polarisée rectilignement sur un plan conducteur parfait. Onde stationnaire.	Exploiter la nullité (admise) des champs dans un métal parfait. Établir l'expression de l'onde réfléchie en exploitant la relation de passage du champ électrique fournie. Caractériser une onde stationnaire.
Applications aux cavités à une dimension cartésienne. Mode d'onde stationnaire.	Établir la condition de quantification des solutions.  <b>Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique dans le domaine des ondes centimétriques.</b>

## 5. Transformations chimiques de la matière

Les transformations chimiques de la matière ont été abordées en classe de TSI1 et le critère d'évolution spontanée d'un système chimique en transformation y a été présenté sans être démontré. En TSI2, la fonction enthalpie libre et le potentiel chimique sont introduits dans la partie 1.2 « **Expression différentielle des principes thermodynamiques** » et exploités dans cette partie dont le but est d'appliquer les deux principes de la thermodynamique à la transformation physico-chimique afin, d'une part d'aborder les transferts thermiques, et, d'autre part d'établir puis exploiter le critère d'évolution spontanée d'un système.

Dans la partie 5.1 « **Thermodynamique d'un système siège d'une réaction chimique** », on adopte pour les potentiels chimiques une expression générale,  $\mu_i = \mu_{i,\text{réf}} + RT \ln(a_i)$ , qui fait référence aux activités  $a_i$  introduites en première année. L'établissement de cette expression est hors programme. L'influence de la pression sur le potentiel chimique d'un constituant en phase condensée pure n'est pas abordée. On se limite aux cas d'une espèce chimique pure, d'une espèce en solution aqueuse très diluée et d'une espèce en mélange de gaz parfaits avec référence à l'état standard.

Seules des transformations physico-chimiques monobares sont envisagées. Pour le calcul des grandeurs standard de réaction, les enthalpies et entropies standard de réaction sont supposées indépendantes de la température en dehors des changements d'états. Les grandeurs standard de réaction permettent la détermination, à une température donnée, de la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre caractéristique d'une réaction, valeur qui était systématiquement donnée en première année. C'est ainsi l'occasion de revenir sur la détermination de la composition d'un système physico-chimique en fin d'évolution.

La notion d'affinité chimique n'est pas utilisée, le sens d'évolution spontanée d'un système hors d'équilibre, à température et pression fixées, est déterminé par le signe de l'enthalpie libre de réaction.

Enfin, l'étude de la modification d'un paramètre (pression, température ou composition) sur l'évolution d'un système chimique et son état d'équilibre permet d'aborder la problématique de l'optimisation d'un procédé chimique.

Les illustrations et applications sont choisies dans le domaine industriel, dans la vie courante et au niveau du laboratoire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.1. Thermodynamique d'un système siège d'une réaction chimique.</b>	
Potentiel chimique dans les cas des modèles : - des gaz parfaits ; - d'un constituant en phase condensée pure ; - des solutions infiniment diluées.	Exprimer et utiliser le potentiel chimique d'un constituant. Déterminer la variation d'enthalpie libre d'un système physico-chimique entre deux états d'équilibre thermodynamique.
Grandeur de réaction. État standard. Enthalpie standard de réaction et entropie standard de réaction. Enthalpie standard de formation, état standard de référence d'un élément, entropie molaire standard absolue. Loi de Hess.	Relier entre elles les enthalpie, entropie et enthalpie libre de réaction. Déterminer l'enthalpie standard de réaction et l'entropie standard de réaction à l'aide de tables de données thermodynamiques. Associer le signe de l'enthalpie standard de réaction au caractère endothermique ou exothermique de la réaction. Justifier qualitativement ou prévoir le signe de l'entropie standard de réaction.
Effets thermiques pour une transformation monobare : transfert thermique associé à une transformation physico-chimique monobare et monotherme ; variation de température associée à une transformation physico-chimique monobare et adiabatique.	Évaluer la température atteinte par un système siège d'une transformation physico-chimique supposée monobare et adiabatique.  <b>Déterminer une enthalpie standard de réaction.</b>
Critère d'évolution, critère d'équilibre dans le cas d'un système chimique dont l'évolution spontanée est modélisée par une seule réaction isotherme et isobare.	Relier l'enthalpie libre de réaction à la constante thermodynamique d'équilibre et au quotient réactionnel. Prévoir le sens d'évolution d'un système chimique à partir de l'enthalpie libre de réaction.
Enthalpie libre standard de réaction. Relation de van 't Hoff.	Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à une température quelconque. Exploiter la relation de van 't Hoff fournie dans le cadre de l'approximation d'Ellingham.  <b>Déterminer l'évolution de la valeur d'une constante thermodynamique d'équilibre en fonction de la température.</b>
Optimisation d'un procédé chimique : par modification de la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre ; par modification de la valeur du quotient réactionnel.	Identifier les paramètres d'influence et leur contrôle pour optimiser une synthèse ou minimiser la formation d'un produit secondaire indésirable.  <u>Capacité numérique</u> : tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le taux d'avancement à l'équilibre en fonction de la température pour un système siège d'une transformation chimique modélisée par une seule réaction.

La partie 5.2 « **Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction** » se fonde sur les acquis de première année relatifs à l'étude des réactions d'oxydo-réduction et des piles, ainsi que sur la partie de thermodynamique chimique de seconde année pour relier les grandeurs thermodynamiques aux potentiels et potentiels standard.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.2 Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction.</b>	
Relation entre enthalpie libre de réaction et potentiels des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.	Citer et exploiter la relation entre l'enthalpie libre de réaction et les potentiels des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.
Relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard des couples impliqués.	Déterminer l'enthalpie libre standard d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples. Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple d'oxydo-réduction à partir de données thermodynamiques.
Approche thermodynamique du fonctionnement d'une pile électrochimique.	Établir l'inégalité reliant la variation d'enthalpie libre et le travail électrique. Relier la tension à vide d'une pile électrochimique et l'enthalpie libre de la réaction modélisant son fonctionnement. Décrire et expliquer le fonctionnement d'une pile électrochimique à partir de données sur sa constitution et de tables de potentiels standard.  <b>Déterminer une constante thermodynamique par l'étude de piles.</b>
Stockage et conversion d'énergie chimique.	<b>Étudier le fonctionnement d'une pile pour effectuer un bilan de matière.</b>

Dans la partie 5.3 « **diagrammes potentiel-pH** », ceux-ci sont exploités pour prévoir ou interpréter thermodynamiquement des transformations chimiques. Leur construction et leur utilisation pour déterminer des constantes thermodynamiques ne constituent pas des objectifs de formation. La confrontation avec la réalité amène à aborder éventuellement des blocages cinétiques en lien avec l'évolution temporelle des systèmes étudiée en première année.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.3. Diagrammes potentiel-pH.</b>	
Lecture et utilisation d'un diagramme potentiel-pH. Diagramme potentiel-pH de l'eau.	Identifier les différents domaines d'un diagramme potentiel-pH fourni associés à des espèces chimiques données. Prévoir une dismutation ou mediamutation en fonction du pH du milieu. Prévoir le caractère thermodynamiquement favorisé ou non d'une transformation par superposition de diagrammes. Prévoir la stabilité thermodynamique des espèces dans l'eau. Exploiter des diagrammes potentiel-pH pour expliquer les phénomènes de corrosion, de passivation et d'immunité.

	<b>Mettre en œuvre des réactions d'oxydoréduction en s'appuyant sur l'utilisation de diagrammes potentiel-pH.</b>
--	---

## Annexe 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en annexe 1 du programme de physique-chimie de TSI1. À elles deux, ces listes regroupent le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée. Une utilisation de matériel hors de ces listes lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une aide.

### 1. Domaine optique

- Polariseur.
- Capteur photographique numérique.

### 2. Domaine électrique

- Émetteur et récepteur dans le domaine des ondes centimétriques.

### 3. Domaine de la chimie

- Calorimètre.

## Annexe 2 : outils mathématiques

Les outils mathématiques dont la maîtrise est nécessaire à la mise en œuvre du programme de physique de la classe de TSI2 sont d'une part ceux qui figurent dans l'annexe 2 du programme de la classe de TSI1 et d'autre part ceux qui figurent dans la liste ci-dessous.

Le thème « analyse vectorielle » n'a pas fait l'objet d'une rubrique en première année. L'expression des différents opérateurs introduits sont exigibles en coordonnées cartésiennes. Les expressions des opérateurs en coordonnées cylindriques et sphériques et les formules d'analyse vectorielle ne sont pas exigibles ; elles doivent donc être systématiquement rappelées.

Dans le thème « équations aux dérivées partielles », aucune méthode générale d'étude n'est exigible : on se limite à chercher des solutions d'une forme donnée par substitution, menant ainsi soit à des équations différentielles classiques, soit à une relation de dispersion. L'accent est mis sur le rôle des conditions aux limites.

Les capacités relatives à la notion de différentielle d'une fonction de plusieurs variables sont limitées à l'essentiel, elles sont mobilisées principalement dans les cours de thermodynamique et de chimie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Géométrie</b>	
Systèmes de coordonnées.	Utiliser le système de coordonnées sphériques.
<b>2. Analyse vectorielle</b>	



## Deuxième partie

## Contenus thématiques

L'organisation des semestres est la suivante.

Premier semestre	
<b>Thème S – ondes et signaux</b>	8
S.1 Formation des images . . . . .	8
S.2 Signaux et composants électriques dans l'ARQS . . . . .	9
S.3 Circuits linéaires du premier ordre . . . . .	10
<b>Thème E – énergie : conversions et transferts</b>	11
E.1 Descriptions microscopique et macroscopique d'un système . . . . .	11
E.2 Bilans d'énergie pour un système thermodynamique . . . . .	12
<b>Thème M – mouvements et interactions</b>	13
M.1 Description et paramétrage du mouvement d'un point . . . . .	13
M.2 Lois de Newton . . . . .	13
M.3 Approche énergétique du mouvement d'un point matériel . . . . .	15
Second semestre	
<b>Thème M – mouvements et interactions</b>	15
M.4 Mouvement de particules chargées dans des champs électriques et magnétiques, uniformes et stationnaires	15
<b>Thème S – ondes et signaux</b>	16
S.4 Oscillateurs électriques et mécaniques en régime libre . . . . .	16
S.5 Régime sinusoïdal forcé . . . . .	17
S.6 Propagation d'un signal . . . . .	18
S.7 Induction électromagnétique . . . . .	19
<b>Thème E – énergie : conversions et transferts</b>	20
E.3 Statique des fluides . . . . .	20
E.4 Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire . . . . .	21
E.5 Machines thermiques . . . . .	22

## Premier semestre

## Thème S – ondes et signaux

## S.1 Formation des images

Dans cette partie, le professeur s'appuie sur les compétences expérimentales des étudiants dans le domaine de la formation des images pour mettre en évidence l'apport de la modélisation et d'une description algébrique du réel. De nombreuses applications technologiques peuvent être abordées; certaines sont précisées par le programme, d'autres sont laissées à la libre appréciation des enseignants (lunette, microscope, optique d'un smartphone, etc.).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Sources lumineuses</b> Modèle de la source ponctuelle monochromatique. Spectre	Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur. Caractériser une source lumineuse par son spectre.
<b>Modèle de l'optique géométrique</b> Modèle de l'optique géométrique. Notion de rayon lumineux. Indice d'un milieu transparent. Réflexion, réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Définir le modèle de l'optique géométrique. Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique. Établir la condition de réflexion totale.
<b>Conditions de l'approximation de Gauss et applications</b> Stigmatisme. Miroir plan.	Construire l'image d'un objet par un miroir plan.

Conditions de l'approximation de Gauss.	Énoncer les conditions de l'approximation de Gauss et ses conséquences. Relier le stigmatisme approché aux caractéristiques d'un détecteur.
Lentilles minces dans l'approximation de Gauss.	Définir les propriétés du centre optique, des foyers principaux et secondaires, de la distance focale, de la vergence. Construire l'image d'un objet situé à distance finie ou infinie à l'aide de rayons lumineux, identifier sa nature réelle ou virtuelle. Exploiter les formules de conjugaison et de grandissement transversal de Descartes et de Newton. Établir et utiliser la condition de formation de l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente. <b>Former l'image d'un objet dans des situations variées.</b>
<b>Modèles de quelques dispositifs optiques</b> L'œil. Punctum proximum, punctum remotum.	Modéliser l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur plan fixe. Citer les ordres de grandeur de la limite de résolution angulaire et de la plage d'accommodation.
L'appareil photographique.	Modéliser l'appareil photographique comme l'association d'une lentille et d'un capteur. Construire géométriquement la profondeur de champ pour un réglage donné. <b>Étudier l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image.</b>
Système optique à plusieurs lentilles.	<b>Modéliser, à l'aide de plusieurs lentilles, un dispositif optique d'utilisation courante.</b>

## S.2 Signaux et composants électriques dans l'ARQS

La partie « **S.2 Signaux et composants électriques dans l'ARQS** » pose les bases nécessaires à l'étude des circuits dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS). Si le programme se concentre sur l'étude des dipôles  $R$ ,  $L$  et  $C$ , il est possible, lors des travaux pratiques, de faire appel à des composants intégrés ou non linéaires (filtres à capacité commutée, échantillonneur-bloqueur, diodes, photorésistances, etc.) dès lors qu'aucune connaissance spécifique préalable n'est nécessaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Grandeurs électriques</b> Charge électrique, intensité du courant électrique. Régime continu, régime variable quasi-stationnaire. Potentiel, potentiel de référence, tension. Puissance électrique.	Exprimer l'intensité du courant électrique en termes de débit de charges électriques. Exprimer la condition d'application de l'ARQS en fonction de la taille du circuit et de la fréquence. Utiliser la loi des nœuds et la loi des mailles. Algébriser les grandeurs électriques et utiliser les conventions récepteur et générateur. Citer des ordres de grandeur d'intensités, de tensions et de puissances dans différents domaines d'application.
<b>Dipôles électriques usuels</b> Source de tension.	Modéliser une source en utilisant la représentation de Thévenin. <b>Évaluer la résistance de sortie d'une source de tension réelle.</b>
Système à comportement résistif.	Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans une résistance.

Association de deux résistances. Ponts diviseurs de tension et de courant.	Remplacer une association série ou parallèle de deux résistances par une résistance équivalente. Exploiter les relations des diviseurs de tension ou de courant. <b>Mettre en évidence l'influence de la résistance d'entrée d'un voltmètre ou d'un ampèremètre sur les valeurs mesurées.</b>
Système à comportement capacitif : modèle du condensateur idéal. Relation entre charge et tension; capacité d'un condensateur. Énergie stockée.	Relier l'intensité algébriquement reçue à la tension aux bornes d'un condensateur. Exploiter l'expression fournie de la capacité d'un condensateur en fonction de ses caractéristiques. Exprimer l'énergie stockée dans un condensateur.
Système à comportement inductif : modèle de la bobine idéale. Relation entre intensité et tension; inductance d'une bobine.	Relier l'intensité algébriquement reçue à la tension aux bornes d'une bobine. Exprimer l'énergie stockée dans une bobine.
Caractéristique d'un dipôle. Point de fonctionnement.	<b>Étudier la caractéristique d'un dipôle pouvant être non-linéaire et mettre en œuvre un capteur dans un dispositif expérimental.</b>

### S.3 Circuits linéaires du premier ordre

La partie « **S.3 Circuits linéaires du premier ordre** » est consacrée à l'étude de l'évolution temporelle transitoire vers un régime permanent d'un système linéaire du premier ordre soumis à un échelon de tension ou en régime libre. Cette partie amène à opérer une distinction entre les régimes transitoires et permanents, et, plus généralement, permet d'introduire le modèle du système linéaire du premier ordre et de faire émerger la notion essentielle de temps caractéristique d'évolution.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modèle du circuit $RC$ alimenté par une source idéale de tension constante. Charge et décharge d'un condensateur, temps caractéristique.	Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes du condensateur. Déterminer en fonction du temps la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge ou de sa décharge. Exploiter la continuité de la tension aux bornes d'un condensateur. Déterminer un ordre de grandeur de la durée d'un régime transitoire.
Modèle du circuit $RL$ série.	Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par l'intensité du courant dans le circuit. Exploiter la continuité du courant circulant dans une bobine. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire.
Capteurs capacitifs. Capteurs inductifs.	<b>Mettre en œuvre un capteur capacitif ou inductif et identifier les paramètres influençant ses performances.</b>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique sur le circuit $RC$ série. Réaliser un bilan énergétique sur le circuit $RL$ série.
Circuit du premier ordre à une ou deux mailles.	<b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un circuit linéaire du premier ordre dans un circuit comportant une ou deux mailles et analyser ses caractéristiques.</b> <b>Capacité numérique :</b> mettre en œuvre la méthode d'Euler à l'aide d'un langage de programmation pour simuler la réponse d'un système linéaire du premier ordre à une excitation de forme quelconque.

## Thème E – énergie : conversions et transferts

Cette partie propose, en introduction, une présentation de différents états de la matière. La description d'un état d'équilibre thermodynamique d'un système à l'aide d'un jeu réduit de variables d'état s'appuie sur les modèles usuels du gaz parfait et de la phase condensée peu dilatable et peu compressible, dont les limites sont cependant mentionnées par comparaison avec les propriétés physiques de systèmes réels.

Le premier principe de la thermodynamique est ensuite énoncé et permet d'établir les premiers bilans énergétiques, dont la formulation rigoureuse constitue un des objectifs de formation privilégiés. Les capacités identifiées doivent être introduites en s'appuyant, dès que possible, sur des dispositifs expérimentaux qui permettent leur acquisition progressive et authentique.

On utilise les notations suivantes : pour une grandeur extensive  $A$ ,  $a$  désigne la grandeur massique associée et  $A_m$  la grandeur molaire associée.

### E.1 Descriptions microscopique et macroscopique d'un système

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Les états de la matière</b> État solide, liquide et gazeux. Échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique. Distance moyenne entre particules.</p>	<p>Définir et caractériser les différents états de la matière. Définir l'échelle mésoscopique et en expliquer la nécessité. Citer quelques ordres de grandeur de distances moyennes entre entités dans un solide, un liquide et un gaz.</p>
<p>Système thermodynamique.</p>	<p>Identifier un système ouvert, un système fermé, un système isolé.</p>
<p>État d'équilibre thermodynamique et variables d'état.</p>	<p>Présenter les paramètres usuellement utilisés pour la description d'un système thermodynamique : pression, température, volume, densité volumique de particules, masse volumique. Associer qualitativement la pression aux propriétés physiques du système à l'échelle microscopique. Calculer une pression à partir d'une condition d'équilibre mécanique. Dédire une température d'une condition d'équilibre thermique.</p>
<p><b>Gaz parfait</b> Modèle du gaz parfait.</p>	<p>Comparer le comportement d'un gaz réel au modèle du gaz parfait sur des réseaux d'isothermes expérimentales en coordonnées de Clapeyron ou d'Amagat.</p>
<p>Équation d'état du gaz parfait.</p>	<p>Citer quelques ordres de grandeur de volumes molaires ou massiques dans les conditions usuelles de pression et de température. Citer et exploiter l'équation d'état des gaz parfaits.</p>
<p>Mélange idéal de gaz parfaits. Pression partielle. Loi de Dalton.</p>	<p>Donner la définition de la pression partielle. Exploiter la loi de Dalton.</p>
<p>Énergie interne du gaz parfait. Capacité thermique à volume constant d'un gaz considéré comme parfait.</p>	<p>Exprimer la variation de l'énergie interne d'un gaz parfait en fonction de la variation de température, la capacité thermique à volume constant étant donnée.</p>
<p><b>Phase condensée peu dilatable et peu compressible</b> Modèle de la phase condensée peu dilatable et peu compressible.</p>	<p>Interpréter graphiquement la différence de compressibilité entre un liquide et un gaz à partir d'isothermes expérimentales.</p>
<p>Énergie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée peu dilatable et peu compressible.</p>	<p>Exprimer la variation de l'énergie interne d'une phase condensée peu dilatable et peu compressible en fonction de la variation de température, la capacité thermique à volume constant étant donnée.</p>
<p><b>Description d'un corps pur en équilibre diphasé</b></p>	

<p>Corps pur en équilibre diphasé. Diagramme de phases (<math>P, T</math>), point critique, point triple.</p> <p>Cas particulier de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme de Clapeyron (<math>P, v</math>), pression de vapeur saturante, titre en vapeur.</p>	<p>Analyser un diagramme de phases expérimental (<math>P, T</math>) et nommer les différents changements de phase.</p> <p>Positionner les différentes phases d'un corps pur dans les diagrammes (<math>P, T</math>) et (<math>P, v</math>).</p> <p>Déterminer la composition d'un mélange diphasé en un point d'un diagramme (<math>P, v</math>).</p>
---	---

## E.2 Bilans d'énergie pour un système thermodynamique

Cette partie, centrée sur le premier principe de la thermodynamique, aborde les bilans d'énergie. Les relations entre variables d'état thermodynamiques considérées dans cette partie se limitent exclusivement à celles qui relèvent du modèle du gaz parfait ou du modèle de la phase condensée peu dilatable et peu compressible. La loi de Laplace qui caractérise l'évolution adiabatique et réversible d'un gaz parfait n'est pas exigible, pas plus que ses conditions de validité. Elle peut néanmoins être utilisée à condition d'être fournie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Transformations thermodynamiques</b></p> <p>Transformation thermodynamique d'un système.</p> <p>Transformations isochore, isobare et monobare.</p> <p>Thermostat, transformations monotherme et isotherme.</p>	<p>Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur au système pour déterminer l'état d'équilibre final.</p> <p>Identifier dans une situation expérimentale le ou les systèmes qui peuvent être modélisés par un thermostat ou dont la pression peut être supposée constante.</p>
<p><b>Premier principe de la thermodynamique. Bilans d'énergie.</b></p> <p>Premier principe de la thermodynamique.</p>	<p>Utiliser le premier principe de la thermodynamique entre deux états d'équilibre thermodynamique.</p> <p>Exploiter les propriétés d'extensivité et de fonction d'état de l'énergie interne.</p>
<p><b>Travail</b></p> <p>Travail des forces de pression.</p>	<p>Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable.</p> <p>Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron ou de Watt.</p>
<p><b>Transferts thermiques</b></p> <p>Modes de transferts thermiques.</p> <p>Puissance thermique proportionnelle à l'écart des températures du système étudié et du milieu extérieur au système.</p> <p>Modélisation de l'évolution de la température d'un système considéré comme peu compressible et peu dilatable au contact d'un thermostat.</p>	<p>Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection et rayonnement.</p> <p>Interpréter qualitativement le signe de la puissance thermique reçue par le système en fonction du signe de l'écart des températures du système étudié et du milieu extérieur au système.</p> <p>Effectuer un bilan d'énergie pour un système considéré comme peu compressible et peu dilatable en contact avec un thermostat : établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la température du système.</p>
<p><b>Fonction d'état enthalpie</b></p> <p>Fonction d'état enthalpie ; capacité thermique à pression constante d'un gaz parfait et d'une phase condensée peu compressible et peu dilatable.</p>	<p>Exprimer le premier principe de la thermodynamique sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final.</p> <p>Exploiter les propriétés d'extensivité et de fonction d'état de l'enthalpie.</p> <p>Exprimer la variation d'enthalpie d'un gaz parfait ou d'une phase condensée peu dilatable et peu compressible en fonction de la variation de température, la capacité thermique à pression constante étant donnée.</p> <p>Citer la valeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.</p>

Enthalpie massique de fusion, de vaporisation et de sublimation. Variation d'enthalpie associée à un changement d'état.	Réaliser un bilan énergétique en prenant en compte des changements d'état. Citer les ordres de grandeur de l'enthalpie massique de fusion et de vaporisation de l'eau. <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie massique de changement d'état, etc.).</b>
---	---

## Thème M – mouvements et interactions

### M.1 Description et paramétrage du mouvement d'un point

La partie « **M.1 Description et paramétrage du mouvement d'un point** » vise notamment à mettre en place les principaux systèmes de coordonnées : cartésiennes, polaires, cylindriques et sphériques. Le but est de permettre aux étudiants de disposer d'outils efficaces pour décrire une grande variété de mouvements de points. Pour atteindre cet objectif, il convient de les familiariser progressivement avec les projections et dérivations de vecteurs ainsi qu'avec l'algébrisation des grandeurs dans un contexte relevant de la physique. Enfin, cette partie est l'occasion de procéder à des analyses qualitatives des comportements cinématiques de systèmes réels assimilés à un point, notamment sur les exemples simples des mouvements rectilignes et circulaires.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Repérage dans l'espace et dans le temps</b> Espace et temps classiques. Notion de référentiel. Caractère relatif du mouvement. Caractère absolu des distances et des intervalles de temps.	Citer une situation où la description classique de l'espace ou du temps est prise en défaut.
<b>Cinématique du point</b> Description du mouvement d'un point. Vecteurs position, vitesse et accélération. Systèmes de coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques.	Exprimer à partir d'un schéma le déplacement élémentaire dans les différents systèmes de coordonnées, construire le trièdre local associé et en déduire géométriquement les composantes du vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes et cylindriques. Établir les expressions des composantes des vecteurs position, déplacement élémentaire, vitesse et accélération dans les seuls cas des coordonnées cartésiennes et cylindriques. Identifier les degrés de liberté du mouvement. Choisir un système de coordonnées adapté au problème.
Mouvement à vecteur accélération constant.	Exprimer le vecteur vitesse et le vecteur position en fonction du temps. Établir l'expression de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.
Mouvement circulaire uniforme et non uniforme.	Exprimer les composantes du vecteur position, du vecteur vitesse et du vecteur accélération en coordonnées polaires planes.
Repérage d'un point dont la trajectoire est connue.	Situer qualitativement la direction du vecteur vitesse et du vecteur accélération pour une trajectoire plane. <b>Réaliser et exploiter quantitativement un enregistrement vidéo d'un mouvement : évolution temporelle des vecteurs vitesse et accélération.</b>

### M.2 Lois de Newton

Dans la partie « **M.2 Lois de Newton** », on cherche d'abord à renforcer les compétences des étudiants relatives à la mise en équations d'un problème, qu'il s'agisse des étapes de bilan des actions mécaniques, de représentation de la situation étudiée par un schéma adapté, de projection de la deuxième loi de Newton sur la base choisie, ou de résolution des équations

du mouvement. On cherche par ailleurs, sur l'exemple de quelques mouvements simples, à renforcer les compétences d'analyse qualitative d'une équation différentielle : stabilité des solutions, positions d'équilibre, type d'évolution, durée ou période typique d'évolution, etc. Cette pratique s'articule avec l'utilisation d'un langage de programmation pour résoudre des équations différentielles. Enfin, il s'agit aussi de confronter les étudiants aux limites de validité de certains modèles de forces, et ainsi de donner toute leur importance aux étapes de modélisation et de validation d'un modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Quantité de mouvement</b> Masse d'un système matériel. Conservation de la masse pour un système fermé.</p>	Exploiter la conservation de la masse pour un système matériel fermé.
Quantité de mouvement d'un système matériel. Lien avec la vitesse du centre de masse d'un système fermé.	Réduire le mouvement d'un système matériel à celui d'un point. Écrire la quantité de mouvement d'un système matériel en fonction de la vitesse de son centre de masse : $\vec{p} = m\vec{v}(G)$
Première loi de Newton : principe d'inertie. Référentiels galiléens.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens.
Modélisation d'une action mécanique par une force. Troisième loi de Newton.	Établir un bilan des actions mécaniques sur un système ou sur plusieurs systèmes en interaction et en rendre compte en représentant les forces associées sur un schéma adapté.
Deuxième loi de Newton. Théorème de la quantité de mouvement.	Déterminer les équations du mouvement d'un point matériel ou du centre de masse d'un système matériel fermé dans un référentiel galiléen. <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier une loi de force.</b>
Force de gravitation. Modèle du champ de pesanteur uniforme au voisinage de la surface d'une planète. Mouvement dans le champ de pesanteur uniforme.	Étudier le mouvement d'un système modélisé par un point matériel dans un champ de pesanteur uniforme en l'absence de frottement.
Modèles d'une force de frottement fluide. Influence de la résistance de l'air sur un mouvement de chute.	Exploiter, sans la résoudre analytiquement, une équation différentielle : analyse en ordres de grandeur, détermination de la vitesse limite, utilisation des résultats obtenus par simulation numérique. <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides.</b>
Modèle linéaire de l'élasticité d'un matériau.	Modéliser un comportement élastique par une loi de force linéaire; extraire une constante de raideur et une longueur à vide à partir de données mesurées ou fournies. Analyser la limite d'une modélisation linéaire à partir de documents expérimentaux. <b>Mettre en œuvre un microcontrôleur lors d'un test de traction.</b>
Système masse-ressort en l'absence de frottement. Pulsation propre.	Établir l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique; la résoudre compte tenu des conditions initiales. Identifier l'expression de la pulsation propre dans l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique. Caractériser le mouvement en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation.
Tension d'un fil. Pendule simple.	Établir l'équation du mouvement du pendule simple. Justifier l'analogie avec l'oscillateur harmonique dans le cadre de l'approximation linéaire.
Modèle des lois de frottement de glissement : lois de Coulomb.	Exploiter les lois de Coulomb fournies dans les trois situations : équilibre, mise en mouvement, freinage. Formuler une hypothèse (quant au glissement ou non) et la valider.

### M.3 Approche énergétique du mouvement d'un point matériel

La partie « **M.3 Approche énergétique du mouvement d'un point matériel** » vise à construire une démarche alternative et complémentaire pour l'étude d'une situation relevant de la mécanique – et plus généralement de la physique – fondée sur la conservation de certaines grandeurs – ici, l'énergie mécanique. Cette approche est l'occasion d'illustrer la capacité prédictive des analyses graphiques et numériques, par exemple pour pouvoir décrire un comportement à partir d'une représentation graphique de l'énergie potentielle dans le cas d'un mouvement conservatif.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Puissance, travail et énergie cinétique</b> Puissance et travail d'une force dans un référentiel. Théorèmes de l'énergie cinétique et de la puissance cinétique dans un référentiel galiléen, dans le cas d'un système modélisé par un point matériel.</p>	<p>Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force. Utiliser le théorème approprié en fonction du contexte.</p>
<p><b>Champ de force conservative et énergie potentielle</b> Énergie potentielle. Lien entre un champ de force conservative et l'énergie potentielle.</p>	<p>Établir et citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur (champ uniforme), de l'énergie potentielle gravitationnelle (champ créé par un astre ponctuel) et de l'énergie potentielle élastique. Déterminer l'expression d'une force à partir de l'énergie potentielle pour un système à un degré de liberté. Dédire qualitativement, en un point du graphe d'une fonction énergie potentielle, le sens et l'intensité de la force associée.</p>
<p><b>Énergie mécanique</b> Énergie mécanique. Théorème de l'énergie mécanique. Mouvement conservatif.</p>	<p>Distinguer force conservative et force non conservative. Justifier et exploiter la conservation de l'énergie mécanique. Utiliser les conditions initiales.</p>
<p>Mouvement conservatif à une dimension.</p>	<p>Identifier sur un graphe d'énergie potentielle une barrière et un puits de potentiel. Dédire d'un graphe d'énergie potentielle le comportement qualitatif : trajectoire bornée ou non, mouvement périodique, positions de vitesse nulle.</p>
<p>Positions d'équilibre. Stabilité.</p>	<p>Dédire d'un graphe d'énergie potentielle l'existence de positions d'équilibre. Analyser qualitativement la nature, stable ou instable, de ces positions.</p>
<p>Petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre stable, approximation locale par un puits de potentiel harmonique.</p>	<p>Établir l'équation différentielle du mouvement au voisinage d'une position d'équilibre stable. <b>Capacité numérique</b> : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre numériquement une équation différentielle du deuxième ordre non-linéaire et faire apparaître l'effet des termes non-linéaires.</p>

## Second semestre

### Thème M – mouvements et interactions

#### M.4 Mouvement de particules chargées dans des champs électriques et magnétiques, uniformes et stationnaires

Dans cette partie, l'accent est d'abord porté sur la production d'un champ électrique ou magnétique. L'examen de cartes de champs électrostatiques et magnétostatiques permet non seulement de localiser leurs sources dont la nature physique (charge ou courant électrique) est affirmée, mais aussi d'identifier les zones de l'espace où le champ, électrostatique ou magnétostatique, peut être modélisé par un champ uniforme. Cette approche prépare l'étude plus approfondie de l'électrostatique et de la magnétostatique menée en seconde année.

L'introduction de la force de Lorentz est ensuite le point de départ pour l'étude du mouvement d'une particule chargée



dans un champ électrique ou magnétique, uniforme et stationnaire, en évitant tout développement calculatoire excessif. Grâce à l'examen de situations concrètes et motivantes, les étudiants sont amenés à analyser des trajectoires, à conduire une réflexion sur les moyens qui peuvent être mis en œuvre pour accélérer une particule chargée. Cette étude peut être articulée avec celle menée en chimie au sujet de la spectrométrie de masse.

#### M.4.1 Champs électrique et magnétique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Champ électrique</b> Sources de champ électrique; cartes de champ électrique.	Tracer l'allure des cartes de champ électrique pour une charge ponctuelle et un condensateur plan. Identifier sur une carte de champ électrique les zones où le champ peut être modélisé par un champ uniforme. Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ électrique à partir d'expressions fournies. Citer l'ordre de grandeur de la rigidité diélectrique de l'air sec.
<b>Champ magnétique</b> Sources de champ magnétique; cartes de champ magnétique.	Tracer l'allure des cartes de champs magnétiques pour un aimant droit, une spire circulaire et une bobine longue. Identifier sur une carte de champ magnétique les zones où le champ peut être modélisé par un champ uniforme. Évaluer l'ordre de grandeur d'un champ magnétique à partir d'expressions fournies. Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre.

