

Programme de physique-chimie — TB2

Préambule

Objectifs de formation

Le programme de physique-chimie de la classe de TB2 s'inscrit dans la continuité du programme de physique-chimie de première année, avec lequel il forme un ensemble cohérent et ambitieux de connaissances et de capacités scientifiques qui préparent les étudiants à leur poursuite d'études supérieures dans un cursus d'ingénieur, de vétérinaire, de chercheur ou d'enseignant. L'enseignement de la physique et de la chimie vise à développer les compétences de chaque étudiant, déjà travaillées durant le cycle terminal de la voie technologique du lycée, inhérentes à la pratique de la démarche scientifique : observer et s'approprier, analyser et modéliser, réaliser et valider, et enfin communiquer et valoriser ses résultats.

L'acquisition de ce socle par les étudiants constitue un objectif prioritaire pour le professeur. Parce que la physique et la chimie sont avant tout des sciences expérimentales qui développent la curiosité, la créativité et l'analyse critique, l'expérience est au cœur de leur enseignement, que ce soit en cours ou lors des séances de travaux pratiques. Les activités expérimentales habituent les étudiants à se confronter au réel, comme ils auront à le faire dans l'exercice de leur métier.

L'introduction de capacités numériques dans le programme prend en compte la place essentielle des sciences numériques dans la formation des scientifiques notamment dans le domaine de la simulation, et permet l'acquisition de compétences aisément transférables dans d'autres champs que le champ disciplinaire de la physique et de la chimie.

La démarche de modélisation occupe également une place centrale dans le programme pour former les étudiants à établir, de manière autonome, un lien fait d'allers-retours entre le « monde » des objets, des expériences, des faits et celui des modèles, des concepts et des théories. Le professeur doit rechercher un point d'équilibre entre des approches complémentaires : conceptuelle et expérimentale, abstraite et concrète, théorique et appliquée, inductive et déductive, qualitative et quantitative.

La construction d'un modèle exige bien souvent une utilisation maîtrisée des mathématiques dont Galilée, fondateur de la physique expérimentale, soulignait déjà qu'elles sont le langage dans lequel est écrit le monde. De façon complémentaire, les sciences numériques offrent aujourd'hui aux étudiants la possibilité d'effectuer une modélisation avancée du monde réel.

Enfin, l'autonomie et la prise d'initiative sont spécifiquement développées à travers la pratique d'activités du type « résolution de problèmes » qui visent à exercer les étudiants à mobiliser des connaissances et des capacités pour répondre à un questionnement ou atteindre un but sans qu'aucune démarche de résolution ne soit fournie.

Organisation du programme

Le programme est globalement organisé en deux parties.

Dans la première partie, intitulée « **Formation expérimentale** », sont décrits les objectifs de formation sur le thème « Mesures et incertitudes » ainsi que les méthodes et les capacités expérimentales que les étudiants doivent maîtriser. Leur mise en œuvre s'appuie sur des problématiques concrètes qui mobilisent aussi les capacités expérimentales spécifiques, également exigibles, identifiées en gras dans la seconde partie du programme intitulée « **Contenus thématiques** ». La formation expérimentale doit reposer sur un apprentissage progressif et structuré de l'ensemble des capacités attendues, tout au long des deux années de classe préparatoire TB.

La seconde partie, intitulée « **Contenus thématiques** » est articulée autour de quatre thèmes : « **thème C – constitution et transformations de la matière** », « **thème E – énergie : conversions et transferts** », « **thème M – mouvements et interactions** » et « **thème T – phénomènes de transport** ». La présentation en deux colonnes « notions et contenus » et, en regard, « capacités exigibles » met en valeur les éléments clefs constituant le socle de connaissances et de capacités dont l'assimilation par tous les étudiants est requise. Certains items de cette seconde partie, identifiés en caractères gras dans la colonne « capacités exigibles », se prêtent particulièrement à une approche expérimentale. Ils doivent être abordés en priorité lors de séances de travaux pratiques où l'autonomie et l'initiative individuelle de l'étudiant doivent

être privilégiées. La présence de capacités numériques explicitées atteste par ailleurs de la volonté de renforcer ce volet de la formation des étudiants; l'annexe dédiée à cette composante en précise les objectifs et les attendus en termes de contenus comme de capacités exigibles. Des thèmes d'étude communs avec les sciences de la vie et de la Terre et avec les biotechnologies sont identifiés et peuvent se prêter à une approche pédagogique concertée entre enseignements, porteuse de sens et qui, par des éclairages complémentaires, ne peut que renforcer l'assimilation de ces connaissances par les étudiants.

