Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION

# Classes préparatoires aux grandes écoles

# Programme de physique-chimie de la classe de BCPST
# 2nde année

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

**Préambule**

## Objectifs de formation

Le programme de physique-chimie de la classe de BCPST2 s'inscrit dans la continuité de celui de la première année. Conçu comme un socle cohérent et ambitieux de connaissances et de capacités scientifiques, il prépare les étudiants à la poursuite de leur formation dans un cursus d'ingénieur, de vétérinaire, de chercheur ou d'enseignant. Il s'agit de renforcer les compétences de chaque étudiant, déjà travaillées en première année de BCPST1 et dans le cycle terminal de la voie générale 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 son 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.

De même, l'introduction de capacités numériques dans le programme prend en compte la place nouvelle des sciences numériques dans la formation des scientifiques notamment dans le domaine de la simulation. 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 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, par exemple par la prise en compte d'effets non linéaires.

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 en fin de formation. 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 BCPST.
La seconde partie, intitulée **« Contenus thématiques »** est articulée autour de cinq thèmes : **« thème C – constitution et transformations de la matière »**, **« thème E – énergie : conversions et transferts »**, **« thème M – mouvements et interactions »**, **« thème S – ondes et signaux »** 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 sont identifiés et peuvent se prêter à une approche pédagogique concertée entre les deux 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 BCPST. Ces annexes reprennent le contenu des annexes correspondantes du programme de physique-chimie de BCPST1 et viennent le compléter.

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. La numérotation des différentes parties prolonge celle du programme de physique-chimie de BCPST1.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

### 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. Dans leur grande majorité, elles sont communes à celles qui sont mises en œuvre dans d'autres enseignements scientifiques comme les sciences de la vie et de la Terre. 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 CPGE. 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** | — Rechercher, extraire et organiser de l'information ou des données en lien avec la situation étudiée.<br>— Conduire l'observation d'un phénomène à différentes échelles spatiales et temporelles.<br>— Identifier la complémentarité d'informations présentées sous des formes différentes (texte, graphe, tableau,...)<br>— Énoncer ou dégager une problématique scientifique en prenant en compte ses différents aspects (technique, scientifique, sociétal).<br>— Représenter la situation par un schéma modèle.<br>— Identifier les grandeurs pertinentes, leur attribuer un symbole.<br>— Relier le problème à une situation modèle connue.<br>— Acquérir de nouvelles connaissances en autonomie. |
| **Analyser** | — Formuler des hypothèses.<br>— Décomposer un problème en plusieurs problèmes plus simples.<br>— Proposer une stratégie pour répondre à une problématique.<br>— Choisir, concevoir, justifier un protocole, un dispositif expérimental, un modèle ou des lois physiques.<br>— Estimer des ordres de grandeur.<br>— Proposer des analogies.<br>— Identifier les idées essentielles d'un document et leurs articulations.<br>— Relier qualitativement ou quantitativement différents éléments d'un ou de plusieurs documents. |
| **Réaliser** | — Mettre en œuvre les étapes d'une démarche, un protocole, un modèle.<br>— Extraire une information d'un texte, d'un graphe, d'un tableau, d'un schéma, d'une photographie.<br>— Schématiser un dispositif, une expérience, une méthode de mesure.<br>— Utiliser le matériel et les produits de manière adaptée en respectant des règles de sécurité.<br>— Construire des représentations graphiques à partir de données.<br>— Mener des calculs analytiques ou à l'aide d'un langage de programmation, effectuer des applications numériques.<br>— Conduire une analyse dimensionnelle. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| | |
|---|---|
| **Valider** | — Exploiter des observations, des mesures en estimant les incertitudes.<br>— 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.<br>— Discuter de la recevabilité d'une hypothèse, d'une information.<br>— Analyser les résultats de manière critique.<br>— Repérer les points faibles d'une argumentation (contradiction, partialité, incomplétude,...).<br>— Proposer des améliorations de la démarche ou du modèle. |
| **Communiquer** | — À l'écrit comme à l'oral :<br>◦ présenter les étapes de sa démarche de manière synthétique, organisée et cohérente.<br>◦ rédiger une synthèse, une analyse, une argumentation.<br>◦ appuyer son propos sur des supports appropriés.<br>◦ utiliser un vocabulaire scientifique précis et choisir des modes de représentation adaptés (schémas, représentations graphiques, cartes mentales, etc.).<br>◦ citer l'origine des sources utilisées.<br>— 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 naturels, en particulier biologiques ou géologiques, 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, 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.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

## 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 à l'issue de leur formation pendant les deux années de classe préparatoire BCPST. 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

Certaines notions et capacités rappelées ci-dessous sont abordées dès la première année en BCPST1. Elles sont consolidées en seconde année ; leur pleine maîtrise est donc un objectif de fin de seconde année.
Des capacités de mise en œuvre d'une régression linéaire sont introduites spécifiquement en seconde année dans le même esprit que celui qui guide l'introduction du thème de la mesure et des incertitudes en première année. Une attention particulière est portée sur l'analyse des résultats d'une régression linéaire qui ne saurait s'appuyer sur la seule exploitation du coefficient de corrélation ($R^2$). Le recours à la simulation vise à illustrer, sur la base de mesures expérimentales, l'incidence de la variabilité de la mesure d'une grandeur physique sur un ajustement de données expérimentales par régression linéaire.