#### M.4.2 Mouvement de particules chargées

Notions et contenus	Capacités exigibles
Force de Lorentz exercée sur une particule chargée.	Évaluer les ordres de grandeur des forces électrique ou magnétique et les comparer à ceux des forces gravitationnelles.
Puissance de la force de Lorentz.	Justifier qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.
Énergie potentielle d'une charge soumise à un champ électrique.	Exprimer l'énergie potentielle d'une particule chargée en fonction de sa charge et du potentiel électrique.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme.	Mettre en équation le mouvement et le caractériser comme un mouvement à vecteur accélération constant. Effectuer un bilan énergétique pour déterminer la valeur de la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiel.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétostatique uniforme dans le cas où le vecteur vitesse initial est perpendiculaire au champ magnétostatique.	Déterminer le rayon de la trajectoire et le sens de parcours.

## Thème S – ondes et signaux

### S.4 Oscillateurs électriques et mécaniques en régime libre

Dans le prolongement des parties **M.2** et **S.3**, on aborde désormais l'étude temporelle de systèmes du deuxième ordre, en prenant en compte des effets dissipatifs. L'oscillateur *LC* est d'abord introduit de manière à mettre l'accent sur l'universalité du modèle de l'oscillateur harmonique. L'étude conjointe des oscillateurs amortis mécaniques et électriques s'ap-

puie sur leur analogie formelle et de comportement. L'approche énergétique peut aussi donner l'occasion de déterminer l'équation différentielle caractéristique de l'évolution temporelle d'un oscillateur harmonique à partir de la propriété de conservation de son énergie, qu'il soit de nature électrique ou mécanique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Oscillateurs harmoniques</b> Modèle du circuit $LC$ .	Établir l'équation différentielle qui caractérise un circuit $LC$ ; la résoudre compte tenu des conditions initiales. Identifier l'expression de la pulsation propre dans l'équation différentielle d'un circuit $LC$ .
<b>Oscillateurs amortis</b> Modèles du circuit $RLC$ série et de l'oscillateur mécanique amorti par frottement visqueux.	Analyser, sur des relevés expérimentaux, l'évolution de la forme des régimes transitoires en fonction des paramètres caractéristiques. Prévoir qualitativement l'évolution du système à partir de considérations énergétiques. Écrire sous forme canonique l'équation différentielle afin d'identifier la pulsation propre et le facteur de qualité. Décrire la nature de la réponse en fonction de la valeur du facteur de qualité. Déterminer la réponse détaillée dans le cas d'un régime libre ou indiciel en recherchant les racines du polynôme caractéristique et en tenant compte des conditions initiales. Déterminer un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire selon la valeur du facteur de qualité. <b>Mettre en évidence la similitude des comportements des oscillateurs mécanique et électrique.</b> <b>Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un système linéaire du deuxième ordre et analyser ses caractéristiques.</b>
Stockage et dissipation d'énergie.	Réaliser un bilan énergétique.

## S.5 Régime sinusoïdal forcé

La partie « S.5 Régime sinusoïdal forcé » est l'occasion d'introduire les notions d'impédance et de résonance. En lien avec la partie S.4, le professeur est invité à signaler l'existence d'analogies comportementales avec des situations relevant du domaine de la mécanique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Régime sinusoïdal forcé. Description du comportement d'un dipôle en régime sinusoïdal forcé. Impédance complexe.	Identifier une situation de régime sinusoïdal forcé. Utiliser la représentation complexe des signaux pour étudier le régime forcé. Interpréter physiquement le module et l'argument de l'impédance complexe d'un dipôle. Établir l'expression de l'impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine.
Association de deux impédances.	Remplacer une association série ou parallèle de deux impédances par une impédance équivalente.
Oscillateurs électriques soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance.	Relier qualitativement l'acuité d'une résonance au facteur de qualité. Déterminer la pulsation propre et le facteur de qualité à partir de graphes expérimentaux d'amplitude et de phase. <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental visant à caractériser un phénomène de résonance.</b>

## S.6 Propagation d'un signal

Dans la partie « **S.6 Propagation d'un signal** », il est recommandé de s'appuyer sur une approche expérimentale ou sur des logiciels de simulation pour permettre aux étudiants de faire le lien entre l'observation de signaux qui se propagent et la traduction mathématique de cette propagation, sans qu'aucune référence ne soit faite à une équation d'onde. L'étude de la somme de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence et du phénomène d'interférences associé permet de mettre en évidence le rôle essentiel joué par la différence de phase entre les deux signaux dans le signal résultant. L'étude des interférences lumineuses est l'occasion d'introduire la notion de différence de chemin optique et de la relier à la différence de phase. Les ondes stationnaires permettent d'illustrer le rôle des conditions aux limites dans l'apparition de modes propres.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Exemples de signaux.	Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, mécaniques, électromagnétiques.
<p><b>Propagation d'un signal dans un milieu illimité, non dispersif et transparent</b></p> <p>Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle non dispersive. Célérité, retard temporel.</p>	<p>Écrire les signaux sous la forme <math>f(x - ct)</math> ou <math>g(x + ct)</math>. Écrire les signaux sous la forme <math>f(t - x/c)</math> ou <math>g(t + x/c)</math>. Prévoir, dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle à position fixée et l'évolution spatiale à différents instants.</p>
<p>Modèle de l'onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle. Phase, phase à l'origine, vitesse de phase, double périodicité spatiale et temporelle.</p>	<p>Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique, mécanique et électromagnétique. Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de phase. Relier la différence de phase entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation. <b>Mesurer la vitesse de phase, la longueur d'onde et la différence de phase dues à la propagation d'un phénomène ondulatoire.</b></p>
<p><b>Phénomène d'interférences</b></p> <p>Interférences de deux ondes de même fréquence. Interférences constructives, interférences destructives.</p>	<p>Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes. Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène. Déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction de la différence de phase. <b>Capacité numérique :</b> représenter, à l'aide d'un langage de programmation, la somme de deux signaux sinusoïdaux périodiques synchrones en faisant varier la phase à l'origine de l'un des deux.</p>
<p>Interférences de deux ondes lumineuses de même fréquence, différence de chemin optique. Exemple du dispositif des trous de Young éclairé par une source monochromatique.</p>	<p>Déterminer les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous de Young. Relier la différence de phase entre les deux ondes à la différence de chemin optique. Établir l'expression littérale de la différence de chemin optique linéarisée entre les deux ondes. Établir l'expression de l'interfrange. <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser le phénomène d'interférences de deux ondes.</b></p>
<b>Ondes stationnaires mécaniques</b>	

Modes propres.	<p>Caractériser une onde stationnaire par l'existence de nœuds et de ventres.</p> <p>Exprimer les fréquences des modes propres connaissant la célérité et la longueur de la corde.</p> <p>Utiliser la propriété énonçant qu'une vibration quelconque d'une corde accrochée entre deux extrémités fixes se décompose en modes propres.</p> <p>Relier les notions sur les ondes stationnaires avec celles utilisées en musique.</p> <p><b>Décrire une onde stationnaire observée par stroboscopie sur la corde de Melde.</b></p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant d'analyser le spectre du signal acoustique produit par une corde vibrante.</b></p> <p><b>Capacité numérique :</b> représenter, à l'aide d'un langage de programmation, une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de celle du fondamental.</p>
----------------	---

## S.7 Induction électromagnétique

### S.7.1 Lois de l'induction

Cette partie repose intégralement sur la loi de Faraday, qui se prête parfaitement à une introduction expérimentale et qui constitue un bel exemple d'illustration de l'histoire des sciences. On évoque, à ce sujet, les différentes descriptions possibles d'un même phénomène selon le référentiel dans lequel on se place pour le modéliser.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Flux d'un champ magnétique</b></p> <p>Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.</p>	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
<p><b>Loi de Faraday</b></p> <p>Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.</p>	<b>Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.</b>
Loi de modulation de Lenz.	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Force électromotrice induite, loi de Faraday.	Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

### S.7.2 Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps

Dans la continuité de l'introduction de la loi de Faraday, on aborde le phénomène d'auto-induction, puis le couplage par mutuelle inductance entre deux circuits fixes. Le transformateur de tension est présenté comme un exemple concret de système exploitant ce couplage.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Auto-induction</b></p> <p>Flux propre et inductance propre.</p>	<p>Différencier le flux propre des flux extérieurs.</p> <p>Utiliser la loi de modulation de Lenz.</p> <p>Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.</p> <p><b>Mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine.</b></p>
Étude énergétique.	Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.

<b>Cas de deux bobines en interaction</b> Inductance mutuelle entre deux bobines.	Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale ». <b>Mesurer la valeur de l'inductance mutuelle entre deux bobines et étudier l'influence de la géométrie.</b>
Circuits électriques à une maille couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.	Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.
Transformateur de tension. Étude énergétique.	Établir la loi des tensions. Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.

### S.7.3 Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire

La conversion de puissance électromécanique constitue le cœur de cette partie, dans laquelle le professeur est libre d'introduire la force de Laplace avec ou sans référence à la force de Lorentz. L'objectif est de se doter d'expressions opérationnelles pour pouvoir étudier le mouvement d'une barre en translation dans un champ magnétique uniforme et stationnaire. Cette situation, simple sur plan géométrique, permet de dégager les concepts et les paramètres physiques pertinents pour la modélisation des convertisseurs électromécaniques, dont le haut-parleur électrodynamique fait figure d'exemple de référence.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Force de Laplace</b> Densité linéique de la force de Laplace dans le cas d'un élément de courant filiforme. Résultante et puissance de la force de Laplace.	Distinguer le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme. Établir et exploiter l'expression de la résultante de la force de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire. Exprimer la puissance de la force de Laplace.
<b>Conversion de puissance mécanique en puissance électrique</b> Rail de Laplace. Freinage par induction.	Interpréter qualitativement les phénomènes observés. Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. Effectuer un bilan énergétique. Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. Expliquer l'origine des courants de Foucault et en citer des exemples d'utilisation.
<b>Conversion de puissance électrique en puissance mécanique</b> Haut-parleur électrodynamique.	Analyser le fonctionnement du haut-parleur électrodynamique en s'appuyant sur la configuration des rails de Laplace. Réaliser un bilan énergétique. <b>Mettre en œuvre une étude expérimentale d'un haut-parleur électrodynamique visant à illustrer son principe de fonctionnement ou à déterminer quelques-unes de ses caractéristiques.</b>

## Thème E – énergie : conversions et transferts

### E.3 Statique des fluides

La partie « E.3 Statique des fluides » s'organise en deux sous-parties. L'établissement de la relation fondamentale de la statique des fluides donne l'occasion de mettre en œuvre un raisonnement à l'échelle locale de la particule de fluide. Il

convient d'insister sur le principe du découpage d'un domaine physique (volume, surface) en éléments infinitésimaux et de la sommation d'une grandeur extensive (force) pour ce découpage. La notion de gradient d'un champ scalaire est hors programme. L'étude d'un fluide à l'équilibre hydrostatique dans le champ de pesanteur est ensuite conduite à l'aide de deux exemples : le modèle de l'atmosphère isotherme et la modélisation du champ de pression dans un fluide considéré comme incompressible. L'utilisation de l'outil numérique permet d'aller au-delà de ces modèles introductifs pour s'approcher d'une description plus réaliste.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Pression dans un fluide au repos</b> Forces volumiques, forces surfaciques. Résultante de forces de pression sur une surface.	Citer des exemples de forces surfaciques ou volumiques. Utiliser les symétries pour déterminer la direction d'une résultante de forces de pression. Déterminer l'expression ou la valeur de la résultante des forces de pression sur une surface plane.
Statique des fluides dans le champ de pesanteur uniforme.	Établir la relation $\frac{dP}{dz} = \pm \rho g$ .
<b>Équilibre hydrostatique dans le champ de pesanteur terrestre</b> Modèle de l'atmosphère isotherme. Échelle de hauteur caractéristique de variation de la pression.	Établir l'expression de la pression en fonction de l'altitude dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait. Citer la valeur de la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer. <b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation, étudier les variations de température et de pression dans l'atmosphère.
Distribution de pression dans un fluide homogène incompressible.	Établir l'expression de la pression en fonction de la profondeur dans le cas d'un fluide incompressible.
Poussée d'Archimède.	Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède.

#### E.4 Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire

La partie « E.4 Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire » s'appuie sur les compétences développées par les étudiants dans la voie technologique du lycée. Il s'agit ici d'introduire les outils théoriques nécessaires à la description de systèmes hydrauliques sur le plan énergétique. Le premier principe de la thermodynamique est appliqué à l'étude de l'écoulement stationnaire d'un fluide dans un système hydraulique. Sa démonstration permet non seulement de comprendre pourquoi la fonction d'état enthalpie intervient mais aussi d'insister sur le fait que les différentes variations sont calculées entre l'entrée et la sortie du système. Pour autant, cette démonstration n'est pas exigible des étudiants. La relation de Bernoulli est admise dans le cas particulier de l'écoulement adiabatique et stationnaire d'un fluide considéré comme incompressible, la parenté de sa formulation avec le premier principe appliqué à l'étude de l'écoulement stationnaire d'un fluide étant soulignée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Bilans de masse. Débit de masse. Conservation du débit de masse pour un écoulement stationnaire.	Établir et exploiter un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert ou fermé adapté.
<b>Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire</b> Premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire dans un système muni d'une seule entrée et d'une seule sortie. Travail utile et transfert thermique massiques.	Exploiter le premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire, en termes de grandeurs massiques, notamment pour l'étude d'un détendeur, d'un compresseur, d'une turbine, d'un échangeur thermique.
Diagramme $(P, h)$ d'un fluide réel.	Repérer l'état thermodynamique d'un fluide par un point sur le diagramme. Décrire qualitativement ou quantitativement l'état thermodynamique d'un fluide repéré par un point du diagramme.

**Cas particulier de l'écoulement adiabatique et stationnaire d'un fluide considéré comme incompressible.**

Relation de Bernoulli pour l'écoulement adiabatique et stationnaire d'un fluide considéré comme incompressible dans un système muni d'une seule entrée et d'une seule sortie.

Exploiter la relation de Bernoulli, fournie sous la forme  $\frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) \pm g(z_2 - z_1) = w_u$ , en procédant, le cas échéant, à la simplification de termes négligeables.

**E.5 Machines thermiques**

La partie « **E.5 Machines thermiques** » se limite à la modélisation du fonctionnement d'une machine thermique par une évolution cyclique ditherme. Elle s'inscrit dans le prolongement de la section E.4 où sont étudiés, sur le plan énergétique, différents éléments hydrauliques constitutifs de machines thermiques réelles. La limitation de la performance d'une machine thermique imposée par le second principe de la thermodynamique, vu en deuxième année, est abordée grâce à l'inégalité de Clausius, admise à ce stade de la formation des étudiants. Le recours au diagramme  $(P, h)$  d'un fluide réel permet d'étudier des situations concrètes, de se libérer de calculs excessifs et de s'interroger sur les limites des modèles de fluides idéalisés. Les diagrammes  $(T, s)$  sont hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Application du premier principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes. Rendement, efficacité.	Décrire le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Étudier des propriétés des machines thermiques réelles à l'aide de diagrammes $(P, h)$ . Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle. Citer quelques ordres de grandeur des rendements ou efficacités des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération.
Inégalité de Clausius. Limitation du rendement ou de l'efficacité d'une machine thermique cyclique ditherme.	Exploiter l'inégalité de Clausius fournie. Identifier quelques phénomènes physiques responsables de la limitation du rendement ou de l'efficacité d'une machine thermique.

## Deuxième partie

## Contenus thématiques

L'organisation des semestres est la suivante.

## Premier semestre

<b>1. Transformations de la matière</b>	9
1.1 Description et évolution d'un système vers un état final lors d'une transformation chimique . . . . .	10
1.2 Évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation chimique . . . . .	11
<b>2. Relations entre structure des entités chimiques, propriétés physiques et réactivité</b>	12
2.1 Structure des entités chimiques . . . . .	12
2.2 Relations entre structure des entités chimiques et propriétés physiques macroscopiques . . . . .	13
2.3 Réactivité des espèces organiques et premières applications en synthèse . . . . .	14
<b>3. Structures microscopiques et propriétés physiques des solides</b>	16

## Deuxième semestre

<b>4. Transformations de la matière</b>	18
4.1 Évolution d'un système et mécanisme réactionnel . . . . .	18
4.2 Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques . . . . .	19
<b>5. Transformations chimiques en solution aqueuse</b>	19
5.1 Réactions acide-base et de précipitation . . . . .	19
5.2 Réactions d'oxydo-réduction . . . . .	20
<b>6. Réactivité, transformations en chimie organique et stratégie de synthèse</b>	21
6.1 Techniques spectroscopiques de caractérisation . . . . .	22
6.2 Réactions d'oxydo-réduction en chimie organique . . . . .	23
6.3 Activation de groupes caractéristiques . . . . .	23
6.4 Protection de groupes caractéristiques et stratégie de synthèse . . . . .	24

## Premier semestre

## 1. Transformations de la matière

L'objectif de cette partie est d'amener les étudiants à mobiliser de manière autonome les notions et modèles pour décrire, au niveau macroscopique, un système physico-chimique et son évolution. Il convient que les problématiques abordées, les illustrations et les applications prennent largement appui sur des transformations chimiques rencontrées dans la vie courante, au laboratoire, en milieu industriel ou dans le monde du vivant.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- décrire un système physico-chimique avec méthode et en utilisant un vocabulaire scientifique précis;
- effectuer une distinction entre les mondes des objets et des phénomènes (systèmes physico-chimiques, transformations chimiques) et le monde des modèles (réaction chimique comme modèle d'une transformation, lois d'évolution temporelle comme modèle macroscopique de l'évolution);
- exploiter les outils de description ou d'analyse expérimentale des systèmes chimiques pour modéliser leur évolution;
- proposer des approximations simplifiant l'exploitation quantitative de données expérimentales et en vérifier la pertinence;
- confronter les prévisions d'un modèle avec des résultats expérimentaux;
- traduire, en langage de programmation, les démarches mises en œuvre pour déterminer l'état final d'un système ou pour exploiter des résultats expérimentaux et les confronter à des modèles.



## 1.1 Description et évolution d'un système vers un état final lors d'une transformation chimique

Les concepts développés dans cette partie permettent d'envisager l'optimisation des synthèses ou des analyses, tout à la fois pour obtenir davantage de produit désiré, réduire des produits secondaires non désirés ou favoriser une réaction support d'une analyse.

L'étude quantitative de l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique, est réalisée à partir d'une modélisation par une seule réaction chimique symbolisée par une équation de réaction à laquelle est associée une constante thermodynamique d'équilibre. Il s'agit de prévoir le sens d'évolution de systèmes homogènes ou hétérogènes et de déterminer leur composition dans l'état final.

L'utilisation d'un langage de programmation permet l'étude, le cas échéant, d'un système siège d'une transformation chimique modélisée par une réaction unique et pour lequel la résolution analytique exacte est difficile.

Les compétences relatives à cette partie du programme sont ensuite mobilisées régulièrement au cours de l'année, plus particulièrement au second semestre lors des transformations en solution aqueuse, et en seconde année, notamment dans le cadre de la thermodynamique chimique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Système physico-chimique</b> Espèces physico-chimiques.</p>	<p>Recenser les espèces physico-chimiques présentes dans un système.</p>
<p>Corps purs et mélanges : concentration en quantité de matière, fraction molaire, pression partielle. Variables intensives et extensives. Composition d'un système physico-chimique. Modèle du gaz parfait : équation d'état.</p>	<p>Décrire la composition d'un système à l'aide des grandeurs physiques pertinentes. Reconnaître le caractère extensif ou intensif d'une variable. Utiliser l'équation d'état du gaz parfait dans le cas d'un système gazeux.</p>
<p><b>Transformation chimique d'un système</b> Modélisation d'une transformation par une ou plusieurs réactions chimiques. Équation de réaction; constante thermodynamique d'équilibre.</p>	<p>Écrire l'équation de la réaction (ou des réactions) qui modélise(nt) une transformation chimique donnée.</p> <p><b>Déterminer une constante thermodynamique d'équilibre et tester l'influence de différents paramètres sur l'état d'équilibre d'un système.</b></p>
<p>Évolution d'un système lors d'une transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique : avancement, activité, quotient de réaction, critère d'évolution.</p>	<p>Décrire qualitativement et quantitativement un système chimique dans l'état initial ou dans un état d'avancement quelconque. Exprimer l'activité d'une espèce chimique pure ou dans un mélange dans le cas de solutions aqueuses très diluées ou de mélanges de gaz parfaits avec référence à l'état standard. Exprimer le quotient de réaction. Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système chimique.</p>
<p>Composition chimique du système dans l'état final : état d'équilibre chimique, transformation totale.</p>	<p>Identifier un état d'équilibre chimique. Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique du système et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, l'état final d'un système, siège d'une transformation, modélisée par une réaction unique à partir des conditions initiales et de la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre.</p>
<p>Optimisation d'un procédé chimique : — par modification de la valeur de <math>K^\circ</math> ; — par modification de la valeur du quotient de réaction.</p>	<p>Identifier les paramètres d'influence d'un état d'équilibre et leur contrôle pour optimiser une synthèse ou minimiser la formation d'un produit secondaire indésirable.</p>

## 1.2 Évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation chimique

L'étude de l'évolution temporelle d'un système chimique permet, dans un premier temps, de dégager expérimentalement les facteurs cinétiques concentration et température et de les mettre en œuvre en stratégie de synthèse et d'analyse. Cette mise en évidence est prolongée par les premières modélisations macroscopiques d'évolution des concentrations avec des lois de vitesse d'ordre simple et d'influence de la température avec la loi d'Arrhenius.

Les déterminations d'ordre global ou apparent mettent en œuvre la méthode différentielle ou intégrale, et peuvent s'effectuer à l'aide de logiciels dédiés ou d'un langage de programmation, pour l'exploitation des mesures dans le cadre d'un réacteur fermé parfaitement agité.

La modélisation microscopique par le biais des mécanismes réactionnels est présentée lors des premières synthèses en chimie organique (partie 2.3). Elle est approfondie ultérieurement avec une approche plus exhaustive des mécanismes et leur validation par confrontation des lois de vitesse issues du modèle et des résultats expérimentaux (en partie 4.1).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Cinétique en réacteur fermé de composition uniforme</b> Vitesse volumique de consommation d'un réactif et de formation d'un produit. Vitesse de réaction pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique (supposée sans accumulation d'intermédiaires).</p>	<p>Relier la vitesse de réaction, dans les cas où elle est définie, à la vitesse volumique de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit.</p>
<p>Lois de vitesse : réactions sans ordre, réactions avec ordre simple (0, 1, 2), ordre global, ordre apparent. Temps de demi-vie d'un réactif, temps de demi-réaction.</p>	<p><b>Établir une loi de vitesse à partir du suivi temporel d'une grandeur physique.</b></p> <p>Exprimer, pour une transformation modélisée par une seule réaction chimique, la loi de vitesse si la réaction chimique admet un ordre et déterminer la valeur de la constante de vitesse à une température donnée. Déterminer la vitesse de réaction à différentes dates en utilisant une méthode numérique ou graphique. Déterminer un ordre de réaction à l'aide de la méthode différentielle ou à l'aide des temps de demi-réaction. Confirmer la valeur d'un ordre par la méthode intégrale, en se limitant strictement à une décomposition d'ordre 0, 1 ou 2 d'un unique réactif, ou se ramenant à un tel cas par dégénérescence de l'ordre ou conditions initiales stœchiométriques.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation ou d'un logiciel dédié, et à partir de données expérimentales, tracer l'évolution temporelle d'une concentration, d'une vitesse volumique de formation ou de consommation, d'une vitesse de réaction et tester une loi de vitesse donnée.</p>
<p>Loi empirique d'Arrhenius; énergie d'activation.</p>	<p><b>Déterminer l'énergie d'activation d'une réaction chimique.</b></p> <p>Déterminer la valeur de l'énergie d'activation d'une réaction chimique à partir de valeurs de la constante cinétique à différentes températures.</p>
<p>Facteurs concentration et température en stratégie de synthèse et d'analyse : dilution, chauffage, reflux, trempé.</p>	<p>Reconnaître, dans un protocole, des opérations visant à augmenter ou à diminuer une vitesse de réaction.</p>

## 2. Relations entre structure des entités chimiques, propriétés physiques et réactivité

Décrivant la matière au niveau macroscopique par des espèces chimiques aux propriétés physiques et chimiques caractéristiques, les chimistes la modélisent au niveau microscopique par des entités chimiques dont les structures électroniques et géométriques permettent d'interpréter et de prévoir certaines de ces propriétés.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- utiliser le tableau périodique des éléments pour déterminer ou justifier des structures d'entités et des propriétés microscopiques (polarité, polarisabilité, amphiphilie, nucléophilie, électrophilie)
- s'approprier les outils de description des entités chimiques et leur complémentarité dans la description des interactions intermoléculaires;
- relier structure et propriétés microscopiques aux grandeurs et comportements macroscopiques (cohésion, solubilité, miscibilité, températures de changement d'état, tensioactivité);
- appréhender la notion de solvant, de tensioactif, d'émulsion au niveau microscopique à travers les interactions intermoléculaires et au niveau macroscopique par leur utilisation au laboratoire, dans l'industrie et dans la vie courante;
- maîtriser et utiliser différentes représentations schématiques d'une entité chimique;
- pratiquer un raisonnement qualitatif argumenté pour expliquer le choix d'un mécanisme réactionnel en synthèse organique.

### 2.1 Structure des entités chimiques

L'étude de la constitution de la matière s'appuie sur le tableau périodique des éléments, outil essentiel des chimistes, dans l'objectif de développer progressivement les compétences relatives à l'utilisation des informations qu'il contient pour prévoir, dans cette partie, le nombre de liaisons d'un atome et la nature (apolaire, polaire, ionique) des liaisons chimiques.

En première année, on se limite au modèle de Lewis de la liaison covalente localisée et délocalisée pour rendre compte des structures et propriétés des entités chimiques; le modèle quantique de la liaison avec les orbitales atomiques et moléculaires est abordé uniquement en seconde année.

Le modèle de Lewis permet, pour les entités chimiques organiques, d'introduire les notions d'isomérisation de configuration et de conformation. Les ordres de grandeur des énergies de liaison et de la barrière conformationnelle permettent de sensibiliser à la solidité et à la flexibilité des édifices moléculaires.

Sans donner lieu à une étude systématique, la nomenclature IUPAC s'enrichit au fur et à mesure des besoins pour représenter une entité chimique organique à partir de son nom, en tenant compte de la donnée d'éventuelles informations stéréochimiques et en utilisant un type de représentation donné.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Modèle de Lewis de la liaison covalente</b> Liaison covalente localisée; longueur et énergie de la liaison covalente. Schéma de Lewis d'une molécule ou d'un ion monoatomique ou polyatomique (étude limitée aux éléments des blocs s et p).</p>	<p>Citer l'ordre de grandeur de longueurs et d'énergies de liaison covalente. Déterminer, pour les éléments des blocs s et p, le nombre d'électrons de valence d'un atome à partir de la position de l'élément dans le tableau périodique. Citer les éléments des périodes 1 à 3 du tableau périodique (nom, symbole, numéro atomique). Établir un ou des schémas de Lewis pertinent(s) pour une molécule ou un ion.</p>
<p>Liaison covalente délocalisée : mésomérisation.</p>	<p>Identifier et représenter les enchaînements donnant lieu à une délocalisation électronique. Mettre en évidence une éventuelle délocalisation électronique à partir de données expérimentales.</p>
<p><b>Géométrie et polarité des entités chimiques</b> Structure géométrique d'une molécule ou d'un ion polyatomique. Modèle VSEPR. Représentation de Cram.</p>	<p>Associer qualitativement la géométrie d'une entité à la minimisation de son énergie. Prévoir et interpréter les structures de type <math>AX_n</math> avec <math>n \leq 4</math> et <math>AX_pE_q</math>, avec <math>p + q = 3</math> ou 4.</p>

Électronégativité : liaison polarisée, moment dipolaire, molécule polaire.	Comparer les électronégativités de deux atomes à partir de données ou de leurs positions dans le tableau périodique. Prévoir la polarisation d'une liaison à partir des électronégativités comparées des deux atomes mis en jeu. Relier l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent à la structure géométrique d'une molécule. Déterminer direction et sens du vecteur moment dipolaire d'une liaison ou d'une molécule.
<b>Structure des entités chimiques organiques</b> Isomérisation de constitution. Stéréoisomérisation de conformation en série aliphatique non cyclique ; ordre de grandeur de la barrière conformationnelle. Représentation de Newman. Représentation topologique.	Comparer la stabilité de plusieurs conformations. Interpréter la stabilité d'un conformère donné.
Stéréoisomérisation de configuration : chiralité, énantiomérisation, diastéréoisomérisation, descripteurs stéréochimiques R, S et Z, E.	Attribuer les descripteurs stéréochimiques aux centres stéréogènes. Déterminer la relation d'isomérisation entre deux isomères. Représenter une entité chimique organique à partir de son nom, fourni en nomenclature systématique, en tenant compte de la donnée d'éventuelles informations stéréochimiques, en utilisant un type de représentation donné.
Activité optique, pouvoir rotatoire, loi de Biot.	Relier la valeur du pouvoir rotatoire à la composition d'un mélange de stéréoisomères.  <b>Déterminer la composition d'un système chimique ou suivre une transformation chimique en utilisant l'activité optique.</b>
Séparation de diastéréoisomères et d'énantiomères.	Citer des analogies et différences de propriétés entre des diastéréoisomères et des énantiomères. Reconnaître des protocoles de séparation de stéréoisomères.

## 2.2 Relations entre structure des entités chimiques et propriétés physiques macroscopiques

L'étude des interactions entre entités a pour objectif d'interpréter, de prévoir ou de comparer certaines propriétés physiques : température de changement d'état, miscibilité, solubilité, formation de micelles, d'émulsions. Ces notions sont réinvesties lors de l'étude des chromatographies sur couche mince et en phase gazeuse.

De nombreuses illustrations et applications dans la vie courante ou au niveau du laboratoire (choix de solvant pour les synthèses ou les extractions ; séparation par chromatographie sur colonne) ou dans le domaine du vivant (double couche et solubilisation des médicaments) peuvent être proposées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Interactions entre entités</b> Interactions de van der Waals, polarisabilité. Liaison hydrogène (interaction par pont hydrogène). Ordres de grandeur énergétiques des interactions entre entités.	Lier la polarisabilité d'un atome à sa position dans le tableau périodique. Lier qualitativement la valeur des énergies d'interactions intermoléculaires à la polarité et la polarisabilité des molécules.
<b>Changements d'état</b> Température de changement d'état de corps purs moléculaires.	Prévoir ou interpréter les températures de changement d'état de corps purs moléculaires par l'existence d'interactions de van der Waals ou de liaisons hydrogène.

<p><b>Solubilité, miscibilité</b>          Grandeurs caractéristiques et propriétés de solvants moléculaires : moment dipolaire, permittivité relative, caractère protogène.          Mise en solution d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.</p>	<p>Associer une propriété d'un solvant moléculaire à une ou des grandeurs caractéristiques.          Interpréter la miscibilité totale, partielle ou nulle de deux solvants.          Interpréter la solubilité d'une espèce chimique moléculaire ou ionique.</p>
<p>Séparation d'espèces d'un mélange : extraction par solvant, dissolution, précipitation, lavage.          Constante de partage, log P.</p>	<p><b>Déterminer une constante de partage.</b>  <b>Réaliser une extraction, un lavage et les interpréter en termes de solubilité, miscibilité, constante de partage, ou log P.</b></p>
<p><b>Chromatographies</b>          Chromatographie sur couche mince (CCM), rapport frontal.          Chromatographie en phase gazeuse (CPG), temps de rétention.</p>	<p>Identifier la phase stationnaire et la phase mobile.          Identifier la présence d'une espèce chimique dans un échantillon à partir de son chromatogramme (rapport frontal ou référence).          Interpréter l'ordre d'éluion des différentes espèces chimiques en relation avec leurs propriétés physico-chimiques et les caractéristiques de la phase stationnaire et de la phase mobile.</p>
<p><b>Amphiphilie</b>          Espèces chimiques amphiphiles, micelles, structure schématique des membranes cellulaires.</p>	<p>Prévoir le caractère amphiphile d'une entité à partir de sa structure.          Interpréter la structure d'une association d'entités amphiphiles (micelle, bicouche, membrane cellulaire).          Comparer et interpréter, en lien avec la structure des entités, les propriétés physiques d'espèces chimiques amphiphiles (concentration micellaire critique, solubilité).</p>
<p>Émulsions.</p>	<p>Décrire la structure d'une émulsion en distinguant phase dispersée et phase continue.          Interpréter les propriétés détergentes ou émulsifiantes des espèces chimiques amphiphiles.</p>

### 2.3 Réactivité des espèces organiques et premières applications en synthèse

L'objectif de cette partie est d'aborder les premières synthèses organiques en interprétant les transformations chimiques associées à partir de la réactivité des espèces organiques mises en jeu, réactivité déduite de la structure et des propriétés des entités chimiques qui les composent; pour ce qui concerne les propriétés acido-basiques, une table de  $pK_a$  sera systématiquement fournie.

Les premières modélisations, au niveau microscopique, des transformations chimiques par un mécanisme réactionnel sont établies sur des exemples simples faisant intervenir des entités nucléophiles et électrophiles, acides et basiques. Ces modélisations permettent de rendre compte de modifications de groupes caractéristiques (substitution, élimination, addition) et de chaînes carbonées, ainsi que de propriétés cinétiques ou stéréochimiques.

Les modèles mécanistiques et le modèle du complexe activé sont introduits sur des exemples de transformations s'appuyant, dans un premier temps, sur les halogénoalcane, mais dans le but d'une maîtrise permettant un réinvestissement à d'autres groupes caractéristiques.