Trois annexes sont consacrées d'une part au matériel nécessaire à la mise en œuvre des programmes, d'autre part aux outils mathématiques et aux outils numériques que les étudiants doivent savoir mobiliser de façon autonome dans le cadre des enseignements de physique-chimie en fin d'année en TB2.

Ce programme précise les objectifs de formation à atteindre pour tous les étudiants. Il n'impose en aucun cas une progression particulière; celle-ci relève de la liberté pédagogique du professeur.

Les compétences travaillées dans le cadre de la démarche scientifique

L'ensemble des activités proposées en classe préparatoire aux grandes écoles – activités expérimentales, résolutions de problèmes, TIPE, etc. – permet de travailler les compétences de la démarche scientifique qui figurent dans le tableau ci-dessous. Chaque compétence est illustrée par un ensemble de capacités associées qui permettent d'en préciser le contour sans pour autant constituer une liste exhaustive. Certaines peuvent parfois relever de plusieurs compétences. L'ordre de présentation de ces compétences ne préjuge pas d'un ordre de mobilisation de ces dernières lors d'une activité.

Les différentes compétences doivent être acquises à l'issue des deux années de formation en classes préparatoires. Elles nécessitent d'être régulièrement mobilisées par les étudiants et sont évaluées en s'appuyant, par exemple, sur l'utilisation de grilles d'évaluation.

Compétences	Exemples de capacités associées
S'approprier et problématiser	<ul style="list-style-type: none"> — Rechercher, extraire et organiser de l'information ou des données en lien avec la situation étudiée. — Conduire l'observation d'un phénomène à différentes échelles spatiales et temporelles. — Identifier la complémentarité d'informations présentées sous des formes différentes (texte, graphe, tableau,...) — Énoncer ou dégager une problématique scientifique en prenant en compte ses différents aspects (technique, scientifique, sociétal). — Représenter la situation par un schéma modèle. — Identifier les grandeurs pertinentes, leur attribuer un symbole. — Relier le problème à une situation modèle connue. — Acquérir de nouvelles connaissances en autonomie.
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> — Formuler des hypothèses. — Décomposer un problème en plusieurs problèmes plus simples. — Proposer une stratégie pour répondre à une problématique. — Choisir, concevoir, justifier un protocole, un dispositif expérimental, un modèle, des lois physiques ou chimiques. — Estimer des ordres de grandeur. — Proposer des analogies. — Identifier les idées essentielles d'un document et leurs articulations. — Relier qualitativement ou quantitativement différents éléments d'un ou de plusieurs documents.

Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> — Mettre en œuvre les étapes d'une démarche, un protocole, un modèle. — Extraire une information d'un texte, d'un graphe, d'un tableau, d'un schéma, d'une photographie. — Schématiser un dispositif, une expérience, une méthode de mesure. — Utiliser le matériel et les produits de manière adaptée en respectant des règles de sécurité. — Construire des représentations graphiques à partir de données. — Mener des calculs analytiques ou à l'aide d'un langage de programmation, effectuer des applications numériques. — Conduire une analyse dimensionnelle.
Valider	<ul style="list-style-type: none"> — Exploiter des observations, des mesures en estimant les incertitudes. — Confronter les résultats d'un modèle à des résultats expérimentaux, à des données figurant dans un document ou dans de la bibliographie scientifique, à ses connaissances. — Discuter de la recevabilité d'une hypothèse, d'une information. — Analyser les résultats de manière critique. — Repérer les points faibles d'une argumentation (contradiction, partialité, incomplétude,...). — Proposer des améliorations de la démarche ou du modèle.
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> — À l'écrit comme à l'oral : <ul style="list-style-type: none"> ◦ présenter les étapes de sa démarche de manière synthétique, organisée et cohérente. ◦ rédiger une synthèse, une analyse, une argumentation. ◦ appuyer son propos sur des supports appropriés. ◦ utiliser un vocabulaire scientifique précis et choisir des modes de représentation adaptés (schémas, représentations graphiques, cartes mentales, etc.). ◦ citer l'origine des sources utilisées. — Écouter, confronter son point de vue.

Pour atteindre le plein niveau de maîtrise de ces compétences et de ces capacités, les étudiants doivent progressivement développer, dans les différentes activités proposées par le professeur, leur **autonomie**, leur **esprit d'initiative** et leur **esprit critique**. La mise en œuvre des programmes doit aussi être l'occasion d'aborder avec les étudiants des questions liées à la poursuite d'études scientifiques, à l'histoire de l'évolution des idées, des modèles et des théories en physique-chimie, des questions liées à la recherche scientifique actuelle, des enjeux de citoyenneté comme l'engagement, la responsabilité individuelle et collective, la sécurité pour soi et autrui, ou des enjeux environnementaux et climatiques, en particulier le réchauffement climatique, notamment par application des principes du développement durable.

Repères pour l'enseignement

Dans le cadre de la liberté pédagogique, le professeur organise son enseignement en respectant trois grands principes directeurs :

- privilégier la mise en activité des étudiants en évitant tout dogmatisme : l'acquisition des connaissances, des capacités et des compétences sera d'autant plus efficace que les étudiants seront acteurs de leur formation. Les supports pédagogiques utilisés doivent notamment favoriser la réflexion, le raisonnement, la participation et l'autonomie des étudiants. L'investigation expérimentale et la résolution de problèmes favorisent cette mise en activité ;
- recourir à la mise en contexte des contenus scientifiques : le questionnement scientifique peut être introduit à partir de phénomènes réels, en particulier caractéristiques du monde du vivant, de procédés industriels ou d'objets technologiques. Le recours à des approches documentaires est un moyen pertinent pour diversifier les supports

d'accès à l'information scientifique et technologique et ainsi former l'étudiant à mieux en appréhender la complexité. Lorsque le thème traité s'y prête, l'enseignant peut le mettre en perspective avec l'histoire des sciences et des techniques, avec des questions d'actualité ou des débats d'idées ;

- contribuer à la nécessaire mise en cohérence des enseignements scientifiques ; la progression en physique-chimie est articulée avec celles mises en œuvre dans les autres disciplines scientifiques, sciences de la vie et de la Terre, biotechnologies, mathématiques et informatique.

Concernant l'évaluation, qui vise à mesurer le degré de maîtrise du socle ainsi défini et le niveau d'autonomie et d'initiative des étudiants, le professeur veillera soigneusement à identifier les compétences et les capacités mobilisées dans les activités proposées afin d'en élargir le plus possible le spectre.

Enfin, le professeur veille aussi à développer chez les étudiants des compétences transversales et préprofessionnelles relatives aux capacités suivantes :

- identifier les différents champs professionnels et les parcours pour y accéder ;
- caractériser et valoriser ses compétences scientifiques et techniques en lien avec son projet de poursuite d'études ou professionnel.

Première partie

Formation expérimentale

Cette partie est spécifiquement dédiée à la mise en œuvre de la formation expérimentale des étudiants.

Dans un premier temps, elle précise les connaissances et savoir-faire qui doivent être acquis dans le domaine de la **mesure** et de l'évaluation des **incertitudes**. Elle présente ensuite de façon détaillée l'ensemble des **capacités expérimentales** qui doivent être acquises et pratiquées en autonomie par les étudiants en fin de formation en classes préparatoires TB. Enfin, elle aborde la question de la prévention du risque au laboratoire de physique-chimie.

Une liste de matériel, que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice succincte, figure dans une annexe du présent programme.

1 Mesures et incertitudes

Les notions et capacités identifiées ci-après sont développées tout au long de la formation en classe préparatoire TB. Sur le thème des mesures et incertitudes, l'accent est mis sur la variabilité de la mesure d'une grandeur physique et sa caractérisation à l'aide de l'incertitude-type. La comparaison entre deux valeurs d'une même grandeur physique est conduite au moyen de l'écart normalisé, l'objectif principal étant de développer l'esprit critique des étudiants en s'appuyant sur un critère quantitatif. Le recours à la simulation vise à illustrer, sur la base de mesures expérimentales, différents effets de la variabilité de la mesure d'une grandeur physique dans le cas des incertitudes-types composées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Variabilité de la mesure d'une grandeur physique. Incertaince. Incertaince-type.	Identifier les incertitudes liées, par exemple, à l'opérateur, à l'environnement, aux instruments ou à la méthode de mesure. Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A). Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de type B). Associer un intervalle de confiance à l'écart-type dans l'hypothèse d'une distribution suivant la loi normale.
Incertainces-types composées.	Évaluer, à l'aide d'une relation fournie, l'incertaince-type d'une grandeur qui s'exprime en fonction d'autres grandeurs, dont les incertainces-types sont connues, par une relation du type somme, différence, produit ou quotient. Comparer entre elles les différentes contributions lors de l'évaluation d'une incertaince-type composée. Capacité numérique : simuler, à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur, un processus aléatoire – simulation de Monte-Carlo – permettant de caractériser la variabilité de la valeur d'une grandeur composée.
Écriture du résultat d'une mesure.	Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat d'une mesure.