L'approche mécanistique est privilégiée à l'approche fonctionnelle pour favoriser le raisonnement et la transférabilité dans des situations analogues et pour commencer à engager la réflexion sur les stratégies de synthèse.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Réactivité des espèces organiques et écriture des mécanismes réactionnels</b>            Conséquences de la structure sur la réactivité : nucléophile, électrophile.</p>	<p>Identifier les sites électrophiles et/ou nucléophiles d'une entité chimique.</p>

<p>Modélisation microscopique d'une transformation : mécanisme réactionnel, acte élémentaire, molécularité, complexe activé, intermédiaire réactionnel.</p>	<p>Distinguer l'équation chimique symbolisant une réaction chimique de l'équation traduisant un acte élémentaire. Distinguer un intermédiaire réactionnel d'un complexe activé.</p> <p>Tracer et commenter un profil énergétique correspondant à un acte élémentaire ou à plusieurs actes élémentaires successifs.</p> <p>Donner la loi de vitesse d'une réaction se déroulant en un seul acte élémentaire.</p>
<p>Interprétation microscopique de l'influence des facteurs cinétiques.</p>	<p>Interpréter l'influence des concentrations et de la température sur la vitesse d'un acte élémentaire, en termes de fréquence et d'efficacité des chocs entre entités.</p>
<p>Formalisme des flèches courbes.</p>	<p>Utiliser le formalisme des flèches courbes pour rendre compte d'un acte élémentaire et le relier aux caractères nucléophile et électrophile des entités.</p>
<p><b>Synthèse organique en laboratoire</b> Déroulement expérimental d'une synthèse organique : étapes de transformation, de séparation, de purification et de caractérisation. Détermination du rendement.</p>	<p><b>Mettre en œuvre un protocole expérimental sur un exemple simple et représentatif d'une synthèse organique en laboratoire. Justifier et réaliser les différentes étapes de cette synthèse.</b></p>
<p><b>Modifications de groupe caractéristique : exemple des halogénoalcane</b> Substitution nucléophile aliphatique : mécanismes limites <math>S_N2</math> et <math>S_N1</math>; propriétés cinétiques et stéréochimiques.</p>	<p>Justifier le choix d'un mécanisme limite <math>S_N2</math> ou <math>S_N1</math> par des facteurs structuraux des réactifs et par des résultats expérimentaux sur la stéréochimie des produits ou sur la loi de vitesse de la réaction.</p> <p>Prévoir ou analyser la stéréosélectivité ou la stéréospécificité éventuelle d'une substitution nucléophile.</p> <p>Interpréter des différences de réactivité en termes de polarisabilité. Utiliser le postulat de Hammond pour interpréter l'influence de la stabilité du carbocation sur la vitesse d'une <math>S_N1</math>.</p>
<p><math>\beta</math>-élimination; mécanisme limite E2, propriétés stéréochimiques, régiosélectivité.</p>	<p>Prévoir ou analyser la régiosélectivité, la stéréosélectivité et la stéréospécificité éventuelle d'une <math>\beta</math>-élimination sur un halogénoalcane acyclique.</p> <p>Interpréter la formation de produits indésirables par la compétition entre les réactions de substitution et d'élimination.</p>
<p><b>Construction du squelette carboné : synthèse et utilisation d'organomagnésiens mixtes</b> Organomagnésiens mixtes : propriétés nucléophiles; préparation à partir des espèces halogénées; inversion de polarité (Umpolung) lors de l'insertion du magnésium; intérêt des organométalliques dans la construction d'une chaîne carbonée. Addition nucléophile, sur l'exemple des réactions entre un organomagnésien mixte et un aldéhyde, une cétone ou le dioxyde de carbone : mécanisme.</p>	<p>Déterminer le produit formé lors de la réaction d'un organomagnésien mixte sur un aldéhyde, une cétone ou le dioxyde de carbone et inversement, prévoir les réactifs utilisés lors de la synthèse magnésienne d'un alcool ou d'un acide carboxylique.</p> <p><b>Décrire et mettre en œuvre un protocole de préparation d'un organomagnésien mixte et de son utilisation pour créer une liaison carbone-carbone. Justifier les étapes et conditions expérimentales, y compris l'hydrolyse terminale.</b></p>

### 3. Structures microscopiques et propriétés physiques des solides

Les modèles de description microscopique des solides sont présentés à partir de l'observation de différents solides cristallisés que le professeur est libre de choisir et de la prise en compte des propriétés macroscopiques de ces solides. L'introduction du modèle du cristal parfait se fait sur l'exemple de la maille cubique à faces centrées (CFC), seule maille dont la connaissance est exigible; l'ensemble des notions associées à cette première étude est réinvesti pour étudier d'autres structures cristallines dont la constitution est alors fournie.

L'objectif principal de l'étude des cristaux métalliques, covalents et ioniques est d'aborder une nouvelle fois la notion de modèle : les allers-retours entre le niveau macroscopique (solides de différentes natures) et la modélisation microscopique (cristal parfait) permettent de montrer les limites du modèle du cristal parfait et de confronter les prédictions faites par ce modèle aux valeurs expérimentales mesurées sur le solide réel (distances internucléaires et interatomiques, masse volumique, etc.). Ce chapitre constitue une occasion de revenir sur les positions relatives des éléments dans le tableau périodique, en lien avec la nature des interactions assurant la cohésion des édifices présentés, ainsi que sur les interactions intermoléculaires et la notion de solubilisation pour les solides ioniques et moléculaires.

Une réflexion sur les modèles conduisant à la détermination des différents types de rayons à partir des méthodes expérimentales d'analyse des structures des solides peut être proposée.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- relier la position d'un élément dans le tableau périodique et la nature des interactions entre les entités correspondantes dans un solide;
- effectuer des liens entre différents champs de connaissance;
- appréhender la notion de limite d'un modèle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Modèle du cristal parfait</b> Solides amorphes, cristallins, semi-cristallins, polycristallins; variétés allotropiques. Description du modèle du cristal parfait; population, coordinence, compacité, masse volumique.</p>	<p><b>Illustrer l'influence des conditions expérimentales sur la formation de solides et de solides cristallins.</b></p> <p>Décrire un cristal parfait comme un assemblage de mailles parallélépipédiques. Déterminer la population, la coordinence et la compacité pour une structure fournie. Déterminer la valeur de la masse volumique d'un matériau cristallisé selon une structure cristalline fournie.</p>
<p>Rayons métallique, covalent, de van der Waals ou ionique et évolution dans le tableau périodique.</p>	<p>Relier le rayon métallique, covalent, de van der Waals ou ionique, selon le cas, aux paramètres d'une maille donnée. Citer l'ordre de grandeur de ces rayons.</p>
<p>Modèles d'empilement compact de sphères identiques. Maille conventionnelle CFC et ses sites interstitiels.</p>	<p><b>Utiliser un logiciel ou des modèles cristallins pour visualiser des mailles et des sites interstitiels et pour déterminer des paramètres géométriques.</b></p> <p>Localiser les interstices tétraédriques et octaédriques entre les plans d'empilement. Localiser et dénombrer les sites tétraédriques et octaédriques d'une maille CFC et déterminer leur habitabilité.</p>
<p>Limites du modèle du cristal parfait.</p>	<p>Confronter des données expérimentales aux prévisions du modèle.</p>
<p><b>Métaux et alliages</b> Cohésion et propriétés physiques des métaux.</p>	<p>Positionner dans le tableau périodique et reconnaître métaux et non métaux. Relier les caractéristiques de la liaison métallique (ordre de grandeur énergétique, non directionnalité) aux propriétés macroscopiques des métaux.</p>
<p>Alliages de substitution et d'insertion.</p>	<p>Citer des exemples d'alliage et leur intérêt par rapport à des métaux purs. Prévoir la possibilité de réaliser des alliages de substitution ou d'insertion selon les caractéristiques des atomes mis en jeu.</p>

<p><b>Solides covalents et moléculaires</b> Cohésion et propriétés physiques des solides covalents et moléculaires.</p>	<p>Identifier les liaisons covalentes, les interactions de van der Waals et les liaisons hydrogène dans un cristal de structure donnée.</p> <p>Relier les caractéristiques des liaisons covalentes, des interactions de van der Waals et des liaisons hydrogène (directionnalité ou non, ordre de grandeur des énergies mises en jeu) et les propriétés macroscopiques des solides correspondants.</p> <p>Comparer les propriétés macroscopiques du diamant et du graphite et interpréter les différences en relation avec les structures microscopiques (structures cristallines fournies).</p>
<p><b>Solides ioniques</b> Cohésion et propriétés physiques des solides ioniques. Rayon ionique.</p>	<p>Relier les caractéristiques de l'interaction ionique dans le cadre du modèle du solide ionique parfait (ordre de grandeur de l'énergie d'interaction, non directionnalité, charge localisée) avec les propriétés macroscopiques des solides ioniques.</p> <p>Comparer le rayon d'un atome et ceux de ses ions.</p> <p>Associer la tangence anion-cation et la non tangence anion-anion, dans une structure cubique de type AB fournie, à la valeur du paramètre de maille.</p>



## Deuxième semestre

### 4. Transformations de la matière

#### 4.1 Évolution d'un système et mécanisme réactionnel

La modélisation, au niveau microscopique, des transformations chimiques développe plus avant les mécanismes réactionnels et notamment les aspects cinétiques microscopiques et macroscopiques en introduisant les notions d'étape cinétiquement déterminante et d'approximation des états quasi-stationnaires pour des intermédiaires réactionnels. Des approches numériques sont privilégiées par rapport aux calculs analytiques pour illustrer ces notions, ainsi que celles de contrôles cinétique et thermodynamique.

Introduit expérimentalement, l'effet catalytique est modélisé, au niveau microscopique, par un nouveau mécanisme réactionnel concurrent présentant des étapes souvent plus nombreuses et plus rapides. L'étude de la catalyse enzymatique est illustrée par des exemples dans le domaine du vivant et du biomimétisme et permet de réinvestir les structures et interactions entre entités.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Modélisation microscopique d'une transformation chimique</b> Modélisation d'une transformation par deux actes élémentaires opposés, état d'équilibre d'un système.</p>	<p>Relier la constante thermodynamique d'équilibre aux constantes de vitesse dans le cas d'une transformation modélisée par deux actes élémentaires opposés.</p>
<p>Modélisation d'une transformation par un mécanisme constitué par plusieurs actes élémentaires successifs; étape cinétiquement déterminante, approximation de l'état quasi-stationnaire, équilibre rapidement établi, loi de vitesse associée.</p>	<p><b>Capacité numérique :</b> établir un système d'équations différentielles et le résoudre numériquement afin de visualiser l'évolution temporelle des concentrations et de leurs dérivées dans le cas d'un mécanisme à deux actes élémentaires successifs. Mettre en évidence l'étape cinétiquement déterminante ou l'approximation de l'état quasi-stationnaire d'un intermédiaire réactionnel.</p> <p>Reconnaître, à partir d'informations fournies, l'étape cinétiquement déterminante d'un mécanisme ou les conditions d'utilisation de l'approximation de l'état quasi-stationnaire d'un intermédiaire réactionnel. Établir la loi de vitesse de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit à partir d'un mécanisme réactionnel simple et d'informations fournies.</p>
<p>Contrôle cinétique, contrôle thermodynamique.</p>	<p>Reconnaître les paramètres qui favorisent la formation d'un produit dans le cas de deux réactions compétitives.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> établir un système d'équations différentielles et le résoudre numériquement, avec un langage de programmation, afin de visualiser l'évolution des concentrations au cours du temps pour mettre en évidence les situations de contrôle cinétique ou thermodynamique.</p>
<p><b>Catalyse</b> Catalyse d'une transformation, intervention du catalyseur dans le mécanisme réactionnel, sélectivité.</p>	<p>Reconnaître un effet catalytique dans un mécanisme réactionnel ou sur un profil énergétique. Reconnaître un effet de sélectivité par action d'un catalyseur.</p>
<p>Catalyse enzymatique, site actif d'une enzyme, complexe enzyme-substrat.</p>	<p>Établir la loi de vitesse de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit à partir d'un mécanisme de catalyse enzymatique fourni. Identifier, à partir d'informations structurales, les interactions mises en jeu entre le site actif d'une enzyme et son substrat et interpréter le rôle catalytique de l'enzyme.</p>

## 4.2 Premier principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques

Cette partie aborde l'application du premier principe de la thermodynamique à l'étude des transformations chimiques. Les enthalpies standard de réaction sont considérées comme indépendantes de la température. Les notions et contenus sont illustrés à travers des applications liées à la vie quotidienne (contenu calorique des aliments, PCI et PCS des carburants, etc.), à la recherche (apports des techniques calorimétriques modernes, etc.) ou au domaine industriel. Un prolongement est proposé dans le cadre de l'étude thermique au sein des réacteurs continus dans la partie portant sur les procédés industriels en seconde année.

Notions et contenus	Capacités exigibles
État standard. Enthalpie standard de réaction. Loi de Hess. État standard de référence d'un élément, enthalpie standard de formation. Enthalpie standard de dissociation de liaison.	Déterminer une enthalpie standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques.
Effets thermiques lors d'une transformation monobare : <ul style="list-style-type: none"> <li>— transfert thermique associé à la transformation chimique monobare monotherme ;</li> <li>— variation de température lors d'une transformation monobare et adiabatique.</li> </ul>	Prévoir le sens et calculer la valeur du transfert thermique entre un système, siège d'une transformation physico-chimique monobare et monotherme, et le milieu extérieur. Évaluer la température atteinte par un système siège d'une transformation physico-chimique, monobare et adiabatique.
	<b>Déterminer une enthalpie standard de réaction.</b>

## 5. Transformations chimiques en solution aqueuse

Les transformations chimiques en solution aqueuse jouent un rôle essentiel en chimie, en biochimie, dans le domaine du vivant et dans les procédés industriels. Un nombre considérable de développements technologiques et d'analyses environnementales (traitement des eaux, méthodes d'analyse, extraction d'ions métalliques des minerais, générateurs électrochimiques, lutte contre la corrosion, etc.) repose sur des transformations modélisées par des réactions acide-base, de solubilisation-précipitation et d'oxydo-réduction en solution aqueuse dont la maîtrise est importante pour prévoir, interpréter et optimiser les phénomènes mis en jeu.

L'objectif de cette partie est donc de présenter différents types de réactions susceptibles d'intervenir en solution aqueuse, d'en déduire des diagrammes de prédominance ou d'existence d'espèces chimiques, notamment des diagrammes potentiel-pH, et de les utiliser comme outil de prévision et d'interprétation des transformations chimiques quel que soit le milieu donné. Les conventions de tracé de ces diagrammes seront toujours précisées.

Les choix pédagogiques relatifs au contenu des séances de travail expérimental permettront de contextualiser ces enseignements. Les dosages par titrage sont étudiés exclusivement en travaux pratiques. L'analyse des conditions choisies ou la réflexion conduisant à une proposition de protocole expérimental pour atteindre un objectif donné constituent des mises en situation des enseignements évoqués précédemment. Ces séances de travail expérimental constituent une nouvelle occasion d'aborder qualité et précision de la mesure.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être par la suite valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- modéliser ou simplifier un problème complexe ;
- utiliser différents outils graphiques, numériques, analytiques ;
- repérer les informations ou paramètres importants pour la résolution d'un problème.

### 5.1 Réactions acide-base et de précipitation

Ces différentes transformations en solution aqueuse sont abordées en montrant qu'elles constituent des illustrations de l'évolution des systèmes chimiques introduites au premier semestre, les étudiants étant amenés à déterminer l'état final d'un système en transformation chimique modélisée par une seule réaction chimique. On montrera qu'il est ainsi possible d'analyser et de simplifier une situation complexe pour parvenir à la décrire rigoureusement et quantitativement, en l'occurrence dans le cas des solutions aqueuses, par une seule réaction. Il est cependant important de noter qu'on évite tout calcul inutile de concentration, en privilégiant l'utilisation des diagrammes pour valider le choix de la réaction mise en jeu. Dans ce cadre, aucune formule de calcul de pH n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Réactions acide-base</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— constante d'acidité <math>K_a</math> ; constante d'acidité des deux couples de l'eau à 298 K.</li> <li>— diagramme de prédominance, de distribution ;</li> <li>— exemples usuels d'acides et bases : nom, formule et caractère – faible ou fort – des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, acétique, du dioxyde de carbone aqueux, de la soude, la potasse, l'ion hydrogénocarbonate, l'ion carbonate, l'ammoniac ;</li> <li>— solutions tampons.</li> </ul> <p><b>Réactions de dissolution ou de précipitation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— réaction de dissolution, constante de solubilité <math>K_s</math> ;</li> <li>— solubilité et condition de précipitation ;</li> <li>— domaine d'existence ;</li> <li>— facteurs influençant la solubilité.</li> </ul>	<p>Reconnaître une réaction acide-base ou une réaction de dissolution ou de précipitation à partir de son équation. Écrire l'équation de la réaction modélisant une transformation en solution aqueuse en tenant compte des caractéristiques du milieu réactionnel (nature des espèces chimiques en présence, pH) et des observations expérimentales.</p> <p>Utiliser des tables pour extraire les données thermodynamiques pertinentes pour étudier un système en solution aqueuse.</p> <p>Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques sont connues.</p> <p>Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p>Prévoir l'état de saturation ou de non saturation d'une solution.</p> <p>Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires.</p> <p>Retrouver les valeurs de constantes thermodynamiques d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance (et réciproquement).</p> <p>Exploiter des courbes d'évolution de la solubilité d'un solide en fonction d'une variable.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le diagramme de distribution des espèces d'un ou plusieurs couple(s) acide-base, ou d'espèces impliquées dans une réaction de précipitation.</p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction acide-base et une réaction de précipitation pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse.</b></p> <p><b>Illustrer un procédé de retraitement ou de recyclage ou de séparation en solution aqueuse.</b></p>

## 5.2 Réactions d'oxydo-réduction

L'analyse de transformations mettant en jeu des oxydants et réducteurs usuels et des piles permet d'aborder les différents concepts associés aux phénomènes d'oxydo-réduction en solution aqueuse. La relation de Nernst (admise en première année) ainsi que la relation entre la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction et les potentiels standard permettent de prévoir l'évolution des systèmes et le caractère favorisé des transformations.

Afin de pouvoir étudier l'influence du milieu sur les espèces oxydantes ou réductrices présentes, les acquis sur les réactions acido-basiques et de précipitation en solution aqueuse sont réinvestis.

Enfin, les diagrammes potentiel-pH sont présentés puis superposés pour prévoir ou interpréter thermodynamiquement des transformations chimiques, la confrontation avec la réalité amenant à aborder éventuellement des blocages cinétiques en lien avec l'évolution temporelle des systèmes étudiée au premier semestre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Oxydants et réducteurs, réactions d'oxydo-réduction</b></p> <p>Nombre d'oxydation.</p> <p>Exemples d'oxydants et de réducteurs minéraux usuels : nom et formule des ions thiosulfate, permanganate, hypochlorite, du dichlore, du peroxyde d'hydrogène, du dioxygène, du dihydrogène, des métaux.</p>	<p>Lier la position d'un élément dans le tableau périodique et le caractère oxydant ou réducteur du corps simple correspondant.</p> <p>Prévoir les nombres d'oxydation extrêmes d'un élément à partir de sa position dans le tableau périodique.</p> <p>Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple.</p>

<p>Pile, tension à vide, potentiel d'électrode, potentiel standard, formule de Nernst, électrodes de référence.</p>	<p>Décrire le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode. Déterminer la capacité électrique d'une pile.</p>
<p>Diagrammes de prédominance ou d'existence. Aspect thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction. Dismutation et médiamutation.</p>	<p><b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement.</b> Utiliser les diagrammes de prédominance ou d'existence pour prévoir les espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires. Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples.</p> <p><b>Mettre en œuvre une réaction d'oxydo-réduction pour réaliser une analyse quantitative en solution aqueuse.</b></p>
<p><b>Diagramme potentiel-pH</b> Principe de construction, lecture et utilisation d'un diagramme potentiel-pH. Diagramme potentiel-pH de l'eau.</p>	<p>Associer les différents domaines d'un diagramme potentiel-pH fourni à des espèces chimiques données. Déterminer, par le calcul, la valeur de la pente d'une frontière d'un diagramme potentiel-pH. Justifier la position d'une frontière verticale dans un diagramme potentiel-pH. Prévoir le caractère thermodynamiquement favorisé ou non d'une transformation par superposition de diagrammes potentiel-pH. Discuter de la stabilité des espèces dans l'eau. Prévoir une éventuelle dismutation ou médiamutation en fonction du pH du milieu. Confronter les prévisions à des données expérimentales et interpréter d'éventuels écarts en termes cinétiques.</p> <p><b>Mettre en œuvre des réactions d'oxydo-réduction en s'appuyant sur l'utilisation d'un diagramme potentiel-pH.</b></p>

## 6. Réactivité, transformations en chimie organique et stratégie de synthèse

Les objectifs de cette deuxième partie de programme en chimie organique sont doubles :

- d'une part, réinvestir ou compléter les connaissances et compétences autour des interconversions entre groupes caractéristiques, notamment par des réactions d'oxydo-réduction et de modifications de chaînes ;
- d'autre part, enrichir les apports concernant la synthèse d'espèces chimiques organiques en introduisant les notions de protection de groupes caractéristiques et d'activation in situ (protonation) ou par synthèse préalable d'une espèce plus réactive.

L'ensemble permet d'amener les étudiants à pouvoir conduire une véritable réflexion sur la stratégie de synthèse à travers l'analyse de la réactivité comparée des espèces chimiques et à interpréter la nature et l'ordre des étapes mises en œuvre dans le cas d'une synthèse multi-étapes. Pour ce qui concerne l'élaboration d'une synthèse multi-étapes par les étudiants eux-mêmes, elle peut se faire en autonomie à l'aide d'une banque de réactions (réactionthèque) fournie ou à l'aide des réactions qui figurent explicitement au programme. Les équations des réactions indiquées dans la colonne de gauche (substitutions nucléophiles,  $\beta$ -éliminations, additions nucléophiles) doivent être connues et seuls les mécanismes explicitement inscrits sont exigibles et doivent pouvoir être écrits sans information supplémentaire.

Si la construction du programme privilégie ici une approche liée à stratégie de synthèse, elle n'entrave évidemment pas la liberté pédagogique des enseignants dans le choix de leur présentation et de leur progression.

À travers les contenus et les capacités exigibles sont développées des compétences qui pourront être par la suite valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- analyser des problèmes de complexité croissante ;
- identifier dans une situation complexe la partie utile au raisonnement ;
- proposer une stratégie d'adaptation ou de contournement pour résoudre un problème.

## 6.1 Techniques spectroscopiques de caractérisation

La spectroscopie d'absorption UV-visible a déjà été mise en œuvre au cours du premier semestre pour suivre l'évolution d'un système chimique. Elle est enrichie par la spectroscopie IR utilisée pour identifier des liaisons ou groupes caractéristiques présents dans une entité chimique analysée. Les absorptions de ces différents rayonnements électromagnétiques sont associées à la nature des transitions entre niveaux d'énergie dans l'entité chimique et aux caractéristiques des liaisons.

À propos de la spectroscopie de RMN du proton, aucun développement sur son principe n'est attendu, seule l'analyse des spectres de RMN  $^1\text{H}$  est à effectuer pour confirmer la structure d'entités chimiques données ou pour identifier des produits de réactions.

La spectrométrie de masse, dont l'aspect théorique est strictement limité au principe de fonctionnement général (ionisation, séparation dans un analyseur, détection), permet de varier les sources d'informations sur la structure des entités organiques. Le couplage du spectromètre de masse et d'un dispositif de chromatographie en phase gazeuse permet d'obtenir des analyses exploitables de manière qualitative.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Spectroscopies d'absorption UV-visible et infrarouge</b>            Nature des transitions associées aux spectroscopies UV-visible et infrarouge, domaine du spectre des ondes électromagnétiques correspondant.            Transmittance, absorbance.</p>	<p>Relier la longueur d'onde du rayonnement absorbé à l'énergie de la transition associée.            Relier la fréquence du rayonnement IR absorbé aux caractéristiques de la liaison dans le cadre du modèle classique de l'oscillateur harmonique.            Identifier, à partir du spectre infrarouge et de tables de nombres d'onde de vibration, une liaison ou un groupe caractéristique dans une entité organique.</p>
<p><b>Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire du proton</b>            Notions de déplacement chimique, de constante de couplage, d'intégration.            Couplages du premier ordre <math>A_m X_p</math> et <math>A_m M_p X_q</math>.</p>	<p>Interpréter ou prévoir l'allure d'un massif à partir de l'étude des couplages.            Confirmer la structure d'une entité à partir de données spectroscopiques infrarouge et/ou de résonance magnétique nucléaire du proton, les tables de nombres d'onde caractéristiques ou de déplacements chimiques étant fournies.            Déterminer la structure d'une entité à partir de données spectroscopiques et du contexte de formation de l'espèce chimique dans une synthèse organique.            Valider la sélectivité d'une transformation à partir de données spectroscopiques.            Déterminer à partir des intégrations les proportions de deux constituants d'un mélange.</p>
<p><b>Spectrométrie de masse</b>            Principe de la spectrométrie de masse : ionisation, séparation dans un analyseur, détection.            Spectres de masse : pic de base, pic moléculaire, massif isotopique.</p>	<p>Utiliser un spectre de masse afin de déterminer la masse molaire d'une espèce chimique.            Recueillir des informations sur des motifs structuraux d'une espèce chimique analysée, dans des cas simples, à l'aide d'un spectre de masse fourni et de documents sur l'ionisation effectuée ou sur les fragmentations observées.            Identifier la présence d'isotopes.</p>

## 6.2 Réactions d'oxydo-réduction en chimie organique

En synthèse organique, aucun oxydant ou réducteur n'est à connaître mis à part le tétrahydroborate de sodium. Pour autant, il est attendu que les exemples étudiés portent sur des transformations réelles pour lesquelles seront fournies les conditions expérimentales associées, ce afin de développer une bonne culture chimique chez les étudiants.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Niveau d'oxydation des espèces organiques</b> Les groupes caractéristiques et leur niveau d'oxydation.	Identifier, le cas échéant, une conversion d'espèce organique comme un processus d'oxydation ou de réduction et associer les demi-équations électroniques correspondantes.
<b>Un exemple d'interconversion entre groupes caractéristiques : du groupe hydroxyalkyle au groupe carbonyle et inversement</b> Oxydation des alcools selon leur classe ; principe de l'oxydation contrôlée des alcools primaires.	Déterminer le ou les produits d'oxydation d'un alcool selon sa classe. Identifier le produit d'oxydation d'un alcool primaire à l'aide de données expérimentales ou spectroscopiques.
Réduction du groupe carbonyle des aldéhydes et cétones en alcools par action du tétrahydroborate de sodium : mécanisme réactionnel en modélisant l'ion tétrahydroborate comme un ion hydrure.	Analyser à l'aide de données expérimentales la chimiosélectivité de réducteurs dans le cadre d'une stratégie de synthèse.

## 6.3 Activation de groupes caractéristiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Activation nucléophile des alcools et phénols</b> Formation d'alkoolates par réaction acide-base ou d'oxydo-réduction.	Comparer la nucléophilie d'alcools de différentes classes à l'aide d'arguments stériques. Comparer la nucléophilie d'un alcool et de sa base conjuguée. Choisir une base pour déprotoner un alcool ou un phénol à partir d'une échelle de $pK_a$ .
Synthèse d'éther-oxyde par la méthode de Williamson ; mécanisme réactionnel.	Proposer une voie de synthèse d'un éther-oxyde dissymétrique. Interpréter la formation de produits indésirables par la compétition entre les réactions de substitution et d'élimination.
<b>Activation électrophile des alcools</b> Activation des alcools <i>in situ</i> par protonation : <ul style="list-style-type: none"> <li>— déshydratation acido-catalysée d'un alcool tertiaire ; régiosélectivité et stéréosélectivité éventuelles, mécanisme limite E1 ; compétition substitution-élimination dans le cas des alcools secondaires et tertiaires ;</li> <li>— conversion d'un alcool en halogénoalcane par action d'une solution concentrée d'halogénure d'hydrogène, mécanismes limites.</li> </ul> Formation et réactivité d'esters sulfoniques : <ul style="list-style-type: none"> <li>— conversion d'un alcool en ester sulfonique ;</li> <li>— formation d'alcène par élimination sur un ester sulfonique, mécanisme ;</li> <li>— formation d'espèces chimiques par substitution nucléophile sur un ester sulfonique ; mécanisme.</li> </ul>	Comparer les réactivités des liaisons carbone-hétéroatome dans le cas des halogénoalcane, des alcools, des esters sulfoniques et des ions alkyloxonium. Prévoir les produits pouvant se former lors de la déshydratation d'un alcool, indiquer le ou les produits majoritaires. Commenter dans une synthèse multi-étapes le choix d'une activation <i>in situ</i> par protonation ou par passage par un tosylate ou un mésylate d'alkyle.

<p><b>Activation électrophile du groupe carbonyle</b> Acétalisation des aldéhydes et des cétones : conditions expérimentales (APTS, appareil de Dean-Stark), mécanisme limite de l'acétalisation en milieu acide.</p>	<p>Expliquer qualitativement l'augmentation de l'électrophilie du groupe carbonyle par protonation.</p>
<p>Hémiacétalisation acido-catalysée du glucose, mécanisme limite.</p>	<p>Discuter la régiosélectivité de la réaction d'hémiacétalisation du glucose. Interpréter l'isomérisation du glucopyranose par le caractère renversable de l'hémiacétalisation.</p>

#### 6.4 Protection de groupes caractéristiques et stratégie de synthèse

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Protection-déprotection</b> Protection-déprotection du groupe carbonyle des aldéhydes et cétones par un diol ; conditions expérimentales, mécanisme de l'hydrolyse acide. Protection-déprotection du groupe hydroxyle : utilisation d'une banque de réactions fournie.</p>	<p>Justifier la nécessité de protéger un groupe caractéristique dans une synthèse multi-étapes. Identifier les étapes de protection et de déprotection d'un groupe carbonyle, d'un groupe hydroxyle ou d'un diol dans une synthèse multi-étapes. Proposer ou justifier, à partir d'une banque de réactions fournie, une méthode adaptée de protection du groupe hydroxyle. Analyser une synthèse multi-étapes en termes de stratégie de synthèse : ordre des étapes, protection de groupes caractéristiques, étapes d'activation. Analyser les impacts environnementaux d'une stratégie de synthèse.</p>

## Deuxième partie

## Contenus thématiques

<b>Thème S – ondes et signaux</b>	8
S.8 Filtrage linéaire . . . . .	8
S.9 Optique ondulatoire . . . . .	9
S.9.1 Modèle scalaire des ondes lumineuses . . . . .	9
S.9.2 Superposition d'ondes lumineuses . . . . .	10
S.9.3 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young . . . . .	10
S.9.4 Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson . . . . .	11
S.10 Électromagnétisme . . . . .	11
S.10.1 Sources du champ électromagnétique . . . . .	12
S.10.2 Électrostatique . . . . .	12
S.10.3 Magnétostatique . . . . .	13
S.10.4 Équations de Maxwell . . . . .	14
S.11 Physique des ondes . . . . .	15
S.11.1 Propagation unidimensionnelle - Équation de d'Alembert . . . . .	15
S.11.2 Ondes acoustiques dans les fluides . . . . .	16
S.11.3 Ondes électromagnétiques dans le vide . . . . .	16
S.11.4 Phénomènes de propagation linéaires unidimensionnels . . . . .	17
S.12 Introduction à la physique quantique . . . . .	17
<b>Thème M – mouvements et interactions</b>	18
M.5 Moment cinétique . . . . .	18
M.6 Mouvement d'un solide . . . . .	18
M.7 Mécanique des fluides . . . . .	19
M.7.1 Description d'un fluide en écoulement . . . . .	20
M.7.2 Actions mécaniques dans un fluide en écoulement . . . . .	20
M.7.3 Écoulement interne incompressible dans une conduite . . . . .	20
M.7.4 Écoulement externe autour d'un obstacle . . . . .	20
<b>Thème E – énergie : conversions et transferts</b>	21
E.6 Rayonnement thermique . . . . .	21
E.7 Second principe de la thermodynamique . . . . .	21
<b>Thème T – phénomènes de transport</b>	22
T.1 Diffusion de particules . . . . .	22
T.2 Conduction thermique . . . . .	22

## Thème S – ondes et signaux

## S.8 Filtrage linéaire

L'objectif principal de cette partie n'est pas de former les étudiants aux aspects techniques des calculs des fonctions de transfert et des tracés de diagrammes de Bode mais de mettre l'accent sur l'interprétation des propriétés du signal de sortie connaissant celles du signal d'entrée. Seule la détermination des fonctions de transfert du premier ordre est exigible des étudiants. La fonction de transfert d'un système linéaire du second ordre peut être exploitée, seulement dans le cadre expérimental, à condition d'être fournie ou déterminée expérimentalement.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Signaux périodiques.	Définir la valeur moyenne et la valeur efficace d'un signal périodique. Calculer la valeur efficace d'un signal sinusoïdal. Analyser la décomposition fournie d'un signal périodique en une somme de signaux sinusoïdaux.



Fonction de transfert harmonique. Diagramme de Bode.	Tracer le diagramme de Bode (amplitude et phase) associé à une fonction de transfert d'ordre 1. Utiliser les échelles logarithmiques et interpréter les comportements asymptotiques des diagrammes de Bode en amplitude d'après l'expression de la fonction de transfert. <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental exploitant les propriétés de la fonction de transfert, fournie ou déterminée expérimentalement, d'un système linéaire d'ordre 1 ou 2.</b>
Modèles de filtres linéaires passifs.	<b>À partir d'une analyse spectrale, étudier le filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal par un système linéaire passif d'ordre 1 ou 2 dont la fonction de transfert est fournie ou déterminée expérimentalement.</b>

## S.9 Optique ondulatoire

Le programme d'optique de la classe de TPC2 s'inscrit dans la continuité de la partie « **S.1 Formation des images** » du programme de physique de TPC1. Dans une première partie, on introduit les éléments spécifiques à l'émission, la propagation et la détection des ondes lumineuses. Les parties suivantes traitent essentiellement des interférences lumineuses : partant des trous d'Young éclairés par une source ponctuelle strictement monochromatique, on étudie ensuite l'évolution de la visibilité sous l'effet d'un élargissement spatial et spectral de la source. Le brouillage des franges précédentes sous l'effet d'un élargissement spatial de la source conduit à montrer l'un des avantages de l'interféromètre de Michelson éclairé par une source étendue (franges d'égale inclinaison et franges d'égale épaisseur) en constatant expérimentalement l'existence d'un lieu de localisation des franges. L'objectif de cette partie n'est pas le calcul de la répartition de l'intensité lumineuse modélisant les figures observées : on exploite le plus souvent les variations de l'ordre d'interférences (avec la position du point d'observation, la position du point source et la longueur d'onde) pour interpréter les observations sans expliciter l'intensité de la lumière.