Comparaison de deux valeurs ; écart normalisé.	Comparer deux valeurs dont les incertitudes-types sont connues à l'aide de leur écart normalisé. Analyser les causes d'une éventuelle incompatibilité entre le résultat d'une mesure et le résultat attendu par une modélisation.
Régression linéaire.	Utiliser un logiciel de régression linéaire afin d'obtenir les valeurs des paramètres du modèle. Analyser les résultats obtenus à l'aide d'une procédure de validation : analyse graphique intégrant les barres d'incertitude ou analyse des écarts normalisés. Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur, simuler un processus aléatoire de variation des valeurs expérimentales de l'une des grandeurs – simulation de Monte-Carlo – pour évaluer l'incertitude sur les paramètres du modèle.

2 Mesures et capacités expérimentales

Cette partie présente l'ensemble des capacités expérimentales générales que les étudiants doivent acquérir durant les séances de travaux pratiques à l'issue des deux années de formation en classe préparatoire TB.

Les capacités rassemblées ici ne constituent en aucun cas une liste de travaux pratiques qui s'articuleraient autour d'une découverte du matériel, mais doivent au contraire faire l'objet d'un apprentissage progressif contextualisé où chaque élément apparaît naturellement à l'occasion d'un problème concret. À ce titre, elle vient compléter la liste des thèmes d'étude – en gras dans la colonne « Capacités exigibles » de la partie « **Contenus thématiques** » – à partir desquels la problématique d'une séance peut être définie.

2.1 Mesures de grandeurs physiques

Les activités expérimentales doivent développer, tout au long de la formation des étudiants, la capacité à mettre en œuvre un dispositif de mesure d'une grandeur physique, à choisir le matériel adapté et à l'utiliser de façon autonome, éventuellement à l'aide d'une notice succincte.

Nature et méthodes	Capacités exigibles
Grandeurs physiques diverses Mesure de volume, masse, pH, conductance et conductivité, indice de réfraction, absorbance et transmittance.	Sélectionner et utiliser le matériel adapté à la précision requise. Distinguer les instruments de verrerie In et Ex. Préparer une solution de concentration en masse ou en quantité de matière donnée à partir d'un solide, d'un liquide, d'une solution de composition connue avec le matériel approprié. Utiliser les méthodes et le matériel adéquats pour transférer l'intégralité du solide ou du liquide pesé. Utiliser un appareil de mesure spécifique en s'aidant d'une notice. Étalonner une chaîne de mesure si nécessaire.
Mécanique Visualisation et décomposition d'un mouvement.	Enregistrer un phénomène à l'aide d'une caméra numérique et repérer la trajectoire à l'aide d'un logiciel dédié. En déduire la vitesse et l'accélération.
Mesure d'une accélération.	Mettre en œuvre un accéléromètre, par exemple avec l'aide d'un microcontrôleur.
Mesure d'une action mécanique.	Utiliser un dynamomètre.
Thermodynamique Mesure d'une pression.	Mettre en œuvre un capteur de pression, en identifiant son caractère différentiel ou absolu.

Repérage d'une température.	Mettre en œuvre un capteur de température, par exemple avec l'aide d'un microcontrôleur. Mettre en œuvre un capteur infrarouge. Choisir le capteur en fonction de ses caractéristiques (linéarité, sensibilité, gamme de fonctionnement, temps de réponse), et du type de mesures à effectuer.
Bilans d'énergie.	Mettre en œuvre une technique de calorimétrie.

2.2 Synthèses chimiques

La pleine maîtrise des différentes techniques mises en œuvre dans les synthèses chimiques, qui sont présentées ci-après, et les fondements théoriques de ces techniques en lien avec les propriétés physico-chimiques concernées, sont exigibles des étudiants en fin de formation. Pour ce faire, les étudiants sont progressivement invités à proposer des stratégies de transformation des réactifs, de séparation et de purification des produits synthétisés.