### S.9.1 Modèle scalaire des ondes lumineuses

La partie « **S.9.1 Modèle scalaire des ondes lumineuses** » introduit les outils nécessaires à l'étude des phénomènes ondulatoires dans le domaine de l'optique. La réponse des récepteurs est supposée proportionnelle à la moyenne du carré du champ électrique de l'onde. Le programme utilise uniquement le mot « intensité » pour décrire la grandeur détectée mais on peut employer indifféremment les termes « intensité » et « éclaircissement » sans chercher à les distinguer à ce niveau de formation. Le théorème de Malus (orthogonalité des rayons lumineux et des surfaces d'onde dans l'approximation de l'optique géométrique) est admis. Dans le cadre de l'optique, on qualifie une onde de plane ou sphérique par référence à la forme géométrique des surfaces d'onde.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modèle de propagation dans l'approximation de l'optique géométrique</b> Vibration lumineuse.	Associer la grandeur scalaire de l'optique à une composante d'un champ électrique.
Chemin optique. Retard de phase dû à la propagation.	Exprimer le retard de phase en un point en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique.
Surfaces d'onde. Théorème de Malus. Onde plane, onde sphérique; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	Utiliser l'égalité des chemins optiques sur les rayons d'un point objet à son image. Associer une description de la formation des images en termes de rayons lumineux et en termes de surfaces d'onde.
<b>Modèle d'émission</b> Largeur spectrale. Cohérence temporelle.	Classer différentes sources lumineuses (lampe spectrale basse pression, laser, source de lumière blanche...) en fonction du temps de cohérence de leurs diverses radiations. Citer quelques ordres de grandeur des longueurs de cohérence temporelle associées à différentes sources. Relier, en ordre de grandeur, le temps de cohérence et la largeur spectrale de la radiation considérée.

<b>Réception d'une onde lumineuse</b> Récepteurs. Intensité lumineuse.	Comparer le temps de réponse d'un récepteur usuel (œil, photodiode, capteur CCD) aux temps caractéristiques des vibrations lumineuses. Relier l'intensité lumineuse à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique. <b>Mettre en œuvre un capteur optique.</b>
---	---

### S.9.2 Superposition d'ondes lumineuses

Dans la partie « **S.9.2 Superposition d'ondes lumineuses** », le professeur est invité à s'appuyer sur des situations concrètes, des illustrations expérimentales et des simulations afin de donner du sens aux différentes notions présentées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques non synchrones ou incohérentes entre elles.	Justifier l'additivité des intensités.
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel.  Contraste.	Établir la formule de Fresnel. Identifier une situation de cohérence entre deux ondes et utiliser la formule de Fresnel. Associer un bon contraste à des ondes d'intensités voisines.
Superposition de $N$ ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique dans le cas $N \gg 1$ : cas particulier du réseau de fentes par transmission.	Expliquer qualitativement l'influence de $N$ sur l'intensité et la finesse des franges brillantes observées. Établir et utiliser la relation donnant la direction des maxima d'intensité derrière un réseau de fentes rectilignes parallèles. <b>Étudier le spectre d'une source lumineuse à l'aide d'un réseau et d'un goniomètre.</b>

### S.9.3 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Dans la partie « **S.9.3 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young** », les trous d'Young permettent de confronter théorie et expérience. En revanche, les fentes d'Young sont abordées de manière exclusivement expérimentale. Aucun autre interféromètre à division du front d'onde n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Dispositif-modèle des trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif (source ponctuelle à grande distance finie; observation à grande distance finie).</b> Champ d'interférences. Ordre d'interférences. Franges d'interférences.	Définir, déterminer et utiliser l'ordre d'interférences. Justifier la forme des franges observées sur un écran éloigné parallèle au plan contenant les trous d'Young.
<b>Du dispositif-modèle au dispositif réel.</b> Fentes d'Young. Montage de Fraunhofer.	Expliquer qualitativement l'intérêt pratique du dispositif des fentes d'Young comparativement aux trous d'Young. Exprimer l'ordre d'interférences sur l'écran dans le cas d'un dispositif des fentes d'Young utilisé en configuration de Fraunhofer.
Perte de contraste par élargissement spatial de la source.	Utiliser le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $ \Delta p  > 1/2$ , où $\Delta p$ est évalué sur la moitié de l'étendue spatiale de la source, pour interpréter des observations expérimentales.

Perte de contraste par élargissement spectral de la source.	Utiliser le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $ \Delta p  > 1/2$ , où $\Delta p$ est évalué sur la moitié de l'étendue spectrale de la source, pour interpréter des observations expérimentales. Relier la longueur de cohérence temporelle, la largeur spectrale et la longueur d'onde en ordres de grandeur.
Observations en lumière blanche (blanc d'ordre supérieur, spectre cannelé).	Déterminer les longueurs d'onde des cannelures.

#### S.9.4 Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson

Dans le prolongement de la partie précédente, la partie « **S.9.4 Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : l'interféromètre de Michelson** » vise à mettre en lumière l'intérêt des dispositifs interférentiels par division d'amplitude, en s'appuyant sur l'exemple de l'interféromètre de Michelson. L'accent est ainsi mis sur l'importance expérimentale de ces dispositifs, notamment dans le domaine de la métrologie. Lors de la modélisation de l'interféromètre de Michelson, la séparatrice est supposée d'épaisseur négligeable.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Interféromètre de Michelson équivalent à une lame d'air éclairée par une source spatialement étendue.</b> Localisation des franges. Franges d'égale inclinaison.	Justifier les conditions d'observation des franges d'égale inclinaison, le lieu de localisation des franges étant admis. Établir et utiliser l'expression de l'ordre d'interférences en fonction de l'épaisseur de la lame, l'angle d'incidence et la longueur d'onde. <b>Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation adaptées à l'utilisation d'un interféromètre de Michelson en lame d'air.</b> <b>Mesurer l'écart en longueur d'onde d'un doublet et la longueur de cohérence d'une radiation.</b> <b>Interpréter des observations faites en lumière blanche avec l'interféromètre de Michelson en configuration lame d'air.</b>
<b>Interféromètre de Michelson équivalent à un coin d'air éclairé par une source spatialement étendue.</b> Localisation des franges. Franges d'égale épaisseur.	Justifier les conditions d'observation des franges d'égale épaisseur, le lieu de localisation des franges étant admis. Utiliser l'expression donnée de la différence de marche en fonction de l'épaisseur pour exprimer l'ordre d'interférences. <b>Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation adaptées à l'utilisation d'un interféromètre de Michelson en coin d'air.</b> <b>Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</b> <b>Interpréter des observations faites en lumière blanche avec l'interféromètre de Michelson en configuration coin d'air.</b>

## S.10 Électromagnétisme

Cette partie s'inscrit dans le prolongement de l'introduction à l'électromagnétisme vue en première année, où étaient décrites sur un plan qualitatif les sources des champs électrique et magnétique. Le programme de seconde année apporte les éléments constitutifs de la théorie de Maxwell des phénomènes électromagnétiques. Il importe que les étudiants soient formés à exploiter des cartes de lignes de champ fournies, exploiter des propriétés de symétrie, manipuler les équations locales et intégrales. Le cours d'électromagnétisme donne aussi l'occasion de manipuler des modèles (dipôles, conden-

sateur plan, solénoïde long, etc.). Toute modélisation d'une distribution de courants électriques par une distribution de courants électriques superficiels est exclue. Le modèle du plan infini uniformément chargé en surface est la seule distribution de charges électriques en surface étudiée, en lien avec le modèle du condensateur plan. S'agissant des potentiels, on se limite à introduire le potentiel scalaire en électrostatique et à faire remarquer que le champ électrique ne dérive pas d'un potentiel scalaire en régime variable. L'apprentissage de l'électromagnétisme contribue à la maîtrise progressive des opérateurs d'analyse vectorielle. Il convient d'introduire ces opérateurs en insistant sur le contenu physique sous-jacent. L'étude de l'électromagnétisme n'est pas centrée sur les calculs de champs : ceux-ci se limitent donc à des calculs motivés par des applications pratiques d'intérêt évident.

### S.10.1 Sources du champ électromagnétique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Description microscopique et mésoscopique des sources du champ électromagnétique</b> Densité volumique de charges. Charge traversant un élément de surface fixe et vecteur densité de courant électrique. Intensité du courant électrique.	Exprimer la densité volumique de charge et le vecteur densité de courant en fonction de la vitesse moyenne des porteurs de charge, de leur charge et de leur densité volumique. Relier l'intensité du courant et le flux du vecteur densité de courant électrique.
<b>Conservation de la charge électrique</b> Équation locale de conservation de la charge électrique.	Établir l'équation traduisant la conservation de la charge électrique dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Citer et utiliser une généralisation admise en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence, son expression étant fournie. Exploiter le caractère conservatif du vecteur densité de courant électrique en régime stationnaire; relier cette propriété à la loi des nœuds de l'électrocinétique.
<b>Conduction électrique dans un conducteur ohmique</b> Loi d'Ohm locale. Conductivité électrique.	Établir l'expression de la conductivité électrique à l'aide d'un modèle microscopique, l'action de l'agitation thermique et des défauts du réseau étant décrite par une force de frottement fluide linéaire. Établir l'expression de la résistance électrique d'une portion de conducteur filiforme.
Effet thermique du courant électrique : loi de Joule locale.	Exprimer la puissance volumique dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique.

### S.10.2 Électrostatique

Cette partie introduit les lois de l'électrostatique et quelques applications. Les calculs de champs doivent être motivés par l'utilisation de ces champs pour étudier des situations d'intérêt pratique évident. Ces calculs ne s'appuient sur la loi de Coulomb que pour des distributions de charges discrètes. Dans le cas des distributions continues, on se limite aux situations de haute symétrie permettant de calculer le champ par le théorème de Gauss et aux superpositions de champs ainsi obtenus.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Champ électrostatique</b> Loi de Coulomb. Champ et potentiel électrostatiques créés par une charge électrique ponctuelle. Principe de superposition.	Exprimer le champ et le potentiel électrostatiques créés par une distribution discrète de charges électriques. Citer quelques ordres de grandeur de champs électrostatiques.
Symétries.	Exploiter les propriétés de symétrie des sources (translation, rotation, symétrie plane, conjugaison de charges électriques) pour prévoir des propriétés du champ électrostatique créé.

Circulation du champ électrostatique. Potentiel électrostatique. Équations locales.	Relier l'existence d'un potentiel électrostatique à la nullité du rotationnel du vecteur champ électrostatique. Justifier l'orthogonalité des lignes de champ avec les surfaces équipotentielles et leur orientation dans le sens des potentiels décroissants.
Théorème de Gauss et équation locale de Maxwell-Gauss.	Choisir une surface adaptée et utiliser le théorème de Gauss.
Lignes de champ électrostatique. Équipotentielles.	Justifier qu'une carte de lignes de champ puisse ou non être celle d'un champ électrostatique. Repérer, sur une carte de champ électrostatique, d'éventuelles sources du champ et leur signe. Associer l'évolution de la norme du champ électrostatique à l'évasement des tubes de champ loin des sources. Relier équipotentielles et lignes de champ électrostatique. Évaluer la norme du champ électrostatique à partir d'un réseau de lignes équipotentielles.
<b>Distribution dipolaire de charges électriques</b>	
Modèle du dipôle électrostatique. Moment dipolaire. Potentiel et champ créés par un dipôle électrostatique.	Citer les conditions de l'approximation dipolaire. Établir l'expression du potentiel électrostatique. Comparer la décroissance du champ et du potentiel avec la distance dans le cas d'une charge ponctuelle et dans le cas d'un dipôle électrostatique. Tracer l'allure des lignes de champ électrostatique engendrées par un dipôle électrostatique.
Actions subies par un dipôle placé dans un champ électrostatique d'origine extérieure : résultante et moment.	Utiliser les expressions fournies de la résultante et du moment des actions subies par un dipôle placé dans un champ électrostatique d'origine extérieure.
Énergie potentielle d'un dipôle électrostatique rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure.	Utiliser l'expression fournie de l'énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure. Prévoir qualitativement l'évolution d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure.
Interactions ion-molécule et molécule-molécule.	Expliquer qualitativement la solvatation des ions dans un solvant polaire.
Dipôle induit. Polarisabilité.	Associer la polarisabilité et le volume de l'atome en ordre de grandeur.
<b>Modèle du condensateur plan sans effet de bord</b>	
Plan infini uniformément chargé en surface.	Établir l'expression du champ créé par un plan infini uniformément chargé en surface.
Condensateur plan. Capacité. Densité volumique d'énergie électrostatique.	Établir l'expression du champ créé par un condensateur plan. Déterminer l'expression de la capacité d'un condensateur plan. Déterminer l'expression de la densité volumique d'énergie électrostatique dans le cas du condensateur plan à partir de celle de l'énergie du condensateur.

### S.10.3 Magnétostatique

L'étude du champ magnétique en régime stationnaire prend appui sur les équations locales : la loi de Biot et Savart ne figure pas au programme. L'objectif réside davantage dans l'étude des propriétés des champs magnétiques que dans leur calcul : les calculs de champ magnétique doivent donc se limiter à des situations d'intérêt pratique évident. Enfin, la notion de potentiel-vecteur est hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Champ magnétostatique</b> Équations locales de la magnétostatique et formes intégrales : flux conservatif et théorème d'Ampère.	Choisir un contour fermé et une surface et les orienter pour appliquer le théorème d'Ampère.

Linéarité des équations	Utiliser une méthode de superposition.
Propriétés de symétrie.	Exploiter les propriétés de symétrie des sources (rotation, symétrie plane) pour prévoir des propriétés du champ créé.
Propriétés topographiques.	Justifier qu'une carte de lignes de champ puisse ou non être celle d'un champ magnétostatique. Repérer, sur une carte de champ magnétostatique, d'éventuelles sources du champ et leur sens. Associer l'évolution de la norme d'un champ magnétique à l'évasement des tubes de champ.
<b>Exemples de champs magnétostatiques</b> Modèle du câble rectiligne infini. Solénoïde long sans effets de bords.  Inductance propre. Densité volumique d'énergie magnétique.	Déterminer le champ créé par un câble rectiligne infini. Établir et citer l'expression du champ à l'intérieur d'un solénoïde long, la nullité du champ extérieur étant admise. Établir les expressions de l'inductance propre et de l'énergie d'une bobine modélisée par un solénoïde long. Associer l'énergie d'une bobine à une densité volumique d'énergie magnétique.
<b>Dipôles magnétostatiques</b> Moment magnétique d'une boucle de courant plane.	Relier le moment magnétique d'un atome d'hydrogène à son moment cinétique.
Actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure : résultante et moment.	Utiliser les expressions fournies de la résultante et du moment des actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.
Énergie potentielle d'un dipôle magnétique rigide placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.	Utiliser l'expression fournie de l'énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ magnétostatique d'origine extérieure. Prévoir qualitativement l'évolution d'un dipôle rigide dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.

### S.10.4 Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell, sous leur forme générale, sont énoncées en tant que postulat fondamental de l'électromagnétisme. La notion de potentiel-vecteur est hors-programme mais on insiste sur le fait que le champ électrique ne dérive pas en général d'un potentiel scalaire. L'étude détaillée des ondes électromagnétiques qui prolonge cette partie est vue dans la partie S.11.3. On ne mentionne ici les phénomènes de propagation, et en particulier le caractère non instantané des interactions magnétiques, que pour les négliger dans le cadre des régimes lentement variables. Le cadre adopté est celui de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) magnétique, pour lequel les effets des distributions de courants électriques dominent ceux des distributions de charges électriques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Équations de Maxwell</b> Force de Lorentz. Équations locales de Maxwell. Formes intégrales.  Linéarité.	Utiliser les équations de Maxwell sous forme locale ou intégrale. Relier l'équation de Maxwell-Faraday et la loi de Faraday. Établir l'équation locale de la conservation de la charge à partir des équations de Maxwell. Utiliser une méthode de superposition.
<b>Aspects énergétiques</b> Vecteur de Poynting. Densité volumique d'énergie électromagnétique. Équation locale de Poynting.	Utiliser les grandeurs énergétiques pour conduire des bilans d'énergie électromagnétique. Associer le vecteur de Poynting et l'intensité lumineuse utilisée dans le domaine de l'optique.
<b>Approximation des régimes quasi-stationnaires magnétique</b> Caractère non instantané des interactions électromagnétiques. Célérité de la lumière dans le vide.	Calculer la valeur approchée de la durée de propagation dans le vide d'une onde électromagnétique sur une distance donnée, et inversement.

ARQS magnétique.	Discuter l'approximation des régimes quasi-stationnaires. Simplifier et utiliser les équations de Maxwell et l'équation de conservation de la charge dans l'approximation du régime quasi-stationnaire magnétique. Étendre le domaine de validité des expressions des champs magnétiques obtenues en régime stationnaire.
------------------	---

## S.11 Physique des ondes

Le programme de physique des ondes de TPC2 s'inscrit dans le prolongement de la partie relative à la propagation d'un signal du programme de physique de TPC1. Il s'agit désormais de mettre tout d'abord en place l'équation d'onde de d'Alembert dans des contextes différents (en mécanique, en électrocinétique, en acoustique, en électromagnétisme) et de présenter ensuite des phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants, la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu conducteur ohmique en constituant un exemple.

### S.11.1 Propagation unidimensionnelle - Équation de d'Alembert

La mise en équation des petits mouvements transverses d'une corde vibrante et de la propagation d'un signal électrique dans un câble coaxial permet de montrer l'universalité de l'équation de d'Alembert. L'influence des propriétés physiques (inertie et élasticité) sur la célérité des ondes mécaniques dans un milieu élastique est discutée au regard de l'étude menée pour la corde vibrante.

La corde vibrante constitue un support privilégié et explicite pour mettre en évidence la notion de mode propre de vibration. Le câble coaxial offre l'occasion de mettre en évidence des grandeurs physiques couplées et d'aborder, dans le cadre expérimental, les phénomènes de réflexion d'une onde sur une discontinuité d'impédance.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Ondes mécaniques</b> Ondes transversales sur une corde vibrante.	Établir l'équation d'onde décrivant les ondes transversales sur une corde vibrante infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements transverses.
Équation de d'Alembert; célérité.	Identifier l'équation de d'Alembert et en extraire l'expression de la célérité. Relier qualitativement la célérité d'une onde mécanique, la raideur et l'inertie du milieu support, par analogie avec la célérité des ondes transversales sur une corde vibrante.
Ondes progressives, ondes progressives harmoniques; ondes stationnaires.	Différencier une onde stationnaire d'une onde progressive. Utiliser qualitativement l'analyse de Fourier pour décrire une onde non harmonique.
Modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. Résonances d'une corde de Melde.	Décrire les modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. Interpréter quantitativement les résonances observées avec la corde de Melde en négligeant l'amortissement.
<b>Ondes électrocinétiques</b> Ondes de tension et de courant dans un câble coaxial.	Établir les équations de propagation dans un câble coaxial sans pertes modélisé comme un milieu continu caractérisé par une inductance linéique et une capacité linéique.
Impédance caractéristique.	Établir l'expression de l'impédance caractéristique d'un câble coaxial.
Réflexion en amplitude sur une impédance terminale.	<b>Étudier la réflexion en amplitude de tension d'une onde électrique à l'extrémité d'un câble coaxial pour une impédance terminale nulle, infinie ou résistive.</b>

### S.11.2 Ondes acoustiques dans les fluides

L'équation de d'Alembert pour la surpression acoustique est établie par application du théorème de la quantité de mouvement à une tranche de gaz dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes, dans le cadre du modèle du gaz parfait et de l'approximation acoustique. L'expression de la célérité des ondes acoustiques dans un fluide compressible est construite par analyse dimensionnelle puis admise sans démonstration supplémentaire. La notion d'impédance acoustique est introduite afin de caractériser les phénomènes de réflexion et de transmission des ondes acoustiques à l'interface entre deux fluides.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Approximation acoustique.	Classer les ondes acoustiques par domaines fréquentiels. Valider l'approximation acoustique.
Équation de d'Alembert pour la surpression acoustique dans un gaz.	Établir, par application du théorème de la quantité de mouvement à une tranche de gaz, l'équation de propagation de la surpression acoustique au sein d'un gaz, supposé parfait, dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes.
Célérité des ondes acoustiques.	Exprimer la célérité des ondes acoustiques en fonction de la température pour un gaz parfait. Construire, par analyse dimensionnelle, l'expression de la célérité des ondes acoustiques dans un fluide en fonction de sa masse volumique et de sa compressibilité isentropique.
Ondes planes progressives harmoniques : caractère longitudinal, impédance acoustique.	Exploiter la notion d'impédance acoustique pour faire le lien entre les champs de surpression et de vitesse d'une onde plane progressive harmonique. Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques.
Intensité sonore (puissance acoustique surfacique moyenne). Niveau d'intensité sonore.	Citer quelques ordres de grandeur de niveaux d'intensité sonore.
Réflexion et transmission d'une onde acoustique plane progressive sous incidence normale sur une interface plane infinie entre deux fluides : coefficients de réflexion et de transmission en amplitude des surpressions et des puissances acoustiques surfaciques moyennes.	Expliciter des conditions aux limites à une interface. Établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion. Associer l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance.
Effet Doppler.	<b>Mettre en œuvre une détection synchrone pour mesurer une vitesse par décalage Doppler.</b>

### S.11.3 Ondes électromagnétiques dans le vide

La mise en équation de la propagation des ondes électromagnétiques dans une région vide de charges et de courant s'appuie sur les équations de Maxwell introduites dans la partie « S.10.4 - Équations de Maxwell ».

Notions et contenus	Capacités exigibles
Équations de propagation d'un champ électromagnétique dans une région sans charge ni courant électriques.	Établir et citer les équations de propagation d'un champ électromagnétique dans le vide.
Structure d'une onde plane progressive harmonique.	Établir et exploiter la structure d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique. Utiliser la superposition d'ondes planes progressives harmoniques pour justifier les propriétés d'ondes électromagnétiques planes progressives non harmoniques.
Aspects énergétiques.	Relier la direction du vecteur de Poynting et la direction de propagation de l'onde électromagnétique. Interpréter le flux du vecteur de Poynting en termes particuliers. Citer quelques ordres de grandeur de flux énergétiques surfaciques moyens et les relier aux ordres de grandeur des champs électriques associés.



Polarisation des ondes électromagnétiques planes progressives harmoniques : polarisation elliptique, circulaire et rectiligne. Loi de Malus.	Relier l'expression du champ électrique à l'état de polarisation de l'onde. <b>Utiliser la loi de Malus.</b> <b>Reconnaître une lumière polarisée rectilignement.</b> <b>Distinguer une lumière non polarisée d'une lumière totalement polarisée.</b> <b>Utiliser une lame quart d'onde ou demi-onde pour modifier ou analyser un état de polarisation, avec de la lumière totalement polarisée.</b>
---	--

#### S.11.4 Phénomènes de propagation linéaires unidimensionnels

Cette partie permet de présenter des phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants. Elle peut, par exemple et sans obligation, s'appuyer sur une modélisation du câble coaxial différente et complémentaire de celle vue dans la partie « **S.11.1 Propagation unidimensionnelle - Équation de d'Alembert** ». Les solutions envisagées sont exprimées sous la forme d'ondes harmoniques planes, écrites en représentation complexe. En ce qui concerne les ondes électromagnétiques, seule la propagation dans un milieu conducteur ohmique entre dans le cadre du programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Dispersion et absorption</b> Propagation unidimensionnelle d'une onde harmonique dans un milieu linéaire.  Dispersion, absorption.	Identifier le caractère linéaire d'une équation aux dérivées partielles. Établir la relation de dispersion caractéristique d'un phénomène de propagation en utilisant des ondes de la forme $\exp(\pm i(kx - \omega t))$ . Distinguer différents types de comportements selon la valeur de la pulsation.  Définir un milieu dispersif. Citer des exemples de situations de propagation dispersive et non dispersive. Associer les parties réelle et imaginaire de $\underline{k}$ aux phénomènes de dispersion et d'absorption. <b>Étudier la propagation d'une onde électrique dans un câble coaxial.</b>
<b>Ondes électromagnétiques dans un conducteur ohmique</b> Propagation d'une onde électromagnétique plane harmonique unidirectionnelle dans un conducteur ohmique de conductivité réelle. Effet de peau dans un conducteur ohmique.	Établir la relation de dispersion des ondes électromagnétiques dans un conducteur ohmique à basses fréquences. Associer l'atténuation de l'onde dans le milieu conducteur à une dissipation d'énergie. Estimer l'ordre de grandeur de l'épaisseur de peau du cuivre à différentes fréquences.

## S.12 Introduction à la physique quantique

La partie « **S.12 - Introduction à la physique quantique** » est résolument pensée autour de la présentation d'expériences réalisées depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle. Cette partie vise à questionner la représentation classique du monde proposée dans les autres parties du programme. Les concepts essentiels abordés sont la dualité onde-particule, l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde, l'inégalité de Heisenberg spatiale et la quantification de l'énergie dans les atomes. Pour illustrer ce dernier point, l'approche historique suivie par Bohr, articulant l'existence affirmée d'états stationnaires de l'atome d'hydrogène, de transitions énergétiques quantiques et le principe de correspondance, permet de réinvestir les compétences acquises par les étudiants en mécanique du point matériel pour montrer comment le modèle planétaire de Bohr, malgré ses limites, permet d'interpréter les observations expérimentales et la formule de Rydberg. Cette approche donne également l'occasion d'insister sur la démarche de modélisation à l'œuvre en physique.

La réflexion sur les thèmes abordés ici est avant tout qualitative; toute dérive calculatoire exploitant les concepts propres à la physique quantique doit être soigneusement évitée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Dualité onde-particule pour la lumière et la matière</b> Photon : énergie et impulsion.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.
Onde de matière associée à une particule. Relation de de Broglie.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire de la matière. Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.
<b>Introduction au formalisme quantique</b> Fonction d'onde : introduction qualitative, interprétation probabiliste.	Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes.
Inégalité de Heisenberg spatiale.	Exploiter l'inégalité en ordre de grandeur $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ .
<b>Quantification de l'énergie</b> Modèle planétaire de Bohr. Limites.	Interpréter la formule de Rydberg à l'aide du modèle de Bohr.
Modèle du puits de potentiel unidimensionnel de profondeur infinie.	Exploiter l'inégalité de Heisenberg spatiale pour mettre en évidence l'existence d'une énergie minimale de confinement. Obtenir les niveaux d'énergie par analogie avec les modes propres d'une corde vibrante. Établir le lien qualitatif entre confinement spatial et quantification.

## Thème M – mouvements et interactions

En TPC2, le thème « **Mouvements et interactions** » est structuré en trois parties : moment cinétique, mouvement d'un solide et mécanique des fluides. L'accent est porté sur les lois de conservation du moment cinétique, de l'énergie mécanique et de la quantité de mouvement comme outils d'étude des mouvements.

### M.5 Moment cinétique

La partie « **M.5 Moment cinétique** » est l'occasion d'introduire les notions de moment cinétique et de moment d'une force. L'un des objectifs visés est que les étudiants disposent de représentations concrètes qui permettent de donner du sens aux grandeurs vectorielles et scalaires utilisées ; c'est notamment pour cela que le bras de levier est introduit. Comme souligné précédemment, l'accent est mis sur l'identification des situations où le moment cinétique est conservé.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un point et par rapport à un axe orienté.	Relier la direction et le sens du vecteur moment cinétique aux caractéristiques du mouvement. Utiliser le caractère algébrique du moment cinétique scalaire.
Moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté.	Exprimer le moment d'une force par rapport à un axe orienté en utilisant le bras de levier.
Théorème du moment cinétique en un point fixe dans un référentiel galiléen. Conservation du moment cinétique.	Identifier les cas de conservation du moment cinétique.

### M.6 Mouvement d'un solide

Concernant le solide en rotation autour d'un axe fixe dans la partie « **M.6 Mouvement d'un solide** », il s'agit de définir le mouvement en remarquant que tout point du solide décrit un cercle autour de l'axe avec une même vitesse angulaire et de déterminer la vitesse de chaque point en fonction de celle-ci et de la distance à l'axe de rotation.

Des exemples de dynamique du solide sont introduits (translation et rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen), avec toutefois des limitations strictes : l'étude générale d'un mouvement composé d'une translation dans un référentiel galiléen et d'une rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel barycentrique ne figure pas au programme.

L'étude du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe gardant une direction fixe dans un référentiel galiléen mais pour lequel l'axe de rotation est en mouvement est exclue.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Description du mouvement d'un solide dans deux cas particuliers</b> Définition d'un solide.	Différencier un solide d'un système déformable.
Translation.	Reconnaître et décrire une translation rectiligne ainsi qu'une translation circulaire.
Rotation autour d'un axe fixe.	Décrire la trajectoire d'un point quelconque du solide et exprimer sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.
<b>Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide mobile autour d'un axe fixe</b> Moment cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe : moment d'inertie.	Exploiter, pour un solide, la relation entre le moment cinétique scalaire, la vitesse angulaire de rotation et le moment d'inertie fourni. Relier qualitativement le moment d'inertie à la répartition des masses.
Couple.	Définir un couple.
Liaison pivot.	Définir une liaison pivot et justifier le moment qu'elle peut produire.
Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.	Exploiter le théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.
<b>Approche énergétique du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté, dans un référentiel galiléen</b> Énergie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Utiliser l'expression de l'énergie cinétique, l'expression du moment d'inertie étant fournie.
Théorème de l'énergie cinétique pour un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Établir, dans ce cas, l'équivalence entre le théorème scalaire du moment cinétique et celui de l'énergie cinétique.
Pendule pesant.	Établir l'équation du mouvement. Établir une intégrale première du mouvement. <b>Réaliser l'étude énergétique d'un pendule pesant et mettre en évidence une diminution de l'énergie mécanique.</b> <b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation, mettre en évidence le non isochronisme des oscillations.

## M.7 Mécanique des fluides

La partie « **M.7 Mécanique des fluides** » vient compléter les parties « **E.3 Statique des fluides** » et « **E.4 Bilans énergétiques pour un fluide en écoulement stationnaire** » vues en TPC1. En particulier, l'enseignement de mécanique des fluides en TPC2 peut donner l'occasion de réactiver les connaissances et les capacités des étudiants relatives à la relation de Bernoulli qui figure dans le programme de physique de TPC1.

Les grandeurs pertinentes caractérisant un écoulement sont d'abord introduites. La notion de dérivée particulaire ainsi que les équations locales d'Euler et de Navier-Stokes ne sont pas au programme.

Deux modèles d'écoulements de fluides réels sont proposés : les écoulements de Couette plan et de Poiseuille d'un fluide newtonien. Le champ des vitesses est, dans les deux cas, déterminé à l'aide d'un bilan de quantité de mouvement qui permet de réinvestir les capacités déjà développées en mécanique et de faire intervenir les actions mécaniques dans un fluide en écoulement qui sont détaillées ci-après. Le nombre de Reynolds est introduit lors de l'examen de l'écoulement de Poiseuille ; il est présenté comme le nombre sans dimension pilotant la transition d'un écoulement laminaire vers un écoulement turbulent.

L'étude de l'écoulement externe autour d'un obstacle, et en particulier autour d'une aile d'avion, vient clore la partie « **M.7 Mécanique des fluides** ».

### M.7.1 Description d'un fluide en écoulement

Notions et contenus	Capacités exigibles
Particule de fluide.	Définir la particule de fluide comme un système mésoscopique de masse constante.
Champ eulérien des vitesses.	Distinguer vitesse microscopique et vitesse mésoscopique. Définir une ligne de courant, un tube de courant. Interpréter un document (photographie ou vidéo d'un écoulement, schéma) et identifier quelques caractéristiques de l'écoulement (lignes de courant, profil de vitesse, stationnarité du champ de vitesse, etc.).
Masse volumique $\mu$ .	Citer des ordres de grandeur des masses volumiques de l'eau et de l'air dans les conditions usuelles.
Débit de masse, débit de volume.	Calculer un débit de masse ou de volume.
Écoulement stationnaire.	Établir et exploiter la conservation du débit de masse le long d'un tube de courant.
Écoulement incompressible.	Établir et exploiter la conservation du débit de volume le long d'un tube de courant.

### M.7.2 Actions mécaniques dans un fluide en écoulement

Notions et contenus	Capacités exigibles
Forces de pression.	Exprimer la force de pression exercée par un fluide sur une surface élémentaire.
Contraintes tangentielles dans un écoulement $\vec{v} = v_x(y)\vec{u}_x$ au sein d'un fluide newtonien; viscosité dynamique.	Utiliser l'expression fournie $d\vec{F} = \pm\eta \frac{\partial v_x}{\partial y} dS \vec{u}_x$ . Citer des ordres de grandeur de viscosité dynamique de différents fluides : air, eau et lubrifiant. Exploiter la condition d'adhérence à l'interface fluide-solide.

### M.7.3 Écoulement interne incompressible dans une conduite

Notions et contenus	Capacités exigibles
Écoulement de Couette plan.	Établir l'expression du profil de vitesse pour l'écoulement de Couette plan d'un fluide newtonien à partir d'un bilan de quantité de mouvement.
Écoulement de Poiseuille.	Établir l'expression du profil de vitesse pour l'écoulement de Poiseuille d'un fluide newtonien, en régime laminaire, dans une conduite cylindrique à partir d'un bilan de quantité de mouvement.
Loi de Poiseuille.	Établir l'expression de la loi de Poiseuille donnant le débit de volume en fonction de la différence de pression entre l'entrée et la sortie d'une conduite cylindrique.
Résistance hydraulique. Associations en série et en parallèle de deux résistances hydrauliques.	Modéliser une association série ou parallèle de résistances hydrauliques par une résistance hydraulique équivalente.
Nombre de Reynolds. Notion d'écoulement laminaire ou turbulent.	Calculer un ordre de grandeur de la valeur du nombre de Reynolds de l'écoulement et l'interpréter compte tenu d'une valeur fournie du nombre de Reynolds critique.

### M.7.4 Écoulement externe autour d'un obstacle

Notions et contenus	Capacités exigibles
Force de traînée subie par une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme dans un fluide newtonien. Coefficient de traînée $C_x$ ; graphe de $C_x$ en fonction du nombre de Reynolds. Notion de couche limite.	Évaluer un nombre de Reynolds pour choisir un modèle de traînée linéaire ou un modèle de traînée quadratique.
Force de traînée et de portance d'une aile d'avion à haut nombre de Reynolds.	Définir et orienter les forces de portance et de traînée. Exploiter les graphes de $C_x$ et de $C_z$ en fonction de l'angle d'incidence.

## Thème E – énergie : conversions et transferts

### E.6 Rayonnement thermique

Dans la partie « **E.6 Rayonnement thermique** », une étude qualitative du rayonnement du corps noir est proposée sans qu'aucune formule ne soit exigible. Celle-ci permet également d'aborder de manière quantitative l'effet de serre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi du déplacement de Wien. Loi de Stefan-Boltzmann. Effet de serre. Albédo.	Exploiter les expressions fournies des lois du déplacement de Wien et de Stefan-Boltzmann. Analyser quantitativement l'effet de serre en s'appuyant sur un bilan énergétique dans le cadre d'un modèle à une couche.

### E.7 Second principe de la thermodynamique

L'étude du second principe de la thermodynamique s'inscrit dans la continuité du programme de thermodynamique de première année. L'expression de la fonction d'état entropie est systématiquement donnée et sa construction n'est pas une capacité visée. On cite, sans développement quantitatif, son interprétation en termes de désordre statistique, c'est-à-dire de perte d'information sur la connaissance de l'état microscopique d'un système, de façon à faciliter une interprétation intuitive des bilans d'entropie. Le professeur peut profiter de cette partie pour établir le lien entre l'inégalité de Clausius, admise en première année, et l'entropie créée. Les diagrammes  $(T, s)$  sont explicitement hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Fonction d'état entropie; entropie massique et entropie molaire.	Interpréter qualitativement une augmentation de l'entropie d'un système isolé comme une perte d'information sur la connaissance de l'état du système à l'échelle microscopique.
Entropie d'un gaz parfait, d'une phase condensée peu dilatante et peu compressible.	Exploiter l'expression fournie de la variation d'entropie entre deux états d'équilibre thermodynamique d'un gaz parfait ou d'une phase condensée peu dilatante et peu compressible.
Second principe de la thermodynamique pour un système fermé. Entropie échangée, entropie créée, bilan d'entropie.	Exploiter les propriétés d'extensivité et de fonction d'état de l'entropie. Formuler un bilan d'entropie sous forme infinitésimale ou intégrale. Associer la création d'entropie au caractère irréversible de la transformation.
Loi de Laplace.	Connaître la loi de Laplace et ses conditions d'application.
Cas particulier d'un changement d'état du corps pur.	Connaître et utiliser la relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie massiques associées à un changement d'état du corps pur : $\Delta h_{12}(T) = T \Delta s_{12}(T)$ .

## Thème T – phénomènes de transport

Cette partie est consacrée à la présentation du transport de matière diffusif et de la conduction thermique, avec une approche symétrique. L'énoncé des lois phénoménologiques de Fick et Fourier s'appuie sur la notion de vecteur densité de courant de particules ou d'énergie, qui sont utilisés afin d'établir l'expression des flux correspondant à travers une surface orientée plane, cylindrique ou sphérique, adaptée à la géométrie considérée. Afin d'éviter toute dérive calculatoire, toute situation où le champ de température ou la densité de particules dépend du temps est exclue, à l'exception des régimes quasi-stationnaires. Les régimes variables dans le temps peuvent cependant être approchés qualitativement à partir de la loi d'échelle exprimant l'échelle spatiale caractéristique, la durée caractéristique et le coefficient de diffusion, construite par analyse dimensionnelle du coefficient de diffusion. L'objectif principal de formation visé consiste en l'écriture de bilans de particules ou d'énergie en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.

Pour introduire ces notions, le professeur s'appuie sur des situations concrètes et motivantes pour les étudiants. L'étude de la conduction thermique entre deux systèmes de températures différentes permet de donner une assise théorique à la puissance thermique proportionnelle à leur écart de température, vue en première année.

### T.1 Diffusion de particules

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modèle phénoménologique de transport de matière</b> Flux convectif et flux diffusif de particules.	Distinguer un transport de matière diffusif d'un transport convectif.
Vecteur densité de courant de particules. Loi phénoménologique de Fick. Flux de particules.	Utiliser la loi de Fick pour établir l'expression d'un flux de particules à travers une surface orientée plane, cylindrique ou sphérique adaptée à la géométrie considérée.
Coefficient de diffusion.	Citer l'ordre de grandeur du coefficient de diffusion dans un gaz dans les conditions usuelles.
Loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusion.	Exploiter la loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusion.
Bilan de particules en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.	Établir un bilan de particules, éventuellement en présence de sources internes. Exploiter la conservation du flux de particules en régime stationnaire et en l'absence de sources internes.

### T.2 Conduction thermique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modèle phénoménologique de la conduction thermique</b> Vecteur densité de courant d'énergie. Loi phénoménologique de Fourier. Flux (ou puissance) thermique. Conductivité thermique.	Utiliser la loi de Fourier pour établir l'expression d'un flux thermique à travers une surface orientée plane, cylindrique ou sphérique adaptée à la géométrie considérée. Citer l'ordre de grandeur de la conductivité thermique de l'air, de l'eau, d'un béton et d'un métal, à température et pression ambiantes.
Coefficient de diffusivité thermique.	Exploiter la relation fournie exprimant le coefficient de diffusivité thermique en fonction de la conductivité thermique, de la masse volumique et de la capacité thermique massique.
Loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusivité thermique.	Exploiter la loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusivité thermique.
Bilan d'énergie en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.	Établir un bilan d'énergie, éventuellement en présence de sources internes. Exploiter la conservation du flux thermique en régime stationnaire et en l'absence de sources internes.

Résistance thermique.	Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique. Établir l'expression d'une résistance thermique dans le cas d'un modèle unidimensionnel. Utiliser les lois d'associations de résistances thermiques.
	<b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.</b>

## Deuxième partie

# Contenus thématiques

Les contenus thématiques de la classe de TPC2 complètent ceux introduits en TPC1 en chimie sur la constitution et les transformations de la matière et en physique sur la thermodynamique. Ils enrichissent des modèles déjà abordés et en introduisent de nouveaux tant à l'échelle microscopique que macroscopique : modèle quantique des atomes et des molécules, modèles de réacteurs ouverts, etc.

Tout au long des deux années, la formation en chimie privilégie la capacité de l'étudiant à raisonner, à prévoir et à transposer ses connaissances dans des situations nouvelles ou sur des espèces proches de celles étudiées, plutôt que sa capacité à restituer, à reproduire. Ainsi les programmes sont structurés autour des outils du raisonnement que sont les théories et les modèles de comportement macroscopique ou microscopique et non pas autour d'une présentation encyclopédique, systématique, des espèces chimiques et des réactions associées.

Il s'agit de montrer que la chimie est une science au sein de laquelle la dialectique entre savoirs et méthodes permet d'aborder des situations nouvelles et de construire de nouvelles connaissances en chimie mais aussi aux interfaces avec la biologie, la physique, les géosciences. Ainsi formés en chimie, les futurs ingénieurs ou chercheurs scientifiques pourront être acteurs de l'innovation, que ce soit dans le cadre de la recherche, du développement et de la production industrielle pour relever les défis sociétaux et environnementaux à venir.

L'ordre de présentation des contenus proposé n'est pas nécessairement celui qui doit être adopté par l'enseignant qui dispose de toute liberté pour effectuer des choix et établir sa propre progression annuelle dont le seul objectif reste de permettre l'acquisition par tous les étudiants de l'ensemble des capacités exigibles. Un travail en collaboration avec l'enseignant de physique est vivement recommandé afin de favoriser les apprentissages sur les domaines communs abordés dans les deux disciplines. Par ailleurs, les contenus thématiques précisent les concepts et les modèles à étudier : l'enseignant les aborde à partir de problématiques authentiques et les illustre par des applications concrètes et motivantes.

<b>1. Transformations chimiques de la matière : aspects thermodynamique et cinétique</b>	11
1.1 Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques . . . . .	12
1.2 Procédés industriels continus : aspects cinétiques et thermodynamiques . . . . .	13
1.3 Changements de phase de corps purs et de mélanges binaires . . . . .	14
1.4 Thermodynamique et cinétique des transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction . . . . .	15
<b>2. Constitution de la matière : modélisation quantique et réactivité</b>	17
2.1 Orbitales atomiques . . . . .	17
2.2 Orbitales moléculaires et réactivité . . . . .	17
2.3 Constitution et réactivité des complexes . . . . .	18
<b>3. Transformations de la matière en chimie organique</b>	20
3.1 Conversion de groupes caractéristiques . . . . .	21
3.2 Création de liaisons carbone-carbone . . . . .	22

## 1. Transformations chimiques de la matière : aspects thermodynamique et cinétique

Au laboratoire et dans l'industrie, l'innovation comme l'optimisation des techniques et des procédés de synthèse ou de séparation s'appuient sur des fondements thermodynamiques et cinétiques. La thermodynamique notamment permet de prévoir si la transformation envisagée est possible ou non et de trouver d'éventuelles pistes d'augmentation du rendement en faisant évoluer l'état d'équilibre final du système. Elle permet aussi d'appréhender les propriétés physico-chimiques des mélanges et d'envisager une voie d'accès aux corps purs. En classe de TPC1, l'étude des transferts thermiques dans le cas de transformations physico-chimiques isobares a été étudiée pour des réacteurs fermés. Elle est réinvestie en deuxième année dans le cadre de l'étude des réacteurs industriels.

Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- appliquer les deux principes de la thermodynamique à la transformation physico-chimique;
- aborder les changements d'échelle opérés dans les procédés industriels avec les transformations et effets thermiques mis en jeu dans des réacteurs continus;
- utiliser les diagrammes isobares de mélanges binaires pour interpréter les techniques de séparation;
- appliquer les notions de thermodynamique et de cinétique aux réactions d'oxydo-réduction mises en jeu dans les piles et les électrolyseurs.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :



- faire preuve de rigueur dans la définition et la description d'un système physico-chimique;
- modéliser un système réel;
- distinguer modélisation d'une transformation (réaction et écriture de l'équation de réaction) et description quantitative de l'évolution d'un système prenant en compte les conditions expérimentales choisies pour réaliser la transformation;
- établir un bilan thermique;
- confronter des grandeurs calculées ou tabulées à des mesures expérimentales;
- pratiquer un raisonnement qualitatif ou quantitatif à partir de représentations graphiques.

### 1.1 Deuxième principe de la thermodynamique appliqué aux transformations physico-chimiques

Le critère d'évolution spontanée d'un système, utilisé dès la première année en chimie, est démontré par application du second principe de la thermodynamique introduit en physique en première année.

On adopte pour les potentiels chimiques une expression générale,  $\mu_i = \mu_i^{\text{réf}} + RT \ln(a_i)$ , qui fait référence aux activités  $a_i$  introduites en première année. L'influence de la pression sur le potentiel chimique d'une espèce en phase condensée est illustrée à travers le phénomène d'osmose.

Les transformations physico-chimiques envisagées sont des transformations isobares. Pour le calcul des grandeurs standard de réaction, les enthalpies et entropies standard de réaction sont supposées indépendantes de la température. Les capacités numériques abordées en TPC1 pour déterminer l'état final d'un système dont la transformation est modélisée par une réaction unique peuvent être réactivées.

Problématiques, illustrations et applications sont choisies dans le domaine industriel (optimisation d'une synthèse, traitement d'une eau par procédés osmotiques, etc), en biologie (ATP et réactions couplées, respiration, etc.), et en géosciences (sédimentation, concrétions calcaires, etc.), mais aussi au niveau du laboratoire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Système physico-chimique</b> Identités thermodynamiques; potentiel chimique. Entropie, entropie molaire standard absolue. Enthalpie libre.</p>	<p>Écrire les identités thermodynamiques pour les fonctions U, H et G. Distinguer et justifier le caractère intensif ou extensif des grandeurs physiques utilisées.</p>
<p>Potentiel chimique dans le cas modèle du gaz parfait : <math>\mu_i = \mu_i^\circ(T) + RT \ln\left(\frac{p_i}{p^\circ}\right)</math> Potentiel chimique <math>\mu_i = \mu_i^{\text{réf}} + RT \ln(a_i)</math> dans les cas modèles de : — espèces chimiques en phase condensée en mélange idéal; — solutés infiniment dilués. Influence de la pression sur <math>\mu_i^{\text{réf}}</math> pour des espèces en phase condensée.</p>	<p>Établir l'expression du potentiel chimique dans le cas modèle du gaz parfait pur. Utiliser le potentiel chimique pour prévoir l'évolution d'un système contenant une espèce chimique dans plusieurs phases. Exprimer l'enthalpie libre d'un système chimique en fonction des potentiels chimiques. Déterminer une variation d'enthalpie libre entre deux états du système chimique.</p>
<p>Osмосe, pression osmotique d'une solution.</p>	<p>Utiliser le potentiel chimique pour interpréter le transfert d'un solvant au travers d'une membrane. Relier la pression osmotique à la différence de potentiel chimique du solvant dans les deux phases.</p>

<p>Enthalpie de réaction, entropie de réaction, enthalpie libre de réaction; grandeurs standard associées. Relation entre enthalpie libre de réaction et quotient de réaction. Équilibre physico-chimique. Constante thermodynamique d'équilibre; relation de van't Hoff. Relation entre enthalpie libre de réaction, constante thermodynamique d'équilibre et quotient de réaction.</p>	<p>Justifier qualitativement ou prévoir le signe de l'entropie standard de réaction. Relier enthalpie libre de réaction et création d'entropie lors d'une transformation d'un système physico-chimique. Prévoir le sens d'évolution d'un système physico-chimique dans un état donné à l'aide de l'enthalpie libre de réaction. Déterminer une grandeur standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques et de la loi de Hess. Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à une température quelconque. Déterminer la composition chimique d'un système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une ou plusieurs réactions chimiques.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le taux d'avancement à l'équilibre en fonction de la température pour un système siège d'une transformation chimique modélisée par une seule réaction.</p>
<p>Nombre de degrés de liberté d'un système physico-chimique à l'équilibre; variance.</p>	<p>Reconnaître si une grandeur intensive est ou non un facteur d'équilibre. Dénombrer les degrés de liberté d'un système à l'équilibre et interpréter le résultat.</p>

## 1.2 Procédés industriels continus : aspects cinétiques et thermodynamiques

Les transformations chimiques de la matière réalisées au laboratoire mettent en jeu de faibles quantités de matière et sont conduites en réacteur fermé. À l'échelle industrielle, les transformations mettent en jeu des quantités de matière beaucoup plus élevées et sont souvent conduites en réacteur ouvert pour assurer un fonctionnement continu.

Les chimistes doivent être capable de transposer à l'échelle industrielle un protocole élaboré au laboratoire.

L'objectif de cette partie est un réinvestissement de connaissances acquises en cinétique et en thermodynamique dans le cadre d'une initiation aux bilans de matière et aux bilans thermiques effectués sur des réacteurs ouverts continus.

L'étude des opérations unitaires s'inscrit dans le prolongement de la mécanique des fluides en physique, et, en chimie, de la cinétique en réacteur fermé et de la thermodynamique abordés en TPC1, domaines qui sont à la base du génie des procédés et de la technologie chimique.

Les modèles de réacteurs continus idéaux étudiés sont transposables aux réacteurs microfluidiques, mais également en biologie et en géosciences.

Sensibiliser les étudiants aux enjeux spécifiques du secteur industriel est un élément majeur de leur formation. Des procédés chimiques innovants s'imposent pour développer des techniques et des appareils adaptés permettant d'obtenir des rendements supérieurs à ceux des procédés conventionnels, tout en limitant leurs impacts environnementaux, en mettant au point des procédés plus sûrs, moins consommateurs d'énergie, des procédés cherchant à optimiser la consommation de matières premières et de solvants qui sont choisis moins polluants.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>D'un protocole de laboratoire à un procédé industriel</b> Opérations unitaires d'un procédé. Procédés discontinus. Procédés continus en régime stationnaire : débit de matière en masse et en quantité de matière, bilan de matière.</p>	<p>Exploiter un schéma de procédé légendé. Identifier un procédé continu ou discontinu. Effectuer un bilan de matière global ou sur une seule espèce pour une opération unitaire d'un procédé continu de caractéristiques données.</p>

<p><b>Cinétique de transformations en réacteur chimique ouvert</b></p> <p>Modèle du réacteur parfaitement agité continu en régime stationnaire dans le cas d'un écoulement de débits en volume égaux à l'entrée et à la sortie; dimensionnement du réacteur.</p> <p>Taux de conversion d'un réactif.</p> <p>Temps de passage.</p>	<p>Effectuer un bilan de matière pour un réacteur parfaitement agité continu.</p> <p>Relier le taux de conversion du réactif au temps de passage pour une transformation modélisée par une réaction de loi de vitesse donnée.</p> <p>Estimer le dimensionnement d'un réacteur parfaitement agité continu pour un taux de conversion et un débit de matière donnés.</p>
<p>Modèle du réacteur chimique en écoulement piston isotherme en régime stationnaire dans le cas de débits en volume égaux à l'entrée et à la sortie du réacteur; dimensionnement du réacteur.</p>	<p>Établir un bilan de matière pour un réacteur en écoulement piston.</p> <p>Relier le taux de conversion en sortie d'un réacteur en écoulement piston et le temps de passage pour une transformation modélisée par une loi de vitesse d'ordre 1.</p> <p>Estimer le dimensionnement d'un réacteur en écoulement piston pour un taux de conversion et un débit de matière donné.</p>
<p><b>Étude thermique d'un réacteur chimique ouvert</b></p> <p>Bilan énergétique sur un réacteur parfaitement agité continu en régime stationnaire dans le cas de débits en volume égaux à l'entrée et à la sortie.</p> <p>Sécurité des réacteurs : flux thermique et régulation de température.</p>	<p>Effectuer un bilan énergétique sur un réacteur parfaitement agité continu en régime stationnaire.</p> <p>Déterminer la température de fonctionnement d'un réacteur parfaitement agité continu de caractéristiques données dans l'hypothèse d'une transformation adiabatique.</p> <p>Déterminer le flux thermique échangé par un réacteur parfaitement agité dans des conditions de fonctionnement données.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation, déterminer le(s) point(s) de fonctionnement (température et taux de conversion) d'un réacteur parfaitement agité continu siège d'une transformation modélisée par une réaction unique et en discuter la stabilité.</p>

### 1.3 Changements de phase de corps purs et de mélanges binaires

L'étude des changements de phase de corps purs et de mélanges binaires s'effectue à l'aide de diagrammes isobares construits à partir des courbes d'analyse thermique ou fournis. Les tracés théoriques ne sont pas attendus. Ces diagrammes sont utilisés pour interpréter les techniques de distillations.

L'enseignant choisit des exemples concrets relatifs à des problématiques rencontrées au laboratoire et à des procédés industriels.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Corps pur, mélange, système binaire, fractions molaire et massique.</p> <p>Miscibilité totale, partielle ou nulle.</p>	<p>Convertir des fractions molaires en fractions massiques dans le cas de systèmes binaires et inversement.</p> <p>Interpréter la miscibilité à l'échelle microscopique par les interactions entre entités.</p> <p>Citer la température comme facteur d'influence de la miscibilité.</p>

<p>Diagrammes isobares d'équilibre liquide-vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— avec miscibilité totale à l'état liquide,</li> <li>— avec miscibilité nulle à l'état liquide,</li> <li>— avec miscibilité partielle à l'état liquide.</li> </ul> <p>Théorème des moments chimiques.</p>	<p>Construire un diagramme isobare d'équilibre entre phases d'un mélange binaire à partir d'informations relatives aux courbes d'analyse thermique.</p> <p>Décrire les caractéristiques des mélanges homoazéotropes, hétéroazéotropes.</p> <p>Exploiter les diagrammes isobares d'équilibre entre phases, pour une composition en fraction molaire ou massique donnée :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— l'allure de la courbe d'analyse thermique en indiquant le nombre de degrés de liberté du système sur chaque partie de la courbe;</li> <li>— déterminer les températures de début et de fin de changement d'état;</li> <li>— déterminer la composition des phases en présence à une température fixée ainsi que les quantités de matière ou les masses dans chaque phase.</li> </ul> <p>Déterminer la solubilité d'une des espèces chimiques du système binaire dans l'autre à partir du diagramme binaire.</p>
<p>Distillations.</p>	<p>Interpréter une distillation simple, une hydrodistillation, une distillation fractionnée, à l'aide des diagrammes isobares d'équilibre liquide-vapeur.</p> <p><b>Mettre en œuvre une distillation fractionnée ou une hydrodistillation à la pression atmosphérique.</b></p>

#### 1.4 Thermodynamique et cinétique des transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction

L'importance des systèmes électrochimiques se manifeste dans la diversité de leurs applications : accumulateurs et procédés d'électrosynthèse mettent en jeu la conversion d'énergie électrique en énergie chimique et vice versa, des capteurs électrochimiques sont utilisés dans l'analyse de l'eau, de l'air ou d'effluents, la protection contre la corrosion est un enjeu sociétal important, etc.

L'étude thermodynamique et cinétique des réactions d'oxydo-réduction développée dans cette partie se fonde sur les acquis de cinétique chimique et sur l'étude des réactions d'oxydo-réduction et des piles débutée en première année, ainsi que sur la partie de thermodynamique chimique de seconde année.

L'approche de l'électrochimie proposée ici privilégie les raisonnements qualitatifs et les aspects expérimentaux, plutôt que les développements théoriques et mathématisés. Les courbes courant-potentielle, dont le tracé est proposé en capacité expérimentale, sont un outil essentiel dans la compréhension et la modélisation des systèmes électrochimiques. L'étude d'une électrolyse complète les capacités expérimentales sur les piles développées en première année.

L'écart entre le potentiel d'une électrode et son potentiel d'équilibre est appelé surpotentiel plutôt que surtension pour des raisons pédagogiques, en cohérence avec le vocabulaire anglo-saxon correspondant.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Étude thermodynamique des réactions d'oxydo-réduction</b>	
Relation entre enthalpie libre de réaction et potentiels de Nernst des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.	Citer et exploiter la relation entre l'enthalpie libre de réaction et les potentiels de Nernst des couples mis en jeu dans une réaction d'oxydo-réduction.
Relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard des couples impliqués.	Déterminer l'enthalpie libre standard d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples mis en jeu. Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple d'oxydo-réduction à partir de données thermodynamiques (constantes d'équilibre, potentiels standard).
Approche thermodynamique du fonctionnement d'une pile électrochimique.	Relier tension à vide d'une pile et enthalpie libre de réaction. Décrire et expliquer le fonctionnement d'une pile électrochimique à partir de données sur sa constitution et de tables de potentiels standard.

<b>Étude cinétique des réactions d'oxydo-réduction</b>	
<p><b>Courbes courant-potentiel sur une électrode en régime stationnaire :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— surpotentiel,</li> <li>— systèmes rapides et systèmes lents,</li> <li>— nature de l'électrode,</li> <li>— courant limite de diffusion,</li> <li>— vagues successives,</li> <li>— domaine d'inertie électrochimique du solvant.</li> </ul>	<p>Relier vitesse de réaction électrochimique et intensité du courant.</p> <p>Identifier les espèces électroactives pouvant donner lieu à une limitation en courant par diffusion.</p> <p>Relier, qualitativement ou quantitativement, l'intensité du courant limite de diffusion à la concentration du réactif, au nombre d'électrons échangés et à la surface immergée de l'électrode.</p> <p>Tracer l'allure de courbes courant-potentiel à partir de données fournies.</p> <p>Identifier les paramètres d'influence du domaine d'inertie électrochimique du solvant.</p>
<p><b>Utilisation des courbes courant-potentiel</b></p> <p>Transformations spontanées :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— notion de potentiel mixte,</li> <li>— fonctionnement d'une pile électrochimique.</li> </ul>	<p><b>Tracer et utiliser des courbes courant-potentiel.</b></p> <p>Reconnaitre une transformation spontanée et étudier qualitativement sa vitesse à partir de courbes courant-potentiel données.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'une pile électrochimique et prévoir la valeur de la tension à vide.</p> <p>Citer les paramètres influençant la résistance interne d'une pile.</p>
<p>Transformations forcées : électrolyse, recharge d'un accumulateur.</p>	<p><b>Mettre en œuvre une électrolyse.</b></p> <p>Utiliser les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'un dispositif siège d'une électrolyse et prévoir la valeur de la tension minimale à imposer.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potentiel pour justifier la nécessité :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— de purifier une solution électrolytique avant l'électrolyse;</li> <li>— de choisir les électrodes permettant de réaliser l'électrolyse voulue.</li> </ul> <p>Déterminer un rendement faradique à partir d'informations fournies concernant le dispositif étudié.</p> <p>Déterminer la masse de produit formé pour une durée et des conditions données d'électrolyse.</p> <p>Citer les paramètres influençant la résistance interne du dispositif siège d'une électrolyse.</p>
<p>Stockage et conversion d'énergie chimique.</p>	<p>Identifier piles, électrolyseurs et accumulateurs comme des dispositifs mettant en jeu des conversions entre énergie chimique et énergie électrique.</p>

## 2. Constitution de la matière : modélisation quantique et réactivité

La catalyse par les complexes des métaux de transition trouve de très nombreuses applications comme par exemple la réaction de Heck en chimie fine, la carbonylation du méthanol en chimie industrielle, les processus de respiration et de photosynthèse en chimie du vivant. Elle s'inscrit dans la démarche vertueuse de la chimie éco-responsable et permet notamment des synthèses dans des conditions douces. La compréhension de ces systèmes catalytiques nécessite l'analyse de la structure électronique des complexes par l'utilisation des orbitales atomiques et moléculaires.

Ces nouveaux modèles de description de la matière à l'échelle microscopique complètent la description des entités moléculaires abordée en première année à l'aide du formalisme de Lewis. L'objectif de cette description microscopique est l'interprétation et la prévision de la réactivité dans le cadre de l'approximation des orbitales frontalières.

Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- construire des diagrammes d'orbitales moléculaires ou les interpréter en vue de la prévision de la réactivité d'une entité chimique;
- interpréter des propriétés des complexes de métaux de transition et l'utilisation de ces complexes comme catalyseurs ou éléments structurants.

### 2.1 Orbitales atomiques

Le modèle quantique de l'atome d'hydrogène et des atomes polyélectroniques est construit à partir des notions de fonction d'onde et de quantification de l'énergie. Si besoin, les expressions analytiques de l'énergie et du rayon d'une orbitale atomique sont fournies. Aucune détermination d'expression analytique d'une fonction d'onde n'est attendue.

Cette partie est par ailleurs l'occasion de relier la construction du tableau périodique des éléments, utilisé depuis le lycée, à la modélisation quantique de l'atome et de compléter la description de l'organisation de cet outil essentiel pour les chimistes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Fonctions d'onde électroniques $\Psi$ de l'atome d'hydrogène. Nombres quantiques $n, l, m_l, m_s$ . Énergie et rayon associés à une fonction d'onde.	Interpréter $ \Psi ^2$ comme la densité de probabilité de présence d'un électron en un point et la relier à la densité de charge. Prévoir qualitativement, pour l'atome d'hydrogène et les ions hydrogénoïdes, l'évolution du rayon et de l'énergie associés à une fonction d'onde en fonction du nombre quantique principal.
Orbitales des atomes polyélectroniques, représentation schématique. Configuration électronique d'un atome et de ses ions. Électrons de cœur et de valence.	Dessiner l'allure des orbitales atomiques $s$ et $p$ . Établir la configuration électronique d'un atome ou d'un ion à l'état fondamental. Déterminer le nombre d'électrons non appariés d'un atome dans son état fondamental.
Notion qualitative de charge effective. Électronégativité. Rayon d'une orbitale atomique, polarisabilité.	Relier qualitativement le rayon associé à une orbitale atomique à la charge effective. Relier qualitativement l'énergie associée à une orbitale atomique à l'électronégativité de l'atome. Relier qualitativement le rayon associé aux orbitales de valence d'un atome à sa polarisabilité.
Architecture du tableau périodique des éléments. Organisation par blocs.	Relier la position d'un élément dans le tableau périodique à la configuration électronique de l'atome associé dans son état fondamental. Situer dans le tableau les familles suivantes : métaux alcalins et alcalino-terreux, halogènes et gaz nobles.

### 2.2 Orbitales moléculaires et réactivité

La construction des diagrammes d'orbitales moléculaires est limitée aux cas des molécules diatomiques  $A_2$  ou  $AB$ , sans mélange d'orbitales  $s$  et  $p$ . En revanche, les diagrammes d'interaction impliquant trois orbitales ou plus ne sont pas à construire mais sont fournis à l'étudiant qui doit pouvoir les interpréter : remplissage des niveaux, identification des orbitales frontalières haute occupée et basse vacante, analyse du caractère liant, antiliant ou non liant d'une orbitale moléculaire.

De même, la construction des diagrammes d'orbitales moléculaires de systèmes plus complexes est hors programme; l'étudiant interprète ces diagrammes à partir des propriétés de deux fragments en interaction dont les orbitales sont fournies.

Dans le but de disposer de modèles simples applicables en chimie organique, l'approximation des orbitales frontalières permet de prévoir la réactivité électrophile ou nucléophile des entités mises en jeu; ce modèle complète l'étude de l'addition nucléophile et de la substitution nucléophile abordées en première année. Ces orbitales peuvent être obtenues grâce à des logiciels ou à partir de bases de données.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Construction des orbitales moléculaires</b> Méthode de Combinaison Linéaire des Orbitales Atomiques. Interaction de deux orbitales atomiques sur deux centres : — recouvrement; — orbitales liante, antiliante, non liante; — énergie d'une orbitale moléculaire; — orbitale <math>\sigma</math>, orbitale <math>\pi</math>; — représentation conventionnelle d'une orbitale moléculaire par schématisation graphique de la combinaison linéaire des orbitales atomiques.</p> <p>Interaction d'orbitales de fragments.</p> <p>Diagramme d'orbitales moléculaires : occupation des niveaux, cas des entités radicalaires.</p> <p>Ordre de liaison dans les molécules diatomiques.</p>	<p>Identifier les conditions d'interaction de deux orbitales atomiques : recouvrement et critère énergétique. Construire des orbitales moléculaires de molécules diatomiques par interaction d'orbitales atomiques du même type (<math>s-s</math>, <math>p-p</math>). Reconnaître le caractère liant, antiliant, non liant d'une orbitale moléculaire à partir de sa représentation conventionnelle ou d'une surface d'iso-densité. Identifier la symétrie <math>\sigma</math> ou <math>\pi</math> d'une orbitale moléculaire à partir de sa représentation conventionnelle ou d'une surface d'iso-densité. Proposer une représentation conventionnelle d'une orbitale moléculaire tenant compte d'une éventuelle dissymétrie du système. Justifier la dissymétrie d'une orbitale moléculaire obtenue par interaction d'orbitales atomiques centrées sur des atomes d'éléments différents. Prévoir ou interpréter l'ordre énergétique des orbitales moléculaires et établir qualitativement un diagramme énergétique d'orbitales d'une molécule diatomique. Justifier l'existence d'interactions entre orbitales de fragment en termes de recouvrement ou d'écart d'énergie. Décrire l'occupation des niveaux d'un diagramme d'orbitales moléculaires. Interpréter un diagramme d'orbitales moléculaires obtenu par interaction des orbitales de deux fragments, fournies. Relier, dans une molécule diatomique, l'évolution des caractéristiques de la liaison à l'évolution de l'ordre de liaison.</p>
<p><b>Prévision de la réactivité</b> Orbitales frontalières haute occupée et basse vacante. Approximation des orbitales frontalières.</p>	<p>Identifier les orbitales frontalières à partir d'un diagramme d'orbitales moléculaires de valence fourni. Utiliser les orbitales frontalières pour prévoir la réactivité nucléophile ou électrophile d'une entité (molécule ou ion). Interpréter l'addition nucléophile sur le groupe carbonyle et la substitution nucléophile en termes d'interactions frontalières. Comparer la réactivité de deux entités à l'aide des orbitales frontalières.</p>

### 2.3 Constitution et réactivité des complexes

L'étude de la structure des complexes est limitée à l'interprétation de la liaison entre l'atome central et le ligand par l'interaction entre une orbitale  $d$  d'une entité du bloc  $d$  et une orbitale d'un ligand  $\sigma$ -donneur, par une démarche identique à celle développée dans la partie « Orbitales moléculaires et réactivité ». Les représentations des orbitales  $d$  ne sont pas exigibles et doivent être fournies. La construction complète du diagramme d'orbitales moléculaires d'un complexe et la levée partielle de dégénérescence des orbitales  $d$  sont hors-programme.

Les complexes constituent des systèmes très importants à la fois dans le domaine industriel où ils interviennent dans les procédés de séparation, de dépollution et en catalyse, ainsi que dans celui du vivant au travers des métalloenzymes

intervenant dans des processus biologiques. L'étude de la stabilité des complexes prolonge la partie du programme de première année sur les transformations chimiques en solution aqueuse et permet un réinvestissement des capacités correspondantes : utilisation de données thermodynamiques, prévision de l'état final d'un système modélisé par une seule réaction, interprétation d'observations. Elle permet aussi la mise en œuvre de concepts de thermodynamique, d'oxydo-réduction et de chimie orbitale.

Pour l'étude de la stabilité des complexes en solution aqueuse, les équations des réactions correspondant aux formations et dissociations ne sont pas exigibles et sont fournies. Les transformations abordées sont modélisées par une seule réaction : les problématiques liées à des phénomènes de complexations successives sont donc hors-programme.