Nature et méthodes	Capacités exigibles
Transformation chimique	Choisir la verrerie adaptée à la transformation réalisée et aux conditions opératoires mises en œuvre.
Transformations à chaud, à froid, à température ambiante.	Réaliser le ou les montages appropriés et en expliquer le principe et l'intérêt.
Contrôle et régulation de la température du milieu réactionnel.	Choisir ou justifier l'ordre d'introduction des réactifs. Réaliser et réguler une addition au goutte à goutte.
Suivi de l'évolution de la transformation.	Utiliser le moyen de chauffage ou de refroidissement adéquat. Suivre et contrôler l'évolution de la température dans le réacteur. Choisir un moyen approprié pour réguler une éventuelle ébullition. Utiliser un réfrigérant à reflux, contrôler et réguler le reflux. Mettre en œuvre des méthodes permettant de suivre qualitativement ou quantitativement l'avancement de la transformation.
Séparation et purification	Choisir ou justifier un protocole de séparation ou de purification d'une espèce chimique, sur la base de données fournies ou issues d'observations et/ou de mesures.
Séparation de deux liquides non miscibles.	Réaliser une extraction liquide-liquide. Identifier la nature des phases dans une ampoule à décanter. Distinguer extraction et lavage d'une phase.
Séparation de deux espèces chimiques dissoutes dans une phase liquide.	Élaborer et mettre en œuvre un protocole de séparation de deux espèces dissoutes dans une phase liquide.
Séparation d'un soluté du solvant.	Expliquer l'intérêt de l'évaporateur rotatif.
Séparation d'un liquide et d'un solide.	Réaliser et mettre en œuvre une filtration simple, une filtration sous pression réduite. Choisir et justifier la méthode de filtration adaptée au système étudié.
Lavage d'un solide.	Réaliser et justifier les différentes étapes du lavage d'un solide : ajout du solvant de lavage, trituration, essorage.
Recristallisation d'un solide.	Expliquer et mettre en œuvre la technique de recristallisation. Justifier à l'aide de données pertinentes et/ou par l'observation le choix d'un solvant de recristallisation et la quantité mise en œuvre.
Séchage d'un solide.	Sécher un solide dans une étuve. Estimer, par des mesures de masse, l'efficacité du séchage.
Séchage d'un liquide.	Utiliser un desséchant solide et estimer correctement, par l'observation, la quantité à utiliser.

2.3 Analyses qualitatives et quantitatives

La maîtrise de différentes techniques expérimentales mises en œuvre lors des analyses qualitatives et quantitatives destinées à caractériser une espèce chimique, à en estimer la pureté ou à la doser, est elle aussi développée tout au long de la formation. La mobilisation récurrente des capacités présentées amène progressivement les étudiants à prendre les initiatives adaptées pour proposer, de façon autonome, un protocole de mesure de concentrations ou de quantités de matière, ou une méthode de caractérisation d'une espèce chimique tenant compte des propriétés physico-chimiques du système étudié.

Nature et méthodes	Capacités exigibles
Caractérisation d'une espèce chimique et contrôle de sa pureté	Proposer ou mettre en œuvre, à partir d'informations fournies, des tests qualitatifs préalables à l'élaboration d'un protocole.
Chromatographies sur couche mince.	Mettre en œuvre une chromatographie sur couche mince pour la caractérisation d'une espèce chimique et le suivi d'une transformation. Interpréter l'ordre d'élution des différentes espèces chimiques en relation avec leurs propriétés physico-chimiques et les caractéristiques de la phase stationnaire et de l'éluant.
Détermination expérimentale de grandeurs physiques caractéristiques de l'espèce chimique.	Extraire d'une banque de données des informations sur les propriétés physiques des espèces chimiques. Repérer une température de fusion. Mesurer un indice de réfraction. Mesurer une absorbance. Déterminer un coefficient d'absorption molaire en spectroscopie UV-visible. Comparer les données tabulées aux valeurs mesurées et interpréter d'éventuels écarts. Comparer les caractéristiques d'une espèce chimique synthétisée avec celles de l'espèce chimique commerciale. À partir d'une mesure appropriée, déterminer le rendement d'une synthèse, d'une méthode de séparation.
Dosages par étalonnage	Déterminer une concentration en exploitant la mesure de grandeurs physiques caractéristiques de l'espèce chimique ou en construisant et en utilisant une courbe d'étalonnage. Déterminer une concentration ou une quantité de matière par spectrophotométrie UV-visible.
Dosages par titrage Titrages directs, indirects. Équivalence. Titrages simples, successifs, simultanés. Méthodes expérimentales de suivi d'un titrage : pH-métrie, conductimétrie, potentiométrie à intensité nulle, indicateurs colorés de fin de titrage.	Identifier et exploiter la réaction support du titrage (repérer l'équivalence, justifier qualitativement l'allure de la courbe ou le changement de couleur 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 coloré de fin de titrage dans le cas d'un titrage acido-basique.
Méthodes d'exploitation des courbes expérimentales.	Utiliser un logiciel de simulation pour déterminer des courbes de distribution et confronter la courbe de titrage simulée à la courbe expérimentale.
Suivi cinétique de transformations chimiques Suivi en continu 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 température.	Choisir une méthode de suivi prenant en compte la facilité de mise en œuvre, les propriétés des espèces chimiques 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.