Les complexes peuvent être utilisés comme catalyseurs, par exemple pour des hydrogénations et la formation de polymères vinyliques. Aucun cycle catalytique n'est exigible, mais les étapes d'un cycle fourni doivent être reconnues par l'étudiant. Le formalisme de Green est hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Structure des complexes</b> Modélisation de la liaison dans un complexe entre une entité du bloc <i>d</i> et un ligand <math>\sigma</math>-donneur intervenant par une seule orbitale.</p>	<p>Reconnaitre le(s) site(s) de coordination d'un ligand à partir d'un schéma de Lewis. Établir qualitativement le diagramme d'interaction entre une orbitale d'une entité du bloc <i>d</i> et une orbitale d'un ligand <math>\sigma</math>-donneur.</p>
<p><b>Stabilité des complexes métalliques en solution aqueuse</b> Constantes de formation et de dissociation. Diagramme de prédominance en fonction de pL.  Effet chélate.</p>	<p>Extraire, de ressources disponibles, les données thermodynamiques pertinentes pour prévoir qualitativement l'état final d'un système siège d'une unique réaction de complexation ou pour interpréter des observations expérimentales. Utiliser les diagrammes de prédominance pour prévoir des espèces incompatibles ou la nature des espèces majoritaires. Retrouver les valeurs de constantes thermodynamiques d'équilibre par lecture de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance (et réciproquement). Interpréter l'évolution du caractère oxydant ou réducteur d'une entité par complexation. Interpréter l'effet d'un ligand polydenté sur la constante de formation d'un complexe.</p> <p><b>Préparer, analyser, caractériser ou déterminer la constante de formation d'un complexe d'une entité du bloc <i>d</i>.</b> <b>Mettre en œuvre une réaction de complexation pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse.</b></p>
<p><b>Activité catalytique des complexes</b> Cycles catalytiques : — étapes d'association et de dissociation, d'addition oxydante et d'élimination réductrice, d'insertion et d'élimination; — catalyseurs et précurseurs de catalyseur. Hydrogénation en catalyse homogène. Polymérisation des alcènes par coordination.</p>	<p>Établir l'équation de la réaction catalysée à partir de la donnée d'un cycle catalytique. Reconnaitre la nature d'une étape dans un cycle catalytique. Proposer un ou des produits plausibles d'une étape d'un cycle dont les réactifs sont donnés. Identifier la nature des étapes intervenant lors de l'hydrogénation en catalyse homogène et de la polymérisation des alcènes par coordination, les cycles catalytiques étant fournis. Proposer une structure pour la macromolécule linéaire obtenue par polymérisation d'un alcène donné. Déterminer la structure de l'alcène permettant de synthétiser une macromolécule linéaire donnée.</p>



### 3. Transformations de la matière en chimie organique

Médicaments, produits phytosanitaires, matériaux polymères de synthèse aussi différents que les latex de peinture ou les boucliers thermiques des véhicules spatiaux : ces synthèses en chimie fine ou en productions de fort tonnage découlent d'une démarche d'ingénierie moléculaire s'appuyant entre autres sur les apports de la chimie organique. L'élaboration, l'identification et la caractérisation des structures et la prévision de la réactivité des entités relèvent de méthodes fondamentales dont les principes sont abordés dans les programmes de chimie des deux années.

Le programme de seconde année s'inscrit dans la continuité de celui de première année et poursuit les objectifs suivants :

- s'approprier la logique de la synthèse organique grâce aux compléments de formation relatifs aux conversions de groupes caractéristiques et à la création de liaison carbone-carbone ;
- consolider et compléter les connaissances des mécanismes fondamentaux et les capacités relatives à leur écriture à l'aide du formalisme des flèches courbes et des orbitales moléculaires.

L'enseignement de la chimie organique s'appuie sur les connaissances et capacités nouvellement acquises en thermodynamique et cinétique chimiques et exploite les modèles orbitales de description des structures et de la réactivité, introduits dans la partie « Constitution de la matière : modélisation quantique et réactivité ». L'utilisation des orbitales frontalières permet la prévision des géométries d'approche des réactifs et, dans le cas où l'évolution du système est sous contrôle frontalier, la prévision de la structure du produit majoritaire dans la transformation. Les orbitales moléculaires sont systématiquement fournies aux étudiants. Le tableau à la fin de ce préambule, précédant le paragraphe 3.1, comporte des notions communes à toutes les transformations abordées dans les parties 3.1 et 3.2.

L'approche retenue privilégie l'aspect mécanistique et la stratégie de synthèse et non une présentation monographique, ceci afin de favoriser le raisonnement et la transférabilité dans des situations analogues, mais l'enseignant dispose de sa liberté pédagogique pour construire la progression de son choix.

Le programme de seconde année poursuit la volonté du programme de première année d'amener les étudiants à conduire une véritable réflexion sur la stratégie de synthèse : identification des groupes caractéristiques mis en jeu, analyse de la réactivité comparée des entités, interprétation de la nature et de l'ordre des étapes mises en œuvre dans le cas d'une synthèse multi-étapes, analyse des choix expérimentaux.

L'élaboration d'une synthèse multi-étapes par les étudiants eux-mêmes peut se faire en autonomie à l'aide d'une banque de réactions fournie ou à l'aide des réactions qui figurent explicitement au programme. Les réactions indiquées dans la colonne de gauche doivent être connues et seuls les mécanismes explicitement inscrits sont exigibles et doivent pouvoir être écrits sans information supplémentaire. Pour ce qui concerne les propriétés acido-basiques, une table de  $pK_a$  sera systématiquement fournie.

Les trois capacités expérimentales indiquées dans la colonne de droite en face de la notion "Synthèses organiques au laboratoire" sont à mettre en place pour toutes les réactions indiquées dans les deux parties 3.1 Conversion de groupes caractéristiques et 3.2 Création de liaisons carbone-carbone.

Le cours et les activités s'appuient sur des exemples issus aussi bien des domaines de la chimie fine, de la chimie du vivant et de la chimie industrielle et permettent une sensibilisation aux principes de la chimie éco-responsable.

À travers les capacités et contenus exigibles, sont développées des compétences générales qui pourront par la suite être réinvesties, consolidées et valorisées, parmi lesquelles :

- choisir le ou les modèle(s) pertinent(s) de description géométrique, électronique ou orbitale d'une entité pour rendre compte de sa réactivité ;
- utiliser des modèles de prédiction de l'évolution du système dans le cadre des transformations proposées ;
- pratiquer un raisonnement par analogie (analyse de réactivités et écriture de mécanismes) ;
- proposer une stratégie de synthèse à l'aide d'une banque de réactions ou des réactions au programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Familles fonctionnelles en chimie organique.	Identifier dans une entité donnée les familles fonctionnelles suivantes : alcène, alcyne, halogénoalcane, alcool, 1,2-diol, ester sulfonique, éther-oxyde, époxyde, amine, aldéhyde, cétone, hémiacétal, acétal, acide carboxylique, ester, amide, chlorure d'acyle, anhydride d'acide.
Thermodynamique et cinétique des transformations de la matière en chimie organique.	Discuter des aspects thermodynamiques et cinétiques des transformations effectuées à l'aide de données tabulées et de résultats expérimentaux.
Électrophilie et nucléophilie.	Identifier les sites électrophiles et nucléophiles des réactifs à l'aide de leurs structures de Lewis ou de leurs orbitales frontalières.

Modélisation de la géométrie d'approche de réactifs. Stratégie de synthèse.	Prévoir ou justifier la géométrie privilégiée d'approche de réactifs à partir de leurs orbitales frontalières fournies. Justifier la nécessité de protéger un groupe caractéristique dans une synthèse multi-étapes. Analyser une synthèse multi-étapes en termes de stratégie de synthèse : ordre des étapes, protection de groupes caractéristiques, étapes d'activation. Élaborer une synthèse multi-étapes en utilisant éventuellement une banque de réactions fournie. Analyser les impacts environnementaux d'une stratégie de synthèse.
Synthèses organiques au laboratoire.	<b>Conduire des synthèses, des purifications, des caractérisations et des analyses de la pureté de produits à l'aide de protocoles donnés.</b> <b>Proposer ou adapter un protocole expérimental permettant de réaliser une synthèse organique à partir de données fournies.</b> <b>Analyser et justifier les choix expérimentaux dans une synthèse organique.</b>

### 3.1 Conversion de groupes caractéristiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Additions électrophiles sur les doubles liaisons carbone-carbone</b> Hydratation en milieu acide : conditions expérimentales, régiosélectivité, réactivité comparée des alcènes, mécanisme limite. Hydroboration d'une double liaison carbone-carbone terminale par le borane : régiosélectivité, mécanisme limite de l'addition du borane sur l'alcène; hydrolyse oxydante.</p>	<p>Prévoir ou justifier la régiosélectivité de l'hydratation à l'aide de la stabilité des carbocations intermédiaires. Prévoir ou justifier la régiosélectivité de l'hydroboration à l'aide des effets stériques.</p>
<p><b>Additions nucléophiles suivies du départ d'un nucléofuge</b> Passage de l'acide carboxylique aux amides et aux esters.  Activation ex situ du groupe carboxyle sous forme d'un chlorure d'acyle ou d'un anhydride d'acide. Activation in situ du groupe carboxyle par protonation. Autres activations du groupe carboxyle : utilisation d'une banque de réactions. Synthèse des esters à partir des acides carboxyliques, des chlorures d'acyle et des anhydrides d'acide : aspects cinétiques et thermodynamiques, mécanismes limites. Synthèse des amides à partir des acides carboxyliques, des chlorures d'acyle et des anhydrides d'acide : aspects cinétiques et thermodynamiques, mécanismes limites.</p>	<p>Comparer les réactivités électrophiles des acides carboxyliques, chlorures d'acyle, anhydrides d'acide, esters, amides, les aptitudes nucléofuges des groupes partants dans les molécules correspondantes et en déduire l'importance de l'activation du groupe carboxyle. Proposer et/ou analyser, le cas échéant à partir d'une banque de réactions fournie, différents moyens d'activation d'un groupe carboxyle. Expliquer comment obtenir un bon rendement de synthèse d'un ester à partir d'un alcool primaire ou secondaire et d'un acide carboxylique, selon la méthode d'activation choisie et les conditions expérimentales. Justifier le choix des conditions expérimentales retenues pour la synthèse des amides.</p>
<p>Des amides ou esters à l'acide carboxylique.  Hydrolyses en milieu acide et en milieu basique des esters et des amides : conditions expérimentales, mécanismes. Utilisation de la synthèse d'amides ou d'esters pour la protection des groupes carboxyle, amino ou hydroxyle.</p>	<p>Justifier le choix des conditions opératoires d'hydrolyse.  Reconnaître ou justifier la nécessité de protéger un groupe carboxyle, amino ou hydroxyle dans le cadre d'une stratégie de synthèse. Proposer ou justifier des conditions de protection ou de déprotection d'un groupe carboxyle, amino ou hydroxyle à partir d'une banque de réactions fournie.</p>

<p>Synthèse de polyesters et de polyamides à partir de diacides carboxyliques.</p> <p>Structure primaire des peptides et protéines : acides <math>\alpha</math>-aminés, liaison peptidique.</p>	<p>Proposer des réactifs permettant de synthétiser un polyester ou un polyamide donné.</p> <p>Représenter le polyester ou le polyamide obtenu par polymérisation de monomères donnés.</p> <p>Justifier les choix expérimentaux effectués dans un protocole donné de synthèse de polyester ou de polyamide.</p> <p>Identifier un peptide ou une protéine comme un enchaînement d'unités issues d'acides <math>\alpha</math>-aminés (aucune structure ou nomenclature d'acides <math>\alpha</math>-aminés n'est exigible).</p> <p>Identifier les chaînes latérales dans des acides <math>\alpha</math>-aminés, des peptides ou des protéines fournis.</p>
<p><b>Conversion de groupes caractéristiques par des réactions d'oxydo-réduction</b></p> <p>Hydrogénation des doubles et triples liaisons carbone-carbone en catalyse hétérogène, aspects stéréochimiques.</p>	<p>Identifier les différents types d'interactions entre le catalyseur hétérogène et les réactifs.</p>
<p>Époxydation directe par un peroxyacide; réactivité comparée des alcènes.</p> <p>Ouverture des époxydes en milieu basique : mécanisme, élaboration de diols par addition anti.</p>	<p>Discuter de la régiosélectivité de l'époxydation sur un polyène.</p> <p>Justifier la régiosélectivité et la stéréosélectivité de l'ouverture d'un époxyde par un nucléophile, en l'absence d'activation par un acide de Lewis ou de Bronsted.</p>
<p>De l'ester à l'aldéhyde ou à l'alcool primaire; mécanisme schématique de la réduction des esters.</p>	<p>Interpréter la réduction d'un ester en alcool primaire en assimilant le réactif à un ion hydrure nucléophile.</p> <p>Identifier le produit de réduction d'un ester par un hydrure complexe, à l'aide de données fournies (chimiques et/ou spectroscopiques).</p> <p>Reconnaître ou proposer dans une stratégie de synthèse la conversion entre un ester et un aldéhyde ou un alcool primaire.</p>

### 3.2 Création de liaisons carbone-carbone

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Réaction de Diels-Alder</b></p> <p>Diastéréosélectivité, stéréospécificité, régiosélectivité, influence de la structure des réactifs sur la vitesse de la transformation (règle d'Alder).</p> <p>Réaction de rétro-Diels-Alder.</p>	<p>Identifier les interactions orbitales mises en jeu entre les réactifs.</p> <p>Interpréter les résultats cinétiques, stéréochimiques et la régiosélectivité d'une réaction de Diels-Alder sous contrôle cinétique.</p>
<p><b>Réactivité nucléophile des énolates</b></p> <p>Équilibre de tautomérie céto-énolique.</p> <p>Acidité d'un aldéhyde ou d'une cétone.</p> <p>Généralisation à d'autres espèces énoles.</p>	<p>Représenter le(s) énol(s) isomère(s) d'une espèce énolesable.</p> <p>Identifier un énol et représenter l'aldéhyde ou la cétone dont il est l'isomère.</p> <p>Représenter la base conjuguée d'une espèce énolesable et justifier sa stabilité à l'aide du formalisme de la mésomérie.</p> <p>Proposer ou justifier le choix d'une base permettant de déprotoner une espèce énolesable, les valeurs des <math>pK_a</math> étant fournies.</p>
<p>C-alkylation en position <math>\alpha</math> d'un groupe carbonyle de cétone : mécanisme limite, régiosélectivité de l'alkylation des énolates.</p>	<p>Justifier la réactivité nucléophile ambivalente de l'énolate dans le formalisme de la mésomérie ou par l'analyse de ses orbitales frontalières.</p> <p>Décrire les interactions entre orbitales frontalières des réactifs et interpréter la régiosélectivité de l'alkylation de l'énolate.</p>

<p>Aldolisation non dirigée : mécanisme en milieu basique aqueux ou alcoolique.</p> <p>Aldolisation croisée dirigée avec déprotonation totale préalable : mécanisme, intérêt synthétique.</p>	<p>Identifier dans une analyse rétrosynthétique les réactifs permettant d'obtenir un aldol, un cétol, un <math>\alpha</math>-énal, une <math>\alpha</math>-énone.</p> <p>Choisir dans le cadre d'une stratégie de synthèse les meilleures conditions expérimentales de préparation d'un aldol (d'un cétol) issu d'une aldolisation croisée.</p> <p>Justifier par la compétition avec l'aldolisation l'impossibilité d'alkyler un aldéhyde.</p>
<p>Crotonisation : déshydratation de l'aldol (céto) en présence d'une base, mécanisme E1<sub>cb</sub>, régiosélectivité.</p>	<p>Justifier la régiosélectivité de la crotonisation en présence d'une base.</p>
<p>Réaction de Michael sur une <math>\alpha</math>-énone; mécanisme.</p>	<p>Décrire les interactions entre orbitales frontalières des réactifs et interpréter la régiosélectivité de la réaction de Michael.</p> <p>Identifier dans une analyse rétrosynthétique les réactifs permettant de réaliser une addition de Michael sur une <math>\alpha</math>-énone.</p>
<p><b>Utilisation des organomagnésiens en synthèse</b> Synthèse des alcools par action des organomagnésiens sur les époxydes et les esters, mécanismes.</p>	<p>Identifier dans une analyse rétrosynthétique les réactifs de la synthèse magnésienne d'un alcool.</p>

## Deuxième partie

## Contenus thématiques

L'organisation des semestres est la suivante.

## Premier semestre

<b>Thème C – constitution et transformations de la matière</b>	10
C.1 Constitution et cohésion de la matière à l'échelle des entités chimiques . . . . .	10
C.2 Transformations chimiques : évolution d'un système vers un état final - applications aux réactions acide-base . . . . .	12
<b>Thème M – mouvements et interactions</b>	14
M.1 Description et paramétrage du mouvement d'un point . . . . .	14
M.2 Lois de Newton . . . . .	15
<b>Thème T – phénomènes de transport</b>	16
T.1 Transport de particules chargées dans un champ électrostatique uniforme . . . . .	16

## Second semestre

<b>Thème C – constitution et transformations de la matière</b>	17
C.3 Constitution de la matière : relation entre structure des entités chimiques et propriétés . . . . .	17
C.4 Transformations chimiques : évolution d'un système vers un état final - applications aux réactions d'oxydo-réduction . . . . .	17
C.5 Transformations de la matière : évolution temporelle d'un système . . . . .	18
C.6 Transformations de la matière en chimie organique . . . . .	19
<b>Thème E – énergie : conversions et transferts</b>	21
E.1 Description d'un système à l'équilibre thermodynamique . . . . .	22
E.2 Bilans d'énergie pour un système thermodynamique . . . . .	22
E.3 Statique des fluides . . . . .	23

## Premier semestre

## Thème C – constitution et transformations de la matière

## C.1 Constitution et cohésion de la matière à l'échelle des entités chimiques

Dans cette partie, sont abordées la constitution et la cohésion de la matière à l'échelle des entités chimiques (atomes, ions, molécules). L'objectif principal est d'envisager les différents niveaux d'étude pour parvenir à la description et à la représentation spatiale d'une entité puis, au second semestre, la description des propriétés physico-chimiques associées.

## C.1.1 Constitution et cohésion au sein des atomes

L'étude de la structure de l'atome est l'occasion d'aborder les ordres de grandeur caractéristiques (distances, énergies). La configuration électronique des atomes à l'état fondamental est systématiquement fournie. Elle permet d'éclairer la construction du tableau périodique, outil central pour le chimiste : similitude des propriétés au sein d'une famille chimique, détermination du nombre d'électrons de valence d'un atome ou d'un ion monoatomique, comparaison des propriétés d'électronégativité ou de polarisabilité de deux atomes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Constitution de l'atome. Spectre de raies atomiques et quantification des niveaux énergétiques électroniques.	Relier longueurs d'onde d'émission ou d'absorption et diagramme de niveaux d'énergie électroniques. Citer les ordres de grandeur des énergies d'ionisation et des distances caractéristiques dans l'atome.
Classification périodique et configuration électronique : électrons de cœur, électrons de valence.	Déduire de la configuration électronique fournie d'un atome dans son état fondamental sa position dans la classification périodique et la charge des ions monoatomiques usuels de cet élément.
Lien entre propriétés atomiques et tableau périodique : électronégativité, polarisabilité.	Comparer les électronégativités et les polarisabilités de deux atomes à partir des positions des éléments associés dans le tableau périodique.

### C.1.2 Cohésion au sein d'entités polyatomiques : molécules et ions

La structure électronique des entités polyatomiques est abordée grâce aux modèles de Lewis et VSEPR, l'utilisation de ce dernier restant limitée aux cas les plus courants, en lien avec les structures des entités classiques de la chimie organique. La polarité d'une entité est reliée à sa géométrie et aux propriétés des atomes qui la constituent.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modèles de la liaison covalente</b> Modèle de Lewis de la liaison covalente localisée. Longueur et énergie de la liaison covalente. Représentation de Lewis d'une molécule ou d'un ion polyatomique. Hypervalence. Modèle de la liaison covalente délocalisée : mésomérie.	Citer les ordres de grandeur de longueurs et d'énergies de liaisons covalentes. Établir une ou des représentations de Lewis pertinentes pour une molécule ou un ion polyatomique. Identifier les enchaînements donnant lieu à une délocalisation électronique dans une entité et représenter les formules mésomères limites d'une entité chimique. Mettre en évidence une éventuelle délocalisation électronique à partir de données sur les longueurs de liaison.
<b>Géométrie et polarité des entités chimiques</b> Géométrie d'une molécule ou d'un ion polyatomique; modèle VSEPR. Représentation de Cram.  Liaison polarisée, moment dipolaire, entité polaire.	Prévoir et interpréter les structures de type $AX_n$ avec $n \leq 4$ et $AX_pE_q$ avec $p + q = 3$ ou $4$ . Interpréter des écarts entre les prévisions du modèle VSEPR et des données structurales. Prévoir l'existence ou non d'un moment dipolaire permanent d'une entité chimique et représenter, le cas échéant, la direction et le sens du moment dipolaire. Dédurre de l'électroneutralité de la matière la stœchiométrie d'un solide ionique.

### C.1.3 Constitution et caractérisation spectroscopique d'entités chimiques organiques

Des familles fonctionnelles en chimie organique sont d'abord présentées et la structure des entités validée par l'exploitation de spectres UV-Visible, IR et RMN  $^1\text{H}$  sans qu'aucun développement théorique sur ces techniques ne soit abordé. En lien avec les programmes de sciences de la vie et de la Terre et de biotechnologies, le modèle de Lewis permet d'introduire les notions d'isomérie de configuration et de conformation. Les ordres de grandeur des énergies de liaison et des barrières conformationnelles permettent de sensibiliser à la solidité et à la flexibilité des édifices polyatomiques. À ce stade, il n'y a pas d'attendus en termes de nomenclature IUPAC, cette dernière étant étudiée progressivement lors de l'étude des transformations chimiques organiques. Des approches communes avec les enseignants de sciences de la vie et de la Terre et de biotechnologies sont ici encouragées afin de fournir aux étudiants des exemples d'utilisation des méthodes de spectroscopie d'absorption en biochimie quantitative. D'autre part, la présentation des familles d'entités chimiques organiques peut servir d'introduction à l'étude des familles d'entités chimiques du vivant, abordées dans le cadre des enseignements de sciences de la vie de la Terre et de biotechnologies : oses, acides gras, triglycérides, phosphoglycérides, acides aminés, peptides, protéines, nucléosides, nucléotides, acides nucléiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Familles d'entités chimiques organiques</b> Familles fonctionnelles en chimie organique : amine, amide, cétone, aldéhyde, alcool, thiol, ester, acide carboxylique, hémiacétal et acétal, anhydride phosphorique.	Reconnaître les groupes caractéristiques et nommer les familles fonctionnelles présentes dans la représentation d'une entité chimique organique.
<b>Spectroscopies d'absorption UV-visible et infrarouge</b> Nature des transitions associées aux spectroscopies UV-visible et infrarouge, domaine du spectre des ondes électromagnétiques correspondant. Transmittance, absorbance.	Relier la longueur d'onde du rayonnement absorbé à la nature et à l'énergie de la transition associée. Identifier, à partir du spectre infrarouge et de tables de nombres d'onde de vibration, une liaison ou un groupe caractéristique dans une entité chimique organique.
<b>Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire du proton</b>	

Exploitation de spectres RMN <sup>1</sup> H. Déplacement chimique, intégration. Multiplicité d'un signal : couplages du premier ordre $A_m X_p$ .	Confirmer ou attribuer la structure d'une entité chimique à partir de données spectroscopiques infrarouge ou de résonance magnétique nucléaire du proton et de tables de nombres d'onde ou de déplacements chimiques caractéristiques.
<b>Isomérisation en chimie organique</b> Isomérisation de constitution : isomérisation de chaîne, isomérisation de famille fonctionnelle. Représentation de Newman. Stéréoisomérisation de conformation en série aliphatique non cyclique; ordre de grandeur de la barrière conformationnelle. Chiralité. Stéréoisomérisation de configuration : descripteurs stéréochimiques <i>R</i> , <i>S</i> , <i>Z</i> , <i>E</i> , énantiomérisation, diastéréoisomérisation.	Déterminer la relation d'isomérisation entre deux isomères de constitution.  Comparer la stabilité de plusieurs conformations.  Déterminer si une entité est chirale. Attribuer un descripteur stéréochimique à un centre stéréogène. Déterminer la relation d'isomérisation entre deux stéréoisomères. Représenter une entité chimique organique à partir de son nom, en tenant compte de la donnée d'éventuelles informations stéréochimiques. Interpréter l'importance de la structure spatiale par des exemples pris dans le domaine du vivant.

## C.2 Transformations chimiques : évolution d'un système vers un état final - applications aux réactions acide-base

L'objectif de cette partie est d'amener les étudiants à mobiliser de manière autonome les notions et modèles pour décrire, au niveau macroscopique, un système physico-chimique et son évolution. Il convient que les problématiques abordées, les illustrations et les applications prennent largement appui sur des transformations chimiques rencontrées dans la vie courante, au laboratoire, en milieu industriel ou dans le monde du vivant. À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- décrire un système physico-chimique en utilisant un vocabulaire scientifique précis;
- effectuer une distinction entre le monde des objets et des phénomènes (systèmes physico-chimiques, transformations chimiques) et celui des modèles (réaction chimique comme modèle d'une transformation au niveau macroscopique);
- proposer des approximations simplifiant l'exploitation quantitative de données expérimentales et en vérifier la pertinence;
- confronter les prévisions d'un modèle avec des résultats expérimentaux;
- traduire, en langage de programmation, les démarches mises en œuvre pour déterminer l'état final d'un système.

### C.2.1 Prévoir l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique

L'étude quantitative de l'état final d'un système, siège d'une transformation chimique, est réalisée à partir d'une modélisation par une seule réaction chimique, symbolisée par une équation de réaction à laquelle est associée une constante thermodynamique d'équilibre. Il s'agit de prévoir le sens d'évolution de systèmes, homogènes ou hétérogènes, et de déterminer leur composition dans l'état final.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Système physico-chimique</b> Espèce physico-chimique.  Mélange : concentration en quantité de matière, fraction molaire, pression partielle.	Recenser les espèces physico-chimiques présentes dans un système. Décrire la composition d'un système à l'aide des grandeurs physiques pertinentes.
<b>Bilan de matière d'une transformation</b> Modélisation d'une transformation par une réaction chimique. Équation de réaction; avancement, taux d'avancement, caractère total ou non d'une transformation.	Écrire l'équation de la réaction qui modélise une transformation chimique à partir de données expérimentales. Décrire qualitativement et quantitativement un système chimique dans l'état initial ou dans l'état final à partir de données expérimentales.

<p><b>Évolution d'un système</b> Activité, quotient de réaction.</p> <p>Constante thermodynamique d'équilibre <math>K^\circ</math>.</p> <p>Critère d'évolution.</p>	<p>Exprimer un quotient de réaction à partir d'une équation de réaction.</p> <p>Associer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre au caractère thermodynamiquement favorable ou défavorable d'une réaction.</p> <p>Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre pour une équation de réaction, combinaison linéaire d'équations dont les constantes thermodynamiques d'équilibre sont connues.</p> <p>Prévoir le sens de l'évolution spontanée d'un système physico-chimique.</p>
<p><b>Composition à l'état final</b> État d'équilibre chimique d'un système, transformation totale.</p>	<p>Déterminer la composition du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique d'un système et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> Déterminer, à l'aide d'un langage de programmation, le taux d'avancement final d'une transformation modélisée par une réaction unique.</p> <p><b>Déterminer la valeur d'une constante d'équilibre et tester l'influence de différents paramètres sur la composition finale d'un système.</b></p>

### C.2.2 Applications aux transformations modélisées par des réactions acide-base

Les notions et les méthodes introduites dans la partie précédente sont réinvesties pour l'étude de transformations modélisées par des réactions acide-base. À cette occasion, des outils graphiques (diagrammes de prédominance et de distribution des espèces) sont introduits pour exploiter un résultat d'analyse par électrophorèse, pour faciliter la modélisation d'une transformation, pour valider la détermination d'une composition à l'état final ou pour interpréter une courbe de suivi de titrage acido-basique.

La détermination analytique de la composition à l'état final est limitée à des transformations modélisées par une unique réaction chimique. La détermination de l'état final d'un système peut permettre d'accéder à une valeur de  $pH$  final qui, confrontée à une mesure expérimentale de  $pH$ , permet de valider ou non le modèle de réaction choisie. Aucune formule de calcul de  $pH$  n'est exigible. L'étude théorique des titrages acido-basiques n'est pas exigible, les courbes de suivi  $pH$ -métriques et conductimétriques étant analysées au moyen de diagrammes de prédominance et/ou de distribution des espèces.

En vue de faciliter l'appropriation des modèles proposés, le professeur utilise, et met à disposition des étudiants, des simulations obtenues à l'aide d'un logiciel ou d'un langage de programmation.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Couple acide-base. Constante d'acidité <math>K_a</math> d'un couple, constantes d'acidité des deux couples acide-base de l'eau.</p>	<p>Reconnaître un couple acide-base. Écrire l'équation de la réaction associée à la constante d'acidité d'un couple donné.</p>
<p><math>pH</math>, diagramme de prédominance, diagramme de distribution. Application aux acides aminés, point isoélectrique.</p>	<p>Tracer le diagramme de prédominance d'un ou plusieurs couple(s) acide-base. Extraire les valeurs de constantes d'acidité de courbes de distribution et de diagrammes de prédominance. <b>Capacité numérique :</b> tracer, à l'aide d'un langage de programmation, le diagramme de distribution des espèces d'un ou plusieurs couple(s) acide-base, les expressions des fractions molaires en fonction du <math>pH</math> étant fournies, et déterminer la valeur du point isoélectrique d'un acide aminé.</p>
<p>Réaction acide-base; relation entre la constante thermodynamique d'équilibre et les constantes d'acidité des couples mis en jeu.</p>	<p>Reconnaître une réaction acide-base à partir de son équation. Écrire l'équation de la réaction acide-base modélisant une transformation en solution aqueuse et déterminer la valeur de sa constante thermodynamique d'équilibre.</p>



Mise en solution et réaction d'un acide ou d'une base dans l'eau, modèle des acides et bases forts, des acides et bases faibles. Exemples usuels d'acides et de bases : nom, formule et caractère – faible ou fort – des acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, phosphorique, éthanoïque, du dioxyde de carbone aqueux, de la soude, la potasse, l'ion hydrogéné-carbonate, l'ion carbonate, l'ammoniac.	Identifier le caractère fort ou faible d'un acide ou d'une base à partir d'informations fournies ( $pH$ d'une solution de concentration donnée, espèces présentes dans l'état final, constante d'acidité $K_a$ ). Citer l'influence de la constante d'acidité $K_a$ et de la concentration de l'acide ou de la base sur le taux d'avancement de la réaction d'un acide ou d'une base avec l'eau. Relier la dissolution du dioxyde de carbone en solution aqueuse aux effets associés (physiologie, environnement).
Composition d'un système à l'état final.	Déterminer la composition du système dans l'état final pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique, en simplifiant éventuellement les calculs à l'aide d'hypothèses adaptées. <b>Mettre en œuvre une réaction acide-base pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse.</b>
Solutions tampons.	Citer les propriétés d'une solution tampon et les relier à sa composition. Citer des couples acide-base jouant un rôle de tampon dans des systèmes biologiques et géologiques.

## Thème M – mouvements et interactions

### M.1 Description et paramétrage du mouvement d'un point

Dans cette partie sont introduits les concepts fondamentaux et les outils nécessaires à la description du mouvement d'un point matériel. Le système des coordonnées cartésiennes est le seul exigible des étudiants. Il convient de les former progressivement à la maîtrise des projections et dérivations de vecteurs ainsi qu'avec l'algébrisation des grandeurs dans un contexte relevant de la physique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Repérage dans l'espace et dans le temps</b> Espace et temps classiques. Notion de référentiel. Caractère relatif du mouvement.	Choisir un référentiel adapté à la description du mouvement étudié.
<b>Cinématique du point</b> Description du mouvement d'un système matériel par celui d'un point. Vecteurs position, vitesse et accélération. Système des coordonnées cartésiennes.	Exprimer, à partir d'un schéma, le déplacement élémentaire et en déduire géométriquement les composantes du vecteur vitesse en coordonnées cartésiennes. Établir les expressions des composantes des vecteurs position, déplacement élémentaire, vitesse et accélération en coordonnées cartésiennes.
Mouvement rectiligne uniformément accéléré.	Caractériser le vecteur accélération pour les mouvements suivants : rectiligne, rectiligne uniforme, rectiligne uniformément accéléré.
Mouvement de vecteur accélération constant.	Établir l'expression de la vitesse et de la position en fonction du temps. Déterminer la vitesse en une position donnée. Obtenir l'équation de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.
	<b>Réaliser et exploiter quantitativement un enregistrement vidéo d'un mouvement : évolution temporelle des vecteurs vitesse et accélération.</b>

## M.2 Lois de Newton

Cette partie permet tout d'abord d'enrichir la culture scientifique des étudiants par une introduction des concepts fondamentaux de la dynamique newtonienne, dans le seul cadre des référentiels galiléens. Il s'agit également de construire progressivement les compétences des étudiants relatives à la modélisation du mouvement d'un système dans le cadre de la mécanique classique, qu'il s'agisse des étapes de bilan des actions mécaniques, de représentation de la situation étudiée par un schéma adapté, de projection de la deuxième loi de Newton dans la base des coordonnées cartésiennes ou de résolution des équations du mouvement. L'étude du mouvement d'un point matériel dans le champ de pesanteur uniforme constitue le cadre privilégié pour consolider les compétences précitées. L'introduction du modèle de force de frottement linéaire en vitesse permet d'enrichir l'étude du mouvement d'un point matériel, de faire émerger la notion de vitesse limite, et de confronter les étudiants aux limites de validité du modèle utilisé, et ainsi de donner toute leur importance aux étapes de modélisation et de validation d'un modèle. Une capacité numérique est introduite à cette occasion afin de compléter la résolution analytique des équations du mouvement en présence de frottements fluides. Cette partie aborde, en guise de conclusion, l'aspect énergétique du mouvement d'un point matériel et la notion de conservation de l'énergie dont on souligne le caractère fondamental et transversal en physique-chimie.