3 Prévention du risque au laboratoire

L'apprentissage et le respect des règles de sécurité dans tous les domaines recensés ci-après permettent aux étudiants de prévenir et de minimiser les risques lorsqu'ils évoluent au laboratoire de physique ou de chimie. Il importe en particulier que les étudiants prennent conscience du risque lié à la manipulation, au stockage et au rejet des espèces chimiques. Futurs ingénieurs, vétérinaires, 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
Prévention des risques au laboratoire Règles de sécurité au laboratoire.	Adopter une attitude responsable et adaptée au travail en laboratoire. Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.
Risque électrique.	Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
Risque optique.	Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.
Risques liés à la pression et à la température.	Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.
Risque chimique. Classes et catégories de danger. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Mentions de danger (H), 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.
Prévention de l'impact environnemental 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.

Deuxième partie

Contenus thématiques

Thème E – énergie : conversions et transferts	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
Thème C – constitution et transformations de la matière	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
Thème M – mouvements et interactions	17
M.3 Modèle de l'oscillateur harmonique	17
M.4 Fluides en écoulement	18
Thème T – phénomènes de transport	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
Application du premier principe 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.
Application du second principe 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. Déterminer la valeur d'une grandeur standard de réaction.
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.
Application aux transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction 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.
Bilan énergétique pour un fluide en écoulement stationnaire 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 (P, h).</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 (P, h).</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>Fluorimétrie</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>Spectrométrie de masse</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>Transformations modélisées par des réactions de complexation-décomplexation</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>Transformations modélisées par des réactions de précipitation-solubilisation</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 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 pH.</p> <p>Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, déterminer les conditions optimales pour séparer deux ions par précipitation sélective.</p> <p>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.</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>Réaction acide-base en chimie organique Échelle de pK_a généralisée. Exemples d'acides et de bases utilisés en chimie organique. Ordre de grandeur des pK_a 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>Banque de réactions en chimie organique</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>Mettre en œuvre la synthèse, l'isolement, la purification et la caractérisation d'une espèce chimique organique.</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>Substitution nucléophile aliphatique 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>

β-élimination Déshydratation acido-catalysée d'un alcool, mécanisme limite E1.	Prévoir ou interpréter la régiosélectivité d'une β -élimination en milieu acide sur un alcool.
---	--

Activation du caractère électrophile

Notions et contenus	Capacités exigibles
Addition nucléophile 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.
Addition nucléophile suivie d'élimination 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
Substitution nucléophile aliphatique 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 α d'un groupe carbonyle. Équilibre céto-énolique. C-alkylation en position α d'un groupe carbonyle de cétone : mécanisme limite S _N 2. Généralisation aux espèces chimiques possédant un atome d'hydrogène en position α d'un groupe mésomère-attracteur.	Proposer une voie de synthèse d'un éther-oxyde dissymétrique. Justifier l'acidité d'une espèce chimique énolisable. Justifier la restriction de la C-alkylation aux cétones énolisables.
Addition nucléophile 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
Initiation à la stéréochimie dynamique des réactions Activité optique. Loi de Biot, mélange racémique. Stéréosélectivité, stéréospécificité. Caractéristiques stéréochimiques des réactions d'addition et de substitution.	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.
Protection-déprotection 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.	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.
Synthèse multi-étapes Modifications de groupes caractéristiques et de chaînes carbonées. Rendement, optimisation, prise en compte de l'impact environnemental.	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.

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>Oscillateur harmonique 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. 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. Capacité numérique : 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>Oscillateur harmonique en régime sinusoïdal forcé 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. 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.</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
<p>Description d'un fluide en écoulement Particule de fluide. Champ eulérien des vitesses. Ligne de courant, tube de courant. Écoulement stationnaire.</p>	<p>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).</p>
<p>Débit de masse, débit de volume.</p>	<p>Calculer un débit de masse ou de volume.</p>
<p>Bilan de masse. Conservation du débit de masse pour un écoulement stationnaire.</p>	<p>Établir et exploiter un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert ou fermé adapté.</p>

M.4.2 Dynamique des fluides

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Modèles d'écoulement stationnaire d'un fluide réel 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.</p>	<p>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.</p>
<p>Écoulement de Poiseuille d'un fluide newtonien dans une conduite cylindrique. Loi de Poiseuille. Vitesse débitante.</p>	<p>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.</p>
<p>Nombre de Reynolds. Notion d'écoulement laminaire ou turbulent.</p>	<p>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.</p>
<p>Bilan énergétique pour l'écoulement stationnaire d'un fluide considéré comme incompressible 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.</p>	<p>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).</p>
<p>Effet Venturi. Application à la mesure d'un débit de volume.</p>	<p>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.</p>

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.
	Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant de mesurer un débit de volume ou de masse, ou une vitesse débitante.

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
Modèle phénoménologique de transport de matière 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
Modèle phénoménologique de la conduction thermique 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.

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 cependant obligatoirement s'accompagner d'une présentation guidée suffisamment détaillée.

1. Au laboratoire de physique

- Dynamomètre
- Accéléromètre
- Webcam avec logiciel dédié
- Appareil photo numérique ou caméra numérique
- Thermomètre, thermocouple, capteur infra-rouge
- Calorimètre

2. Au laboratoire de chimie

- Verrerie usuelle de chimie analytique : burettes, pipettes jaugées et graduées, fioles jaugées, erlenmeyers, béchers, etc.
- Verrerie usuelle de chimie organique, rodée ou non rodée : ballons, ampoule de coulée (isobare ou non), réfrigérant à eau, matériel de distillation simple, dispositifs de chauffage ou de refroidissement (bain-marie, bain froid, chauffe-ballon, agitateur magnétique chauffant, etc.), dispositifs d'agitation, ampoule à décanter, matériel de filtration sous pression atmosphérique et sous pression réduite
- 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
- Conductimètre et cellule de mesure
- Polarimètre
- Thermomètre
- Balance de précision
- Étuve

Annexe 2 : outils mathématiques

L'utilisation d'outils mathématiques est indispensable en physique comme en chimie. La capacité à mettre en œuvre de manière autonome certains de ces outils mathématiques dans le cadre des activités relevant de la physique-chimie fait partie des compétences exigibles à la fin de l'année de TB1. Le tableau ci-dessous explicite ces outils ainsi que le niveau de maîtrise attendu en fin d'année. Il est complété dans le programme de seconde année.

Cependant les situations dont la gestion manuelle ne relèverait que de la technicité sont traitées à l'aide d'outils numériques (calculatrices, logiciels de calcul numérique).

Outils mathématiques	Capacités exigibles
Équations algébriques	
Systèmes linéaires 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 analytique des solutions dans le seul cas où $n = p = 2$.
Équations non linéaires.	Représenter graphiquement une équation de la forme $f(x) = g(x)$. Interpréter graphiquement la ou les solutions.

Équations différentielles	
Équations différentielles à coefficients constants	Identifier l'ordre. Mettre une équation différentielle du premier ordre sous forme canonique.
Équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants de la forme : $y' + ay = b$.	Exprimer la solution de l'équation sans second membre (équation homogène). Déterminer une solution particulière de l'équation compte tenu du second membre. Exprimer la solution de l'équation correspondant à des conditions initiales données.
Autres équations différentielles du premier ordre.	Séparer les variables d'une équation du premier ordre à variables séparables.
Équation différentielle linéaire du deuxième ordre à coefficients constants de la forme : $y'' + \omega_0^2 y = b$.	Exprimer la solution de l'équation sans second membre (équation homogène). Déterminer une solution particulière de l'équation compte tenu du second membre. Établir l'expression de la solution compte tenu de conditions initiales données. Représenter graphiquement cette solution.
Équation différentielle linéaire du deuxième ordre à coefficients constants de la forme : $y'' + \omega_0^2 y = A \cos(\omega t + \varphi)$.	Établir l'expression de la solution en régime établi (solution particulière).
Fonctions	
Fonctions usuelles.	Exponentielle, logarithme népérien et décimal, cosinus, sinus, tangente, puissance réelle ($x \rightarrow x^\alpha$).
Dérivée. Notation $\frac{dx}{dt}$.	Calculer la fonction dérivée des fonctions usuelles à une seule variable réelle $x \rightarrow x^\alpha$, $x \rightarrow \exp(x)$, $x \rightarrow \ln(x)$, $x \rightarrow \cos(x)$, $x \rightarrow \sin(x)$, $x \rightarrow \tan(x)$, etc. Calculer la fonction dérivée d'une somme, d'un produit, d'un quotient de fonctions, d'une fonction composée.
Primitive et intégrale.	Interpréter l'intégrale comme une somme de contributions infinitésimales, en lien avec la méthode des rectangles en mathématiques.
Représentation graphique d'une fonction.	Déterminer un comportement asymptotique ; rechercher un extremum local. Utiliser des échelles logarithmiques ; identifier une loi de puissance à une droite en échelle log-log.
Géométrie	
Vecteurs et systèmes de coordonnées.	Exprimer les coordonnées d'un vecteur dans une base orthonormée. Utiliser le système des coordonnées cartésiennes.
Projection d'un vecteur et produit scalaire.	Interpréter géométriquement le produit scalaire et connaître son expression en fonction des coordonnées dans une base orthonormée. Utiliser la bilinéarité et le caractère symétrique du produit scalaire.
Transformations géométriques.	Utiliser les symétries par rapport à un plan, les translations et les rotations de l'espace. Utiliser leur effet sur l'orientation de l'espace.
Courbes planes.	Reconnaître l'équation cartésienne d'une droite et d'un cercle.
Longueurs, aires et volumes usuels.	Citer les expressions du périmètre d'un cercle, de l'aire d'un disque, de l'aire d'une sphère, du volume d'une boule, du volume d'un cylindre.
Trigonométrie	
Angle orienté.	Définir une convention d'orientation des angles d'un plan (euclidien) et lire des angles orientés.