### M.2.1 Lois de Newton

Notions et contenus	Capacités exigibles
Première loi de Newton, principe d'inertie. Référentiel galiléen.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens. Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié.
Modélisation d'une action mécanique par une force. Troisième loi de Newton.	Établir un bilan des actions mécaniques s'exerçant sur un système modélisé par un point matériel et en rendre compte en représentant les forces associées sur un schéma adapté.
Deuxième loi de Newton. Équilibre d'un point matériel. Mouvement d'un point matériel soumis à un ensemble de forces de résultante nulle.	Déduire la trajectoire à partir des forces appliquées au point matériel, et maîtriser également la démarche inverse.
<b>Mouvement d'un point matériel soumis à une force constante</b> Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme.	Établir et exploiter les équations horaires du mouvement. Établir l'équation de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.
Modèle d'une force de frottement fluide linéaire en vitesse. Vitesse limite.	Déterminer et résoudre l'équation différentielle du mouvement. Exploiter une équation différentielle du mouvement sans la résoudre analytiquement, par exemple : mise en évidence d'une vitesse limite, d'un temps caractéristique, utilisation des résultats obtenus par résolution numérique, etc. <b>Capacité numérique :</b> résoudre numériquement, à l'aide de la méthode d'Euler par utilisation d'un tableur ou d'un langage de programmation, l'équation différentielle du mouvement d'un point matériel dans le champ de pesanteur uniforme et soumis à une force de frottement fluide linéaire ou quadratique en vitesse. <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides.</b>

## M.2.2 Travail et énergie

Notions et contenus	Capacités exigibles
Travail d'une force constante et uniforme. Énergie cinétique, énergie potentielle, énergie mécanique.	Reconnaître le caractère moteur ou résistant d'une force. Distinguer une force conservative d'une force non conservative. Citer l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur dans le cas d'un champ de pesanteur uniforme.
Théorème de l'énergie cinétique.	Exploiter le théorème de l'énergie cinétique. Exploiter la conservation de l'énergie mécanique dans le cas d'une force constante et uniforme conservative.

## Thème T – phénomènes de transport

## T.1 Transport de particules chargées dans un champ électrostatique uniforme

Cette partie est traitée dans le prolongement de la partie M.2.1. L'objectif essentiel est de présenter un modèle simple de mobilité électrophorétique, en relation avec l'enseignement de biotechnologies. Le champ électrostatique uniforme créé par deux armatures planes soumises à une différence de potentiel stationnaire est introduit sans démonstration, en négligeant tout effet de bord, dans une approche descriptive du modèle. L'interaction de la particule chargée avec le milieu est décrite par une force de frottement linéaire en vitesse. L'expression de la mobilité électrophorétique en fonction de la charge de la particule et du coefficient de frottement hydrodynamique est exigible des étudiants. Cette partie se conclut par le calcul de l'intensité électrique associée au courant de particules chargées : l'occasion est donnée de définir l'intensité d'un courant électrique et de procéder pour la première fois à l'écriture d'un bilan de particules, en prenant en compte l'algèbrisation des différentes grandeurs.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Champ électrique</b> Modèle du champ électrostatique uniforme créé par deux armatures chargées, planes, sans effets de bord, soumises à une différence de potentiel.	Exprimer la norme du vecteur champ électrostatique en fonction de la différence de potentiel et de la distance entre les deux armatures. Orienter le vecteur champ électrostatique dans le sens des potentiels décroissants.
<b>Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme</b> Charge électrique. Force électrique.	Exprimer la force électrique s'exerçant sur une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme.
Vitesse limite d'une particule chargée soumise à un champ électrostatique uniforme.	Écrire l'équation différentielle du mouvement d'une particule chargée soumise à un champ électrostatique uniforme et à l'action du milieu, modélisée par une force de frottement fluide linéaire en vitesse. Exprimer la vitesse limite de la particule chargée en fonction du champ électrostatique. Interpréter l'orientation relative de la vitesse limite de la particule chargée et du champ électrostatique.
<b>Mobilité électrophorétique</b> Mobilité électrophorétique.	Exprimer la vitesse limite d'une particule chargée en fonction du champ électrostatique et de la mobilité électrophorétique. Commenter qualitativement l'influence de la taille d'une particule et de sa charge électrique sur sa mobilité électrophorétique.
Courant électrophorétique.	Définir l'intensité du courant électrophorétique. Établir un bilan de la charge électrique algébrique qui traverse une surface plane dans un sens donné pendant une durée donnée.

## Second semestre

### Thème C – constitution et transformations de la matière

#### C.3 Constitution de la matière : relation entre structure des entités chimiques et propriétés

L'étude des interactions entre entités chimiques a pour objectif d'interpréter, de prévoir ou de comparer des propriétés physiques : miscibilité, solubilité, formation de micelles et d'émulsions. Le recours à des illustrations et applications dans la vie courante, au niveau du laboratoire (choix de solvant pour les synthèses et les extractions, interprétation des chromatogrammes sur couche mince) et dans le domaine du vivant (structures secondaire et tertiaire des protéines, cohésion inter-brins dans l'ADN) est fortement encouragé. Les situations retenues permettront de sensibiliser les étudiants à la différence d'ordres de grandeur des énergies mises en jeu dans une liaison covalente et dans une interaction entre entités chimiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Polarisabilité d'une entité polyatomique.	Comparer qualitativement le caractère polarisable de deux entités chimiques polyatomiques.
Interactions de van der Waals. Liaisons hydrogène (interactions par pont hydrogène). Interactions ion-ion et ion-dipôle.	Citer les ordres de grandeur des énergies mises en jeu dans les liaisons covalentes, liaisons hydrogène, interactions de van der Waals et interactions ion-ion. Prévoir, à partir de leur nature et leur structure, les interactions entre entités chimiques, notamment celles intervenant dans la chimie du vivant (acides gras, acides nucléiques, acides aminés).
Mise en solution d'une espèce chimique ionique ou moléculaire. Application à l'extraction liquide-liquide.	Interpréter la miscibilité ou la non-miscibilité de deux solvants. Interpréter la solubilité d'une espèce chimique moléculaire ou ionique dans un solvant donné. Interpréter le choix d'un solvant lors d'une extraction liquide-liquide.
Chromatographie sur couche mince	Interpréter les différences de rapports frontaux de deux espèces chimiques lors d'une chromatographie sur couche mince.
Amphiphilie, espèces chimiques amphiphiles, micelles, structure schématique des membranes cellulaires. Émulsions.	Prévoir le caractère amphiphile d'une entité à partir de sa structure et interpréter sa solubilité dans un solvant. Interpréter la structure d'une association d'entités amphiphiles (micelle, bicouche, membrane cellulaire). Citer des exemples d'émulsions de la vie courante. Décrire la structure d'une émulsion en distinguant phase dispersée et phase continue. Interpréter les propriétés détergentes ou émulsifiantes des espèces chimiques amphiphiles.

#### C.4 Transformations chimiques : évolution d'un système vers un état final - applications aux réactions d'oxydo-réduction

Les transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction sont abordées par analogie avec celles modélisées par des réactions acide-base. L'étude des piles permet d'introduire la notion de potentiel d'électrode, dont la relation de Nernst, admise, permet de calculer la valeur à l'équilibre. La détermination analytique de la composition à l'état final est limitée à des transformations modélisées par une unique réaction chimique. La relation entre la constante thermodynamique d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction et les potentiels standard est admise. La notion de nombre d'oxydation permet de réinvestir le tableau périodique et de comparer des états d'oxydation du carbone et du soufre dans les familles fonctionnelles rencontrées en chimie organique ou dans des systèmes biologiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Oxydants et réducteurs, nombre d'oxydation. Couple oxydant-réducteur. Exemples d'oxydants et de réducteurs minéraux usuels : nom et formule des ions thiosulfate, du permanganate, de l'hypochlorite, du dichlore, du peroxyde d'hydrogène, du dioxygène, du dihydrogène, des métaux. Application au pont disulfure et à la chaîne d'oxydation des alcools.	Identifier l'oxydant et le réducteur d'un couple. Ajuster la demi-équation électronique associée à un couple oxydant-réducteur.
Pile, tension à vide, potentiel d'électrode, potentiel standard, relation de Nernst. Réactions électrochimiques aux électrodes.	Modéliser le fonctionnement d'une pile à partir d'une mesure de tension à vide ou à partir des potentiels d'électrode. <b>Réaliser une pile et étudier son fonctionnement. Mettre en évidence l'influence des concentrations sur le potentiel d'électrode.</b>
Réaction d'oxydo-réduction. Constante thermodynamique d'équilibre. Dismutation et médiatisation.	Identifier une réaction d'oxydo-réduction à partir de son équation. Écrire l'équation de la réaction d'oxydo-réduction modélisant une transformation en solution aqueuse et calculer la valeur de sa constante thermodynamique d'équilibre. Prévoir qualitativement ou quantitativement le caractère thermodynamiquement favorisé ou défavorisé d'une réaction d'oxydo-réduction à partir des potentiels standard des couples mis en jeu.
Composition d'un système à l'état final.	Extraire les données thermodynamiques pertinentes de tables pour étudier un système en solution aqueuse. Déterminer la composition du système dans l'état final pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique, en simplifiant éventuellement les calculs à l'aide d'une hypothèse adaptée. <b>Mettre en œuvre une réaction d'oxydo-réduction pour réaliser une analyse qualitative ou quantitative en solution aqueuse.</b>
Influence du pH sur les propriétés d'oxydo-réduction; potentiel standard apparent en biologie.	Relier le pouvoir oxydant ou réducteur d'un couple à son potentiel standard apparent.

## C.5 Transformations de la matière : évolution temporelle d'un système

### C.5.1 Modélisation macroscopique : lois de vitesse et loi d'Arrhenius

L'étude de l'évolution temporelle d'un système chimique permet de mettre en évidence expérimentalement les facteurs cinétiques concentration et température, et de les mettre en œuvre en stratégie de synthèse et d'analyse. Cette étude est l'occasion d'introduire les premières modélisations macroscopiques d'évolution des concentrations avec des lois de vitesse d'ordre simple et d'influence de la température avec la loi d'Arrhenius. Les déterminations d'ordre global ou apparent mettent en œuvre exclusivement la méthode intégrale et peuvent s'effectuer à l'aide de tableurs ou d'un langage de programmation pour l'exploitation des mesures dans le cadre d'un réacteur fermé parfaitement agité.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Vitesses volumiques de consommation d'un réactif et de formation d'un produit. Vitesse volumique de réaction pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique (supposée sans accumulation d'intermédiaires). Temps de demi-réaction d'une transformation totale ou non totale.	Relier la vitesse volumique de réaction à la vitesse volumique de consommation d'un réactif ou de formation d'un produit. <b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation et à partir de données expérimentales, tracer l'évolution temporelle d'une concentration et d'une vitesse volumique de réaction, puis tester qualitativement une relation donnée entre ces grandeurs.

<p>Lois de vitesse : réactions sans ordre, réactions avec ordre simple (0, 1, 2), ordre global, ordre apparent.</p> <p>Loi empirique d'Arrhenius et énergie d'activation.</p>	<p>Exprimer la loi de vitesse dans le cas d'une réaction chimique admettant un ordre, en se limitant strictement à des cas d'ordre 0, 1 ou 2 pour un unique réactif, ou se ramenant à un tel cas par dégénérescence de l'ordre ou conditions initiales stœchiométriques.</p> <p>Déterminer un temps de demi-réaction à partir d'une loi de vitesse.</p> <p>Déterminer un ordre de réaction à l'aide de la méthode intégrale.</p> <p>Déterminer la valeur de la constante cinétique à une température donnée.</p> <p><b>Établir une loi de vitesse, déterminer des ordres partiels, la constante de vitesse et l'énergie d'activation à partir du suivi temporel d'une grandeur physique.</b></p>
<p>Facteurs cinétiques (concentration et température) en stratégie de synthèse et d'analyse : dilution, chauffage, reflux, trempé.</p>	<p>Reconnaître, dans un protocole, des opérations visant à augmenter ou à diminuer une vitesse de réaction.</p>

### C.5.2 Modélisation microscopique : mécanismes réactionnels et lois de vitesse dans des cas simples

La modélisation, au niveau microscopique, d'une transformation chimique s'appuie sur les mécanismes réactionnels. L'obtention d'une loi de vitesse à partir d'un mécanisme réactionnel est limitée aux cas présentant une étape cinétiquement déterminante et permettant d'appliquer l'approximation du pré-équilibre rapide. En vue de faciliter l'appropriation de la modélisation cinétique d'un équilibre chimique, le professeur utilise, et met à disposition des étudiants, des simulations obtenues à l'aide d'un logiciel ou d'un langage de programmation.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Modélisation microscopique d'une transformation : mécanisme réactionnel, actes élémentaires, intermédiaires réactionnels.</p> <p>Molécularité d'un acte élémentaire et loi de van't Hoff.</p> <p>Profil réactionnel.</p>	<p>Retrouver l'équation de la réaction modélisant la transformation à partir d'un mécanisme réactionnel par stades.</p> <p>Écrire la loi de vitesse d'un acte élémentaire.</p> <p>Distinguer un intermédiaire réactionnel d'un complexe activé sur un profil réactionnel.</p>
<p>Traitement cinétique d'un mécanisme : approximation de l'étape cinétiquement déterminante, approximation du pré-équilibre rapide.</p>	<p>Exprimer en termes de concentrations l'égalité des vitesses à l'équilibre dans le cas d'une transformation modélisée par deux actes élémentaires opposés.</p> <p>Reconnaître, à partir d'informations fournies, les conditions d'utilisation de l'approximation de l'étape cinétiquement déterminante ou de l'approximation du pré-équilibre rapide et établir la loi de vitesse de réaction à partir d'un mécanisme réactionnel. Confronter le résultat à la loi de vitesse expérimentale.</p>

## C.6 Transformations de la matière en chimie organique

Afin d'introduire de manière progressive les concepts et modes de raisonnement en chimie organique, le programme de première année se concentre sur des transformations ne faisant pas intervenir d'activation de groupes fonctionnels. D'autre part, les caractéristiques stéréochimiques des réactions ne sont exigibles qu'en deuxième année. L'utilisation d'une banque de réactions permet d'enrichir les activités proposées et d'utiliser des transformations dont la connaissance n'est pas attendue des étudiants pour l'élaboration de stratégies de synthèse multi-étapes.

À travers les contenus et les capacités exigibles, sont développées des compétences qui pourront être, par la suite, valorisées, consolidées ou réinvesties, parmi lesquelles :

- interpréter les transformations chimiques étudiées dans une synthèse à partir de la réactivité des espèces chimiques organiques mises en jeu;

- pratiquer un raisonnement qualitatif argumenté pour expliquer le choix d'un mécanisme réactionnel en synthèse organique;
- acquérir des connaissances et compétences autour des interconversions entre groupes caractéristiques et des modifications de chaînes carbonées;
- analyser des problèmes de complexité croissante;
- identifier, dans une situation complexe, la partie utile au raisonnement;
- proposer une stratégie d'adaptation ou de contournement pour résoudre un problème.

### C.6.1 Transformations : du macroscopique au microscopique

L'objectif de cette partie est de familiariser les étudiants avec les raisonnements de la synthèse organique. Des exemples de synthèses totales ou de biosynthèses d'espèces chimiques dans le domaine du vivant peuvent servir de support pour identifier des modifications de groupes caractéristiques et/ou de chaîne carbonée. Les techniques de spectroscopie, présentées au premier semestre, permettent d'appuyer l'introduction des notions de chimiosélectivité et régiosélectivité. La partie « constitution de la matière » est également réinvestie pour établir les propriétés nucléophiles et électrophiles des entités chimiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Du macroscopique...</b> Modification de groupes caractéristiques. Modification de la chaîne carbonée (allongement ou coupure).	Identifier le rôle (modification de la chaîne carbonée et/ou de groupes caractéristiques) d'une étape d'une synthèse organique multi-étapes.
Types de réactions en chimie organique : addition, substitution, élimination, oxydation, réduction.	Identifier la nature d'une réaction en chimie organique.
Utilisation d'une banque de réactions.	Utiliser une banque de réactions pour proposer une synthèse multi-étapes d'une espèce chimique organique.
Chimiosélectivité, régiosélectivité.	Identifier, à l'aide d'une banque de réactions ou de données fournies, une situation de régiosélectivité ou de chimiosélectivité. Proposer une méthode spectroscopique (UV-visible, infrarouge ou RMN <sup>1</sup> H) pour suivre l'évolution d'une transformation chimique ou mettre en évidence une éventuelle sélectivité.
<b>...au microscopique</b> Nucléophile, électrophile. Espèces chimiques classiquement utilisées comme électrophiles : halogénoalcanes, aldéhydes, cétones, esters, carbocations. Espèces chimiques classiquement utilisées comme nucléophiles : organomagnésiens mixtes, amines, alcool, eau, ions hydroxyde, hydrure, alcoolate, carbanions.	Prévoir les sites potentiellement électrophiles et/ou nucléophiles d'une entité chimique à partir de son schéma de Lewis et éventuellement l'écriture de formules mésomères.
Symbolisme de la flèche courbe.	Compléter un mécanisme réactionnel fourni avec des flèches courbes. Identifier le rôle de nucléophile ou d'électrophile joué par une entité chimique dans un acte élémentaire.

### C.6.2 Exemples de réactions usuelles en synthèse organique

L'approche mécanistique est ici privilégiée à l'approche fonctionnelle pour favoriser le raisonnement et la transférabilité dans des situations analogues et pour commencer à engager la réflexion sur les stratégies de synthèse. Les seules transformations et les seuls mécanismes réactionnels exigibles sont indiqués dans la colonne "Notions et contenus". Pour ces transformations, il est attendu des étudiants qu'ils soient en mesure de proposer, en autonomie, une équation de réaction, ainsi que la structure du(des) produit(s) attendu(s) à partir de réactifs fournis, et inversement, des réactifs à mettre en œuvre pour synthétiser un produit souhaité. L'utilisation d'une banque de réactions permet d'enrichir les activités proposées en procédant par analogie de propriétés et d'utiliser des activations de groupes caractéristiques, sans justifier théoriquement l'augmentation de la réactivité constatée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Addition électrophile sur une double liaison C=C</b> Conversion d'un dérivé éthylénique en halogénoalcane (hydrohalogénéation par voie ionique) ou en alcool (hydratation), mécanismes, régiosélectivité. Stabilisation d'un carbocation par effets électroniques.</p>	<p>Expliciter la réactivité des dérivés éthyléniques. Tracer le profil énergétique de l'hydrohalogénéation pour identifier l'étape cinétiquement déterminante et proposer une loi de vitesse. Comparer la stabilité de deux carbocations. Prévoir ou justifier la régiosélectivité de l'addition électrophile sur un dérivé éthylénique.</p>
<p><b>Substitution nucléophile aliphatique</b> Mécanismes modèles limites S<sub>N</sub>1 et S<sub>N</sub>2. Lois de vitesse associées. Application à la conversion d'halogénoalcane.</p>	<p>Justifier des différences de réactivité en termes de polarisabilité. Justifier le choix d'un mécanisme limite, S<sub>N</sub>1 ou S<sub>N</sub>2, par des arguments structuraux ou à partir d'informations cinétiques. Utiliser une banque de réactions pour proposer une modification de groupe partant dans le but d'en améliorer l'aptitude nucléofuge.</p>
<p><b>Addition nucléophile</b> Organomagnésiens mixtes : préparation à partir des halogénoalcane, inversion de polarité par insertion d'un atome de magnésium, intérêt d'un carbone nucléophile pour l'allongement de la chaîne carbonée.  Allongement de chaîne carbonée : addition d'organomagnésien mixte sur les aldéhydes, les cétones et le dioxyde de carbone, mécanismes simplifiés. Modification de groupes caractéristiques : action d'hydrure sur les espèces carbonylées, mécanisme simplifié faisant intervenir un ion hydrure.</p>	<p>Relier le caractère nucléophile d'un organomagnésien mixte à sa structure. Justifier le choix d'un solvant d'une synthèse d'organomagnésien mixte.  Proposer une méthode pour allonger une chaîne carbonée.</p>
<p><b>Addition nucléophile suivie d'élimination</b> Conversion d'un acide carboxylique en chlorure d'acyle. Formation d'ester et d'amide à partir de chlorure d'acyle, mécanismes. Hydrolyse basique d'ester, mécanisme.</p>	<p>Justifier l'utilisation d'une base non nucléophile lors de la formation d'un ester ou d'un amide à partir d'un chlorure d'acyle. Utiliser un diagramme de prédominance pour justifier l'obtention d'un ion carboxylate par hydrolyse basique d'un ester. <b>Mettre en œuvre la synthèse, la purification et la caractérisation d'une espèce organique.</b></p>

## Thème E – énergie : conversions et transferts

Cette partie propose en introduction une présentation de différents états de la matière. La description d'un état d'équilibre thermodynamique d'un système à l'aide d'un jeu réduit de variables d'état s'appuie sur les modèles usuels du gaz parfait et de la phase condensée indilatable et incompressible, dont les limites sont cependant mentionnées par comparaison avec les propriétés physiques de systèmes réels.

Le premier principe de la thermodynamique est ensuite énoncé et permet d'établir les premiers bilans énergétiques, dont la formulation rigoureuse constitue un des objectifs de formation privilégiés. Les capacités identifiées doivent être introduites en s'appuyant, dès que possible, sur des dispositifs expérimentaux qui permettent leur acquisition progressive et authentique.

On utilise les notations suivantes : pour une grandeur extensive  $A$ ,  $a$  désigne la grandeur massique associée et  $A_m$  la grandeur molaire associée.



## E.1 Description d'un système à l'équilibre thermodynamique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Les états de la matière</b> États solide, liquide et gazeux. État condensé, état fluide. Les échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique de description de la matière. État d'équilibre thermodynamique et variables d'état.</p>	<p>Définir et caractériser les différents états de la matière.</p> <p>Présenter les paramètres usuellement utilisés pour la description d'un système thermodynamique : pression, température, volume, densité volumique de particules, masse volumique. Effectuer des conversions d'unités usuelles de pression (pascal, bar et millimètre de mercure). Associer qualitativement la température et la pression aux propriétés physiques du système à l'échelle microscopique.</p>
<p><b>Gaz parfait</b> Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température, pression.</p> <p>Équation d'état du gaz parfait.</p>	<p>Présenter succinctement, dans un diagramme d'Amagat, les isothermes d'un gaz réel. Définir le gaz parfait comme un modèle limite du gaz réel à basse pression ou basse densité volumique. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz.</p>
<p>Mélange idéal de gaz parfaits. Pression partielle. Loi de Dalton.</p>	<p>Donner la définition de la pression partielle. Exploiter la loi de Dalton.</p>
<p>Énergie interne du gaz parfait. Capacité thermique à volume constant d'un gaz considéré comme parfait.</p>	<p>Exprimer la variation de l'énergie interne d'un gaz parfait en fonction de la variation de température, la capacité thermique à volume constant étant donnée.</p>
<p><b>Phase condensée indilatable et incompressible</b> Modèle de la phase condensée indilatable et incompressible.</p>	
<p>Énergie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée indilatable et incompressible.</p>	<p>Exprimer la variation de l'énergie interne d'une phase condensée incompressible et indilatable en fonction de la variation de température, la capacité thermique à volume constant étant donnée.</p>
<p><b>Description d'un corps pur en équilibre diphasé</b> Corps pur en équilibre diphasé. Diagramme de phases (<math>P, T</math>), point critique, point triple. Cas particulier de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme de Clapeyron (<math>P, v</math>), pression de vapeur saturante, titre en vapeur.</p>	<p>Analyser un diagramme de phases expérimental (<math>P, T</math>) et nommer les différents changements de phase. Positionner les différents états physiques d'un corps pur dans les diagrammes (<math>P, T</math>) et (<math>P, v</math>).</p>

## E.2 Bilans d'énergie pour un système thermodynamique

Cette partie, centrée sur le premier principe de la thermodynamique, aborde les bilans d'énergie. Les relations entre variables d'état thermodynamiques considérées dans cette partie se limitent exclusivement à celles qui relèvent du modèle du gaz parfait ou du modèle de la phase condensée indilatable et incompressible. La loi de Laplace qui caractérise l'évolution adiabatique et réversible d'un gaz parfait n'est pas exigible, pas plus que ses conditions de validité. Elle peut néanmoins être utilisée à condition d'être fournie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Transformations thermodynamiques</b> Transformation thermodynamique d'un système. Transformations isochore, isobare et monobare. Thermostat, transformations monotherme et isotherme.</p>	<p>Identifier et définir un système ouvert, fermé ou isolé. Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur au système pour déterminer l'état d'équilibre final.</p>
<p><b>Premier principe de la thermodynamique. Bilans d'énergie.</b> Premier principe de la thermodynamique.</p>	<p>Citer les différentes contributions microscopiques et macroscopiques à l'énergie d'un système. Exploiter les propriétés d'extensivité et de fonction d'état de l'énergie interne.</p>
<p><b>Travail et transfert thermique</b> Travail des forces de pression pour une évolution isochore ou monobare. Transfert thermique. Transformation adiabatique.</p> <hr/> <p>Puissance thermique proportionnelle à l'écart des températures du système étudié et du milieu extérieur au système.</p> <p>Modélisation de l'évolution de la température d'un système lors d'une transformation isochore au contact d'un thermostat.</p>	<p>Exploiter le premier principe de la thermodynamique pour une évolution adiabatique ou isochore ou monobare. Associer les signes du travail et du transfert thermique aux sens effectifs des transferts énergétiques.</p> <hr/> <p>Interpréter qualitativement le signe de la puissance thermique reçue par le système en fonction du signe de l'écart des températures du système étudié et du milieu extérieur au système. Effectuer un bilan d'énergie pour un système qui reçoit une puissance thermique proportionnelle à l'écart des températures du système étudié et du milieu extérieur au système, lors d'une transformation isochore : établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la température du système. Identifier dans l'équation différentielle l'expression du temps caractéristique de l'évolution de la température.</p>
<p><b>Fonction d'état enthalpie</b> Fonction d'état enthalpie ; capacité thermique à pression constante d'un gaz parfait et d'une phase condensée.</p>	<p>Exprimer le premier principe de la thermodynamique sous forme de bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et dans l'état final. Exploiter les propriétés d'extensivité et de fonction d'état de l'enthalpie. Exprimer la variation d'enthalpie d'un gaz parfait ou d'une phase condensée indilatable et incompressible en fonction de la variation de température, la capacité thermique à pression constante étant donnée. Citer la valeur de la capacité thermique massique de l'eau liquide.</p>
<p>Enthalpie massique de changement d'état. Variation d'enthalpie associée à un changement d'état.</p>	<p>Réaliser un bilan énergétique en prenant en compte des changements d'état. Commenter qualitativement le signe de la variation d'enthalpie associée au changement d'état d'un corps pur. Citer les ordres de grandeur de l'enthalpie massique de fusion et de vaporisation de l'eau. <b>Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une grandeur thermodynamique énergétique (capacité thermique, enthalpie massique de changement d'état, etc.).</b></p>

### E.3 Statique des fluides

Cette partie s'organise en deux sous-parties. L'établissement de la relation fondamentale de la statique des fluides donne l'occasion de mettre en œuvre un raisonnement à l'échelle locale de la particule de fluide. Il convient d'insister sur le principe du découpage d'un domaine physique (volume, surface) en éléments infinitésimaux et de la sommation d'une grandeur extensive (force) pour ce découpage, sans développement calculatoire excessif. La notion de gradient d'un champ

scalaire est hors programme. L'expression de la poussée d'Archimède est énoncée sans démonstration ; il convient cependant d'en expliciter clairement et simplement l'origine. Enfin vient l'étude de la stratification verticale de l'atmosphère et des océans terrestres, à partir de modèles simples.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Pression dans un fluide au repos</b> Forces volumiques, forces surfaciques. Résultante de forces de pression sur une surface.</p>	<p>Citer des exemples de forces surfaciques ou volumiques. Utiliser les symétries pour déterminer la direction d'une résultante de forces de pression. Déterminer l'expression ou la valeur de la résultante des forces de pression sur une surface plane.</p>
<p>Statique des fluides dans le champ de pesanteur uniforme.</p>	<p>Établir la relation <math>\frac{dP}{dz} = \pm \rho g</math>.</p>
<p>Poussée d'Archimède.</p>	<p>Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède.</p>
<p><b>Équilibre hydrostatique dans le champ de pesanteur terrestre</b> Modèle de l'atmosphère isotherme. Échelle de hauteur caractéristique de variation de la pression.</p>	<p>Établir l'expression de la pression en fonction de l'altitude dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait. Citer la valeur de la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer.</p>
<p>Stratification verticale des océans.</p>	<p>Établir l'expression de la pression avec la profondeur dans le cas d'un fluide incompressible.</p>

## Deuxième partie

## Contenus thématiques

<b>Thème E – énergie : conversions et transferts</b>	9
E.4 Second principe de la thermodynamique . . . . .	9
E.5 Description des systèmes fermés de composition variable . . . . .	9
E.6 Application des principes de la thermodynamique à l'étude des transformations physico-chimiques . . . . .	10
E.7 Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire . . . . .	11
E.8 Machines thermiques . . . . .	11
<b>Thème C – constitution et transformations de la matière</b>	12
C.7 Caractérisation spectroscopique d'entités chimiques organiques . . . . .	12
C.8 Transformations de la matière : évolution temporelle d'un système, catalyse et catalyseurs . . . . .	13
C.9 Transformations de la matière en solution aqueuse . . . . .	13
C.10 Transformations de la matière en chimie organique . . . . .	14
<b>Thème M – mouvements et interactions</b>	17
M.3 Modèle de l'oscillateur harmonique . . . . .	17
M.4 Fluides en écoulement . . . . .	18
<b>Thème T – phénomènes de transport</b>	20
T.2 Transport de matière diffusif . . . . .	20
T.3 Conduction thermique . . . . .	20

## Thème E – énergie : conversions et transferts

## E.4 Second principe de la thermodynamique

L'étude du second principe de la thermodynamique s'inscrit dans la continuité du programme de thermodynamique de première année. La fonction d'état entropie est systématiquement donnée et sa construction n'est pas une capacité visée. La notion d'irréversibilité d'une transformation est associée à la création d'entropie. Le critère d'évolution qui en découle est mis en perspective dans le cadre des transformations des systèmes physico-chimiques de composition variable.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Nécessité d'un principe d'évolution, irréversibilité d'une transformation.	Discuter de l'insuffisance du premier principe de la thermodynamique en s'appuyant sur un exemple et citer quelques causes d'irréversibilité d'une transformation.
Fonction d'état entropie; entropie massique et entropie molaire. Entropie d'un gaz parfait, d'une phase condensée indilatable et incompressible.	Exploiter l'expression fournie de la variation d'entropie entre deux états d'équilibre thermodynamique d'un gaz parfait ou d'une phase condensée indilatable et incompressible.
Second principe de la thermodynamique pour un système fermé. Entropie échangée, entropie créée, bilan d'entropie.	Formuler un bilan d'entropie. Exploiter les propriétés d'extensivité et de fonction d'état de l'entropie. Associer la création d'entropie au caractère réversible ou irréversible de la transformation.

## E.5 Description des systèmes fermés de composition variable

L'étude de l'évolution d'un système physico-chimique, débutée en première année, est complétée par l'introduction de la fonction d'état enthalpie libre. Les potentiels chimiques qui en dérivent ne font pas l'objet de développement théorique, mais sont mis en oeuvre pour justifier le sens d'un transfert de matière (corps pur sous deux phases, osmose). On adopte pour les potentiels chimiques, l'expression générale suivante, faisant référence aux activités  $a_i$  introduites en première année :

$$\mu_i(T, P, \text{composition}) = \mu_i^{\text{réf}}(T, P) + RT \ln(a_i)$$

L'établissement de cette relation est strictement hors programme et aucun calcul différentiel ne peut être exigé des étudiants.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Enthalpie libre.  Activité d'un constituant physico-chimique, potentiel chimique.	Interpréter en termes d'enthalpie libre une évolution ou un équilibre d'un système physico-chimique dans des conditions isothermes et isobares. Exprimer et utiliser l'activité et le potentiel chimique d'un constituant à l'état pur, dans un mélange idéal ou dans une solution infiniment diluée.
Condition d'équilibre thermodynamique d'un corps pur sous deux phases.  Osmose, pression osmotique, loi de van't Hoff.	Utiliser le potentiel chimique pour prévoir l'évolution d'un système contenant un corps pur sous deux phases. Traduire la condition d'équilibre thermodynamique par une égalité de potentiels chimiques. Interpréter un transport de matière à l'aide du potentiel chimique (partage entre deux solvants, diffusion membranaire, processus osmotique, etc.). Exploiter la loi de van't Hoff, son expression étant fournie.