Fonctions cosinus, sinus et tangente.	Utiliser le cercle trigonométrique et l'interprétation géométrique des fonctions cosinus, sinus et tangente comme aide-mémoire : relation $\cos^2(x) + \sin^2(x) = 1$, relations entre fonctions trigonométriques et toutes relations du type $\cos(x \pm \pi)$ et $\cos(x \pm \pi/2)$, parités, périodicité, valeurs des fonctions pour les angles usuels. Citer les formules d'addition et de duplication des cosinus et sinus; utiliser un formulaire dans les autres cas.
---------------------------------------	--

Annexe 3 : outils numériques

La prise en compte de capacités de codage en langage Python incluant l'utilisation de fonctions extraites de diverses bibliothèques dans la formation des étudiants vise à une meilleure appréhension des principes mis en œuvre par les différents logiciels de traitement des données dont l'utilisation est, par ailleurs, toujours recommandée et à mobiliser ces capacités dans un contexte concret, celui de la physique-chimie. Cette formation par le codage permet également de développer des capacités utiles à la physique-chimie comme le raisonnement, la logique ou la décomposition d'un problème complexe en étapes plus simples.

Le tableau ci-dessous explicite ces outils ainsi que les capacités exigibles à la fin de l'année en TB1. Ces capacités sont consolidées en seconde année pour atteindre une pleine maîtrise en fin de formation. La documentation des bibliothèques mentionnées ci-après est systématiquement fournie aux étudiants.

Outils numériques	Capacités exigibles
Outils graphiques	
Représentation graphique d'un nuage de points	Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque <code>matplotlib</code> pour représenter un nuage de points et rendre le graphe exploitable (présence d'une légende, choix des échelles...).
Représentation graphique d'une fonction.	Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque <code>matplotlib</code> pour tracer la courbe représentative d'une fonction et rendre le graphe exploitable (présence d'une légende, choix des échelles...).
Équations différentielles	
Équations différentielles du premier ordre.	Écrire un programme mettant en œuvre la méthode d'Euler explicite afin de résoudre une équation différentielle d'ordre 1.
Équations différentielles du second ordre.	Transformer une équation différentielle d'ordre 2 en un système différentiel de deux équations d'ordre 1. Utiliser la fonction <code>odeint</code> de la bibliothèque <code>scipy.integrate</code> (sa spécification étant fournie).
Probabilités - statistiques	
Variable aléatoire.	Utiliser les fonctions de base des bibliothèques <code>random</code> et/ou <code>numpy</code> (leurs spécifications étant fournies) pour réaliser des tirages d'une variable aléatoire. Utiliser la fonction <code>hist</code> de la bibliothèque <code>matplotlib.pyplot</code> (sa spécification étant fournie) pour représenter les résultats d'un ensemble de tirages d'une variable aléatoire. Déterminer la moyenne et l'écart-type d'un ensemble de tirages d'une variable aléatoire.
Traitement de données numériques	
Régression linéaire.	Utiliser la fonction <code>polyfit</code> de la bibliothèque <code>numpy</code> (sa spécification étant fournie) pour exploiter des données.