## E.6 Application des principes de la thermodynamique à l'étude des transformations physico-chimiques

Dans cette partie, seules des transformations physico-chimiques monobares sont envisagées. Pour le calcul des grandeurs standard de réaction, on se limite strictement au cas où les enthalpies et entropies standard de réaction sont supposées indépendantes de la température (approximation d'Ellingham). Les grandeurs standard de réaction permettent la détermination de la constante thermodynamique d'équilibre introduite en première année. La notion d'affinité chimique n'est pas utilisée. Le sens d'évolution spontanée d'un système hors d'équilibre, à température et pression fixées, est déterminé par le signe de l'enthalpie libre de réaction, donnée par la relation :

$$\Delta_r G(T, P, \text{composition}) = \Delta_r G^\circ(T) + RT \ln(Q_r)$$

L'établissement de cette relation est strictement hors programme et aucun calcul différentiel ne peut être exigé des étudiants. Enfin, le critère d'évolution est réinvesti dans l'étude des perturbations d'un système à l'équilibre chimique en vue d'interpréter des déplacements ou ruptures d'équilibre dans les contextes des solutions aqueuses, de la chimie de synthèse, des sciences du vivant, de l'environnement et du climat. Enfin, la relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard d'oxydoréduction, utilisée dans le contexte des sciences du vivant, permet de prévoir le caractère favorable ou défavorable d'une réaction d'oxydoréduction.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Application du premier principe</b> État standard. Enthalpie standard de réaction, enthalpie standard de formation, état standard de référence d'un élément chimique, loi de Hess.  Effets thermiques en réacteur monobare : — transfert thermique associé à une transformation chimique en réacteur monobare isotherme ; — variation de température en réacteur adiabatique monobare.	Déterminer l'enthalpie standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques.  Interpréter le signe de l'enthalpie standard de réaction. Calculer la valeur du transfert thermique entre le système physico-chimique et le milieu extérieur lors d'une transformation physico-chimique monobare et isotherme. Évaluer la température atteinte par un système siège d'une transformation physico-chimique supposée monobare et adiabatique.
<b>Application du second principe</b> Entropie standard de réaction, entropie molaire standard.  Enthalpie libre de réaction, enthalpie libre standard de réaction, constante thermodynamique d'équilibre et relation de van't Hoff dans le cadre de l'approximation d'Ellingham.	Prévoir ou interpréter le signe de l'entropie standard de réaction.  Calculer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à partir de grandeurs standard de réaction. Interpréter sa valeur pour identifier le caractère favorable ou défavorable d'une réaction. Modéliser l'évolution de la constante thermodynamique d'équilibre avec la température dans le cadre de l'approximation d'Ellingham.

Critère d'évolution, critère d'équilibre dans le cas d'un système chimique modélisée par une seule réaction à $T$ et $P$ constantes.	Relier l'enthalpie libre de réaction à la constante thermodynamique d'équilibre et au quotient de réaction. Identifier, en comparant le quotient de réaction et la constante thermodynamique d'équilibre, si le système se trouve dans une situation d'équilibre chimique ou hors équilibre chimique. En cas d'évolution, prévoir le sens d'évolution spontanée d'un système.  <b>Déterminer la valeur d'une grandeur standard de réaction.</b>
Perturbation d'un système à l'équilibre chimique.	Reconnaître si une grandeur intensive est ou non un facteur d'équilibre. Comparer le quotient de réaction et la constante thermodynamique d'équilibre pour interpréter l'effet de la variation d'un paramètre d'influence sur un système initialement à l'équilibre chimique.
<b>Application aux transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction</b> Relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard d'oxydo-réduction des couples impliqués.	Prévoir le caractère favorable ou défavorable d'une réaction d'oxydo-réduction par comparaison des potentiels standard des couples impliqués.

### E.7 Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire

La partie « **E.7 Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire** » s'appuie sur les compétences développées par les étudiants dans la voie technologique du lycée. Il s'agit ici d'introduire les outils théoriques nécessaires à la description des systèmes hydrauliques sur le plan énergétique. Le premier principe de la thermodynamique est appliqué à l'étude de l'écoulement stationnaire d'un fluide dans un système hydraulique. Sa démonstration permet non seulement de comprendre pourquoi la fonction d'état enthalpie intervient mais aussi d'insister sur le fait que les différentes variations sont calculées entre l'entrée et la sortie du système. Pour autant, cette démonstration n'est pas exigible des étudiants.

L'introduction relative à la conservation de la masse est commune à la partie **M.4.1** du présent programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Bilan de masse. Débit de masse. Conservation du débit de masse pour un écoulement stationnaire.	Établir et exploiter un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert ou fermé adapté.
<b>Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire</b> Premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire dans un système muni d'une seule entrée et d'une seule sortie. Travail utile et transfert thermique massiques.	Exploiter le premier principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire, en termes de grandeurs massiques, notamment pour l'étude d'un détendeur, d'un compresseur, d'une turbine, d'un échangeur thermique.
Diagramme $(P, h)$ d'un fluide réel.	Associer un point du diagramme $(P, h)$ à l'état thermodynamique d'un fluide. Décrire qualitativement ou quantitativement l'état thermodynamique d'un fluide repéré par un point du diagramme $(P, h)$ .

### E.8 Machines thermiques

La partie « **E.8 Machines thermiques** » se limite à la modélisation du fonctionnement d'une machine thermique par une évolution cyclique ditherme. Elle s'inscrit dans le prolongement de la section précédente où sont étudiés, sur le plan énergétique, quelques dispositifs constitutifs de machines thermiques réelles. Elle offre l'occasion de mettre en œuvre les deux principes de la thermodynamique dans la modélisation d'une machine thermique réelle par une machine thermique idéalisée ditherme. Le recours au diagramme  $(P, h)$  d'un fluide réel permet d'étudier des situations concrètes, de se libérer de calculs excessifs et de s'interroger sur les limites des modèles de fluides idéalisés. La formulation du second

principe de la thermodynamique pour l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire dans un système muni d'une seule entrée et d'une seule sortie n'est pas exigible des étudiants. Les diagrammes  $(T, s)$  sont hors-programme.

La distinction des machines thermiques motrices et réceptrices, ainsi que le sens associé des transferts énergétiques, constitue un des objectifs principaux de formation visé, au même titre que la capacité à modéliser une machine thermique réelle par une machine idéalisée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Application du premier et du second principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, limitations.	<p>Décrire le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.</p> <p>Analyser un dispositif réel et le modéliser par une machine cyclique ditherme.</p> <p>Représenter l'évolution thermodynamique cyclique du fluide dans un diagramme de Clapeyron, de Watt ou <math>(P, h)</math>.</p> <p>Définir un rendement ou une efficacité, et le ou la relier aux énergies reçues par le fluide au cours d'un cycle.</p> <p>Établir l'expression d'un rendement ou d'une efficacité optimale pour un cycle ditherme réversible. Comparer un rendement ou une efficacité à sa valeur optimale.</p> <p>Étudier des propriétés des machines thermiques réelles à l'aide de diagrammes <math>(P, h)</math>.</p> <p>Expliquer le principe de la cogénération.</p>

## Thème C – constitution et transformations de la matière

### C.7 Caractérisation spectroscopique d'entités chimiques organiques

La caractérisation des entités chimiques organiques, illustrée en première année à travers les techniques de spectroscopies moléculaires UV-visible, infrarouge et de RMN, est complétée en deuxième année par la fluorimétrie et la spectrométrie de masse. Ces techniques permettent de diversifier les sources d'information sur la structure des entités chimiques organiques. Aucun développement théorique ou technologique sur ces techniques n'est attendu.

Le professeur veille à illustrer cette partie en faisant appel à des applications authentiques (révélation UV en chromatographie sur couche mince, détection de contrefaçon, imagerie cellulaire, protéines fluorescentes, analyses chimiques et biologiques, etc.)

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Fluorimétrie</b></p> <p>Absorption et émission de photons, transition entre niveaux d'énergie électroniques et vibrationnels.</p> <p>Existence de différentes voies de désexcitation radiatives et non radiatives, durée de vie de l'état excité, constante de vie radiative.</p> <p>Espèce chimique fluorophore, fluorescence, déplacement de Stokes, coefficient d'absorption molaire et rendement quantique de fluorescence.</p>	<p>Associer un domaine spectral de rayonnement électromagnétique à la nature d'une transition entre niveaux d'énergie électroniques, vibrationnels ou rotationnels.</p> <p>Interpréter la différence d'énergie entre photons absorbés et photons émis.</p> <p>Identifier, par comparaison, un spectre d'absorption et un spectre d'émission d'une espèce chimique fluorophore.</p> <p>Déterminer la valeur de la constante de vie radiative à partir de données expérimentales d'intensité de fluorescence en fonction du temps.</p>
<p><b>Spectrométrie de masse</b></p> <p>Principe de la spectrométrie de masse : ionisation, séparation dans un analyseur, détection.</p> <p>Spectres de masse : pic de base, pic moléculaire, massif isotopique.</p>	<p>Utiliser un spectre de masse afin de déterminer la masse molaire d'une espèce chimique.</p> <p>Recueillir des informations sur les motifs structuraux d'une espèce chimique, dans des cas simples, à l'aide d'un spectre de masse fourni et de documents sur l'ionisation effectuée ou sur les fragmentations observées.</p> <p>Identifier la présence d'isotopes.</p>

### C.8 Transformations de la matière : évolution temporelle d'un système, catalyse et catalyseurs

Introduit expérimentalement, l'effet catalytique est modélisé, au niveau microscopique, par un mécanisme réactionnel concurrent présentant des étapes plus nombreuses et plus faciles. L'étude des mécanismes réactionnels, limitée en première année aux exemples présentant une étape cinétiquement déterminante ou un équilibre rapidement établi, est poursuivie en deuxième année pour aborder les processus catalytiques. L'approximation de l'état quasi-stationnaire n'est pas abordée.

Abondamment décrite dans l'enseignement de biotechnologies, l'étude de la catalyse enzymatique est enrichie par l'établissement de la loi de vitesse dans le cadre du modèle de Michaelis-Menten. Seul le mécanisme sans inhibiteur est exigible, les autres mécanismes peuvent être abordés mais leurs étapes et caractéristiques doivent être fournies en vue d'établir la loi de vitesse. Des illustrations prises dans le domaine du vivant et des biotechnologies permettent de réinvestir les structures et interactions entre entités chimiques.

Cette partie est l'occasion de sensibiliser les étudiants à l'intérêt de la catalyse dans un contexte de synthèse chimique avec un impact environnemental plus limité (réduction du chauffage, de la durée de la transformation, de la quantité de sous-produits formés grâce à l'intervention d'un catalyseur spécifique).

Notions et contenus	Capacités exigibles
Catalyse d'une transformation, catalyseur.	Citer les propriétés d'un catalyseur et identifier un catalyseur d'une transformation à l'aide de données expérimentales.
Intervention du catalyseur dans le mécanisme réactionnel.	Reconnaître un catalyseur dans un mécanisme réactionnel. Mettre en évidence un effet catalytique par comparaison de profils réactionnels sans et avec catalyseur.
Catalyse enzymatique, site actif d'une enzyme, complexe enzyme-substrat. Modèles de Michaelis-Menten avec et sans inhibiteur.	Établir la loi de vitesse de formation d'un produit dans le cadre du modèle de Michaelis-Menten avec pré-équilibre rapide, les mécanismes réactionnels avec inhibiteurs étant fournis.

### C.9 Transformations de la matière en solution aqueuse

L'étude des transformations en solution aqueuse a été abordée en première année pour des transformations modélisées par des réactions acide-base et des réactions d'oxydo-réduction. En seconde année, ces modélisations sont enrichies par les réactions de complexation et de précipitation. Les situations de contextualisation de ces réactions sont nombreuses : traitement de solutions (résines échangeuses d'ions, précipitation sélective, etc.), analyses chimique et biochimique, chimie du vivant (respiration, photosynthèse, etc.).

Les diagrammes de prédominance et de distribution d'espèces chimiques constituent un outil privilégié pour prévoir et interpréter des transformations.

Certaines capacités développées lors de l'étude des transformations de la matière en solution aqueuse sont mises en exergue afin de souligner leur caractère transversal.



Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Transformation chimique en solution aqueuse modélisée par une seule réaction chimique.</p>	<p>Extraire la valeur d'une constante thermodynamique d'équilibre à partir d'un diagramme de prédominance ou d'existence.</p> <p>Extraire les données thermodynamiques pertinentes de tables pour étudier un système en solution aqueuse.</p> <p>Utiliser des diagrammes de prédominance ou d'existence pour identifier des espèces incompatibles ou prévoir la nature des espèces majoritaires.</p> <p>Écrire l'équation de la réaction modélisant une transformation en solution aqueuse et déterminer la valeur de sa constante thermodynamique d'équilibre.</p> <p>Déterminer la composition du système dans l'état final pour une transformation modélisée par une réaction chimique unique, en simplifiant éventuellement les calculs à l'aide d'hypothèses adaptées.</p> <p>Prévoir le sens d'évolution d'un système chimique, initialement à l'équilibre, à la suite d'une perturbation par comparaison du quotient de réaction et de la constante thermodynamique d'équilibre.</p> <p>Confronter les prévisions thermodynamiques à des données expérimentales et interpréter d'éventuels écarts en termes cinétiques ou de modélisation inappropriée.</p>
<p><b>Transformations modélisées par des réactions de complexation-décomplexation</b></p> <p>Atome ou ion central, ligand, complexe, indice de coordination.</p> <p>Constante de formation globale d'un complexe.</p> <p>Perturbation d'un système comportant un complexe : ajout d'acide, compétition entre centres métalliques, compétition entre ligands.</p>	<p>Citer des exemples de complexes intervenant dans le domaine des sciences du vivant.</p> <p>Analyser l'effet d'un ajout d'acide, de ligand ou de centre métallique sur la composition d'une solution contenant un complexe.</p>
<p><b>Transformations modélisées par des réactions de précipitation-solubilisation</b></p> <p>Mise en solution d'un solide ionique : produit de solubilité.</p> <p>Condition de précipitation d'un solide ionique : diagramme d'existence.</p> <p>Solubilité et paramètres d'influence de la solubilité : température, effet d'ion commun, <i>pH</i>, complexation.</p>	<p>Citer des exemples de précipités intervenant dans le domaine du vivant ou de la géologie.</p> <p>Prévoir, à partir de données thermodynamiques et de conditions opératoires, l'état de saturation ou de non saturation en solide ionique d'une solution aqueuse.</p> <p>Prévoir qualitativement l'évolution de la solubilité suite à l'introduction d'un ion commun, d'un ligand ou d'une modification du <i>pH</i>.</p> <p><b>Capacité numérique :</b> à l'aide d'un langage de programmation, déterminer les conditions optimales pour séparer deux ions par précipitation sélective.</p> <p><b>Mettre en œuvre des réactions de complexation, de précipitation, d'oxydo-réduction et acide-base pour effectuer des analyses quantitatives ou des traitements d'une solution.</b></p>

## C.10 Transformations de la matière en chimie organique

Cette partie s'inscrit dans la continuité de la partie correspondante du programme de physique-chimie de TB1 et poursuit les objectifs suivants :

- s'approprier les stratégies de synthèse organique en complétant l'étude des méthodes de conversion de groupes caractéristiques et de création de liaison carbone-carbone;
- consolider et compléter les connaissances des mécanismes fondamentaux, notamment en présence d'étapes d'activation.

L'approche retenue privilégie donc l'aspect mécanistique et la stratégie de synthèse à l'approche fonctionnelle, mais l'enseignant dispose de sa liberté pédagogique pour construire la progression de son choix. Le cours et les activités s'appuient le plus souvent possible sur des exemples issus de la chimie du vivant, de la chimie fine et de la chimie industrielle, et permettent une sensibilisation aux principes d'une chimie respectueuse de l'environnement.

D'autre part, les caractéristiques stéréochimiques des transformations viennent enrichir l'étude des transformations en chimie organique.

À travers les capacités et contenus exigibles, sont développées des compétences générales qui pourront par la suite être réinvesties, consolidées et valorisées, parmi lesquelles :

- interpréter les transformations chimiques étudiées dans une synthèse à partir de la réactivité des espèces chimiques organiques mises en jeu, réactivité déduite de la structure et des propriétés des entités chimiques qui les composent;
- pratiquer un raisonnement qualitatif argumenté pour choisir un mécanisme réactionnel en synthèse organique;
- analyser des problèmes de complexité croissante;
- identifier dans une situation complexe la partie utile au raisonnement;
- proposer une stratégie d'adaptation ou de contournement pour résoudre un problème.

### C.10.1 Notions et capacités transversales développées lors de l'étude des transformations en chimie organique

Dans le prolongement des compétences générales présentées ci-dessus, l'étude des transformations en chimie organique s'appuie sur les notions et capacités transversales suivantes, qui pourront être introduites progressivement en fonction des choix pédagogiques opérés. L'utilisation d'une banque de réactions permet d'enrichir les activités proposées en procédant par analogie de propriétés.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Réaction acide-base en chimie organique</b></p> <p>Échelle de <math>pK_a</math> généralisée. Exemples d'acides et de bases utilisés en chimie organique.</p> <p>Ordre de grandeur des <math>pK_a</math> des couples acido-basiques : acide carboxylique / carboxylate, alkyloxonium / alcool, alcool / alcoolate, phénol / phénolate, ammonium / amine, amine / amidure, carbonyle / énolate, alcane / composé organométallique.</p>	<p>Choisir une base adaptée à la déprotonation quantitative d'une espèce chimique organique.</p>
<p><b>Banque de réactions en chimie organique</b></p>	<p>Utiliser une banque de réactions fournie pour compléter une séquence réactionnelle, proposer des conditions expérimentales ou déterminer la structure d'espèces chimiques organiques.</p> <p><b>Mettre en œuvre la synthèse, l'isolement, la purification et la caractérisation d'une espèce chimique organique.</b></p>

### C.10.2 Activation de la réactivité

L'étude amorcée en première année est enrichie de mécanismes réactionnels faisant apparaître des étapes d'activation de groupe caractéristique.

Les seules transformations et les seuls mécanismes réactionnels exigibles sont indiqués dans la colonne "Notions et contenus". Pour ces transformations, il est attendu des étudiants qu'ils soient en mesure de proposer, en autonomie, une équation de réaction, ainsi que la structure du(des) produit(s) attendu(s) à partir de réactifs fournis, et inversement, des réactifs à mettre en œuvre pour synthétiser un produit souhaité et, le cas échéant, d'écrire le mécanisme réactionnel.

#### Activation de l'aptitude nucléofuge

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Substitution nucléophile aliphatique</b></p> <p>Conversion d'un alcool en halogénoalcane par action d'une solution concentrée d'halogénure d'hydrogène, mécanismes limites.</p>	<p>Comparer les réactivités des liaisons carbone-oxygène dans le cas des alcools et des ions alkyloxoniums. Commenter, dans une synthèse multi-étapes, le choix de l'activation d'un alcool par protonation.</p>

<b><math>\beta</math>-élimination</b> Déshydratation acido-catalysée d'un alcool, mécanisme limite E1.	Prévoir ou interpréter la régiosélectivité d'une $\beta$ -élimination en milieu acide sur un alcool.
---	--

### Activation du caractère électrophile

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Addition nucléophile</b> Activation électrophile du groupe carbonyle. Acétalisation des aldéhydes et des cétones : conditions expérimentales, mécanisme. Hémiacétalisation acido-catalysée du glucose.	Proposer et justifier les conditions expérimentales permettant la préparation d'un acétal.  Justifier la formation d'espèces cycliques, glucopyranose et glucofuranose, à partir du glucose en milieu biologique.
<b>Addition nucléophile suivie d'élimination</b> Synthèse des esters par activation du groupe carboxyle <i>in situ</i> par protonation : conditions expérimentales, mécanisme. Hydrolyse acide des esters et des amides : conditions expérimentales, mécanismes.	Proposer et justifier les conditions expérimentales permettant la préparation d'un ester ou l'hydrolyse acide d'un ester ou d'un amide.

### Activation du caractère nucléophile

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Substitution nucléophile aliphatique</b> Activation nucléophile des alcools et phénols : formation d'alcoolates par réaction acido-basique. Synthèse d'éther-oxydes par la méthode de Williamson, mécanisme.  Formation d'ions énolate : acidité en position $\alpha$ d'un groupe carbonyle. Équilibre céto-énolique. C-alkylation en position $\alpha$ d'un groupe carbonyle de cétone : mécanisme limite S <sub>N</sub> 2. Généralisation aux espèces chimiques possédant un atome d'hydrogène en position $\alpha$ d'un groupe mésomère-attracteur.	Proposer une voie de synthèse d'un éther-oxyde dissymétrique.  Justifier l'acidité d'une espèce chimique énolesable.  Justifier la restriction de la C-alkylation aux cétones énolesables.
<b>Addition nucléophile</b> Aldolisation, mécanisme. Crotonisation en présence d'une base, mécanisme limite E1cb, régiosélectivité.	Interpréter la formation de plusieurs produits par la compétition entre énolates dans le cas d'une aldolisation non dirigée. Justifier la régiosélectivité de la crotonisation en présence d'une base.

#### C.10.3 Initiation à la stratégie de synthèse

Cette partie vise à permettre aux étudiants d'analyser des stratégies de synthèse multi-étapes (réactivité des espèces chimiques utilisées, nature et ordre des étapes mises en œuvre, utilisation d'une activation de fonction ou d'une séquence protection/déprotection de groupe fonctionnel).

D'autre part, une réflexion est engagée sur les caractéristiques stéréochimiques des transformations en chimie organique. L'élaboration d'une courte synthèse multi-étapes par les étudiants peut se faire en autonomie à l'aide d'une banque de réactions fournie, à l'aide des réactions exigibles qui figurent au programme des deux années de TB ou à partir de raisonnements procédant par analogies de structure et de réactivité. Les étudiants sont amenés à questionner l'impact environnemental de certaines voies de synthèse totale au laboratoire (choix des réactifs, solvants, durée de chauffage,

catalyse).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Initiation à la stéréochimie dynamique des réactions</b>            Activité optique.            Loi de Biot, mélange racémique.            Stéréosélectivité, stéréospécificité.            Caractéristiques stéréochimiques des réactions d'addition et de substitution.</p>	<p>Relier la valeur du pouvoir rotatoire à la composition d'un mélange de stéréoisomères.            Justifier la cohérence d'un mécanisme réactionnel à l'échelle microscopique, avec des données stéréochimiques obtenues à l'échelle macroscopique.            Représenter les stéréoisomères attendus lors d'une réaction d'addition ou de substitution.            Justifier la formation de deux diastéréoisomères du glucopyranose en milieu biologique.</p>
<p><b>Protection-déprotection</b>            Protection-déprotection du groupe acide carboxylique par estérification; conditions expérimentales.            Protection-déprotection du groupe carbonyle ou d'un diol par acétalisation; conditions expérimentales.            Protection-déprotection du groupe hydroxyle : synthèse et hydrolyse d'esters, synthèse d'éther-oxydes.            Protection-déprotection du groupe amino : synthèse et hydrolyse d'amides.</p>	<p>Justifier la nécessité de protéger un groupe caractéristique dans une synthèse multi-étapes, une banque de réaction étant fournie le cas échéant.            Identifier les étapes de protection et de déprotection d'un groupe carbonyle, d'un groupe carboxyle, d'un groupe amino, d'un groupe hydroxyle ou d'un diol dans une synthèse multi-étapes.</p>
<p><b>Synthèse multi-étapes</b>            Modifications de groupes caractéristiques et de chaînes carbonées.            Rendement, optimisation, prise en compte de l'impact environnemental.</p>	<p>Analyser une synthèse multi-étapes fournie en termes de stratégie de synthèse : ordre des étapes, activation, protection de groupes caractéristiques, rendement, sélectivité.            Proposer ou justifier, éventuellement en s'appuyant sur une banque de réactions fournie, une méthode de modifications de groupes caractéristiques ou de chaînes carbonées adaptée à une synthèse multi-étapes.            Concevoir une stratégie de synthèse simple en tenant compte des impacts environnementaux.</p>

## Thème M – mouvements et interactions

### M.3 Modèle de l'oscillateur harmonique

#### M.3.1 Oscillateur harmonique mécanique en régime libre

Cette partie est consacrée à la présentation du modèle de l'oscillateur harmonique. Le système masse-ressort, en l'absence de frottement, constitue le système modèle sur lequel s'appuie cette introduction. Les étudiants doivent en particulier être en capacité d'établir, de résoudre l'équation différentielle des oscillations du système masse-ressort autour d'une position d'équilibre stable et d'identifier la pulsation propre du système. Le régime sinusoïdal forcé et le phénomène de résonance sont mis en évidence par une approche expérimentale.

La mise en contexte de cette présentation, par exemple dans le cadre de la chimie et de la vibration des liaisons intramoléculaires, permet de donner du relief à cette étude et d'en faciliter l'appropriation par les étudiants.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p><b>Oscillateur harmonique</b> Système modèle masse-ressort en l'absence de frottement. Force de rappel élastique. Pulsation propre.</p>	<p>Exprimer la force de rappel élastique exercée par un ressort en une de ses extrémités en fonction de sa raideur et de son allongement algébrique. Interpréter l'orientation de cette force en fonction du signe de l'allongement algébrique du ressort. Établir l'équation différentielle qui caractérise le régime libre du dispositif masse-ressort en l'absence de frottement; la résoudre compte tenu des conditions initiales. Définir un oscillateur harmonique en s'appuyant sur l'exemple du système masse-ressort en l'absence de frottement. Identifier l'expression de la pulsation propre dans l'équation différentielle d'un oscillateur harmonique. Caractériser le mouvement en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation. <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant de mesurer la période propre d'un oscillateur mécanique et étudier l'influence de paramètres physiques pertinents sur la période propre.</b> <b>Capacité numérique :</b> résoudre, à l'aide d'un langage de programmation, l'équation différentielle du régime libre du système masse-ressort soumis à une force de frottement fluide et illustrer qualitativement l'influence du frottement sur l'amortissement des oscillations du système.</p>
<p>Énergie potentielle élastique du système masse-ressort. Conservation de l'énergie mécanique du système en l'absence de frottement.</p>	<p>Citer l'expression de l'énergie potentielle élastique en fonction de la raideur et de l'allongement algébrique du ressort. Établir un bilan énergétique pour le système masse-ressort en l'absence de frottement : conservation de l'énergie mécanique, conversions périodiques et réciproques des énergies cinétique et potentielle.</p>
<p><b>Oscillateur harmonique en régime sinusoïdal forcé</b> Système masse-ressort soumis à une excitation sinusoïdale. Résonance.</p>	<p>Résoudre analytiquement l'équation différentielle du mouvement d'un système masse-ressort en régime sinusoïdal forcé en l'absence de frottement et mettre en évidence les insuffisances du modèle. <b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental visant à étudier un phénomène de résonance d'un oscillateur mécanique et à caractériser l'influence de l'amortissement sur la résonance.</b></p>

## M.4 Fluides en écoulement

Cette partie introduit d'abord les éléments essentiels à la description cinématique d'un fluide en écoulement.

L'écoulement d'un fluide réel est introduit par l'analyse de la mise en mouvement d'une couche de fluide sous l'effet d'une force de cisaillement dans la géométrie de l'écoulement de Couette plan. La loi de Newton pour la viscosité est énoncée dans ce cas simple et permet d'introduire la notion de viscosité dynamique, illustrée par des ordres de grandeur caractéristiques. L'adhérence d'un fluide réel à une paroi solide est affirmée en tant que réalité expérimentale. L'étude de l'écoulement stationnaire d'un fluide réel à travers une conduite cylindrique offre l'occasion de définir le nombre de Reynolds. Il est présenté comme le nombre sans dimension qui pilote la transition d'un régime d'écoulement laminaire vers un régime d'écoulement turbulent. La généralisation de cette propriété est admise.

L'étude énergétique de l'écoulement d'un fluide s'appuie sur la relation de Bernoulli généralisée (incluant, le cas échéant, des termes de gain et de perte d'énergie mécanique par unité de volume) pour l'écoulement stationnaire d'un fluide incompressible à travers un système hydraulique. Sa formulation et sa démonstration ne sont pas exigibles des étudiants. L'énergie cinétique par unité de volume est écrite en faisant intervenir la vitesse débitante même si le profil de vitesse d'écoulement n'est pas uniforme sur une section de l'écoulement. La notion de charge est introduite. Aucune expression de perte de charge n'est exigible des étudiants. Le cas du modèle du fluide parfait est évoqué.

L'utilisation d'opérateurs d'analyse vectorielle et la mobilisation d'équations aux dérivées partielles sont absolument proscrites dans l'étude de la dynamique des fluides.

De façon générale, l'étude des fluides en écoulement doit s'appuyer sur des situations concrètes et motivantes (comme l'analyse de la circulation sanguine par exemple).

#### M.4.1 Description d'un fluide en écoulement

Les notions de débit de masse et de conservation de la masse sont communes avec la partie « E.7 Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire » et introduites dans cette partie ou dans la partie E.7 selon la progression suivie par le professeur.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Description d'un fluide en écoulement</b> Particule de fluide. Champ eulérien des vitesses. Ligne de courant, tube de courant. Écoulement stationnaire.	Décrire, en utilisant le vocabulaire adapté, l'écoulement d'un fluide. Interpréter un document (photographie ou vidéo d'un écoulement, schéma, simulation) et identifier quelques caractéristiques de l'écoulement (stationnarité, lignes de courant, profil de vitesse).
Débit de masse, débit de volume.	Calculer un débit de masse ou de volume.
Bilan de masse. Conservation du débit de masse pour un écoulement stationnaire.	Établir et exploiter un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert ou fermé adapté.

#### M.4.2 Dynamique des fluides

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modèles d'écoulement stationnaire d'un fluide réel</b> Mise en mouvement d'une couche de fluide réel sous l'effet d'une force de cisaillement. Loi de Newton pour la viscosité. Adhérence d'un fluide réel à une paroi solide. Viscosité dynamique.	Interpréter, en termes de viscosité, la mise en mouvement d'un fluide réel sous l'effet d'un cisaillement plan dans la géométrie de l'écoulement de Couette plan. Citer l'ordre de grandeur de la viscosité dynamique de l'eau.
Écoulement de Poiseuille d'un fluide newtonien dans une conduite cylindrique. Loi de Poiseuille. Vitesse débitante.	Associer le sens de l'écoulement au signe de la différence de pression appliquée. Établir l'expression du débit de volume à partir du profil de vitesse parabolique donné. Exprimer la vitesse débitante à partir de la loi de Poiseuille fournie.
Nombre de Reynolds. Notion d'écoulement laminaire ou turbulent.	Calculer un ordre de grandeur de la valeur du nombre de Reynolds pour l'écoulement et l'interpréter compte tenu d'une valeur fournie du nombre de Reynolds critique.
<b>Bilan énergétique pour l'écoulement stationnaire d'un fluide considéré comme incompressible</b> Relation de Bernoulli généralisée pour l'écoulement stationnaire d'un fluide considéré comme incompressible dans un système hydraulique muni d'une seule entrée et d'une seule sortie. Charge définie comme la somme des énergies potentielle et cinétique par unité de volume et de la pression. Conservation de la charge dans le cas de l'écoulement d'un fluide parfait considéré comme incompressible dans un système hydraulique en l'absence d'élément moteur. Charge hydraulique.	Exploiter la relation de Bernoulli généralisée, fournie, en procédant, le cas échéant, à la simplification de termes négligeables. Interpréter la relation de Bernoulli en termes de charge. Étudier la circulation d'un fluide dans une canalisation sous l'effet de la gravité et/ou d'une pompe à partir d'informations fournies (les expressions d'éventuelles pertes de charge ne sont pas exigibles).
Effet Venturi. Application à la mesure d'un débit de volume.	Exprimer la charge hydraulique sous la forme d'une hauteur équivalente d'eau en équilibre hydrostatique dans le champ de pesanteur terrestre. Décrire le principe de l'effet Venturi. Établir la relation donnant le débit de volume dans un tube de Venturi.

Tube de Pitot. Application à la mesure d'une vitesse d'écoulement.	Décrire le principe du tube de Pitot. Établir la relation donnant la vitesse d'écoulement du fluide.
	<b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant de mesurer un débit de volume ou de masse, ou une vitesse débitante.</b>

## Thème T – phénomènes de transport

Cette partie est consacrée à la présentation du transport de matière diffusif et de la conduction thermique, avec une approche symétrique. L'étude de chacun de ces deux phénomènes de transport se fait sans formalisme vectoriel : le vecteur densité de courant de particules ou d'énergie est explicitement hors programme. Les lois phénoménologiques de Fick et de Fourier sont énoncées sous forme intégrale : l'expression du flux correspondant est donnée en fonction de la dérivée de la température par rapport à une seule coordonnée spatiale et d'une surface adaptée à la géométrie considérée. Afin d'éviter toute dérive calculatoire, toute situation où le champ de température dépend du temps est exclue. L'objectif principal de formation visé consiste en l'écriture de bilans de particules ou d'énergie en régime stationnaire.

Pour introduire ces notions, le professeur s'appuie sur des situations concrètes et motivantes pour les étudiants. L'étude de la conduction thermique entre deux systèmes de températures différentes permet de donner une assise théorique à la puissance thermique proportionnelle à leur écart de température, vue en première année. La notion de résistance ou de conductance thermique n'est cependant pas exigible des étudiants.

### T.2 Transport de matière diffusif

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modèle phénoménologique de transport de matière</b> Flux convectif et flux diffusif de particules.	Distinguer un transport de matière diffusif d'un transport convectif.
Loi phénoménologique de Fick donnant le flux diffusif en fonction de la dérivée de la densité volumique de particules par rapport à une seule coordonnée spatiale, à travers une surface plane, cylindrique ou sphérique, adaptée à la géométrie considérée.	Discuter des dépendances du flux de particules à travers une membrane en fonction de ses paramètres géométriques (épaisseur et surface de la membrane) et physiques (nature du milieu) en lien avec des applications biologiques.
Bilan de particules en régime stationnaire.	Établir un bilan de particules, éventuellement en présence de sources internes. Exploiter la conservation du flux de particules en régime stationnaire et en l'absence de sources internes.

### T.3 Conduction thermique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Modèle phénoménologique de la conduction thermique</b> Loi phénoménologique de Fourier donnant le flux thermique en fonction de la dérivée de la température par rapport à une seule coordonnée spatiale, à travers une surface plane, cylindrique ou sphérique, adaptée à la géométrie considérée. Conductivité thermique.	Discuter des dépendances du flux thermique à travers une paroi en fonction de ses paramètres géométriques (épaisseur et surface de la paroi) et physiques (conductivité thermique du milieu).  Citer l'ordre de grandeur de la conductivité thermique de l'air, de l'eau et d'un métal, à température et pression ambiantes.
Bilan d'énergie en régime stationnaire.	Établir un bilan d'énergie, éventuellement en présence de sources internes. Exploiter la conservation du flux thermique en régime stationnaire et en l'absence de sources internes.