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| Variabilité de la mesure d'une grandeur physique.<br>Incertitude.<br>Incertitude-type. | Identifier les incertitudes liées, par exemple, à l'opérateur, à l'environnement, aux instruments ou à la méthode de mesure.<br>Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A).<br>Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de type B).<br>Associer un intervalle de confiance à l'écart-type dans l'hypothèse d'une distribution suivant la loi normale. |
| Incertitudes-types composées. | Évaluer, à l'aide d'une relation fournie, l'incertitude-type d'une grandeur qui s'exprime en fonction d'autres grandeurs, dont les incertitudes-types sont connues, par une relation du type somme, différence, produit ou quotient.<br>Comparer entre elles les différentes contributions lors de l'évaluation d'une incertitude-type composée.<br>**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.<br>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.<br>Analyser les résultats obtenus à l'aide d'une procédure de validation : analyse graphique intégrant les barres d'incertitude ou analyse des écarts normalisés.<br>**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. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

# 2 Mesures et capacités expérimentales

Cette partie présente l'ensemble des capacités expérimentales générales que les étudiants doivent avoir acquises en fin de formation. Elle vient prolonger la partie correspondante du programme de physique-chimie de BCPST1, où sont explicitées des capacités qui restent au programme de la seconde année de classe préparatoire BCPST.

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**<br>Acquisition et analyse d'une image numérique. | Acquérir (webcam, appareil photo numérique,...) l'image d'un phénomène physique sous forme numérique, et l'exploiter à l'aide d'un logiciel pour conduire l'étude d'un phénomène. |
| Mesure de longueur à partir d'une photo ou d'une vidéo. | Évaluer, par comparaison à un étalon, une longueur (ou les coordonnées d'une position) sur une image numérique et en estimer la précision. |
| Mesure de volume, masse, pH, conductance et conductivité, pouvoir rotatoire, indice de réfraction, absorbance et transmittance. | Sélectionner et utiliser le matériel adapté à la précision requise.<br>Distinguer les instruments de verrerie In et Ex.<br>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.<br>Utiliser les méthodes et le matériel adéquats pour transférer l'intégralité du solide ou du liquide pesé.<br>Utiliser un appareil de mesure spécifique en s'aidant d'une notice.<br>Étalonner une chaîne de mesure si nécessaire. |
| **Mesures de durées et de fréquences**<br>Fréquence ou période : mesure directe au fréquencemètre numérique à l'oscilloscope ou *via* une carte d'acquisition. | Mettre en œuvre une méthode directe de mesure de fréquence ou de période. |
| Décalage temporel/différence de phase à l'aide d'un oscilloscope numérique. | Reconnaître une avance ou un retard de phase.<br>Convertir un décalage temporel en une différence de phase et inversement.<br>Repérer précisément une différence de phase nulle ou égale à $\pi$ en mode XY. |
| **Mesures électriques**<br>Mesure d'une tension :<br>— mesure directe au voltmètre numérique ou à l'oscilloscope numérique.<br>Mesure de l'intensité d'un courant :<br>— mesure directe à l'ampèremètre numérique ;<br>— mesure indirecte à l'oscilloscope aux bornes d'une résistance adaptée.<br>Mesure d'une résistance ou d'une capacité :<br>— mesure directe à l'ohmmètre/capacimètre ;<br>— mesure indirecte d'une résistance à l'oscilloscope ou au voltmètre sur un diviseur de tension. | Capacités communes à l'ensemble des mesures électriques :<br>— choisir une résolution, un calibre et un nombre de points adaptés à la mesure ;<br>— préciser la perturbation induite par l'appareil de mesure sur un montage et ses limites (bande passante, résistance d'entrée) ;<br>— définir la nature de la mesure effectuée (valeur efficace, valeur moyenne, amplitude, valeur crête à crête, etc.).<br>— gérer, dans un circuit électronique, les contraintes liées à la liaison entre les masses. |
| Caractérisation d'un dipôle quelconque. | Visualiser la caractéristique d'un dipôle à l'aide d'un oscilloscope numérique ou d'une carte d'acquisition. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| | |
|---|---|
| Production d'un signal électrique analogique périodique simple à l'aide d'un GBF. | Obtenir un signal de valeur moyenne, de forme, d'amplitude et de fréquence données. |
| **Mécanique**<br>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**<br>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.<br>Mettre en œuvre un capteur infrarouge.<br>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.<br>Contrôle et régulation de la température du milieu réactionnel.<br>Suivi de l'évolution de la transformation. | Réaliser le ou les montages appropriés et en expliquer le principe et l'intérêt.<br>Choisir ou justifier l'ordre d'introduction des réactifs.<br>Réaliser et réguler une addition au goutte à goutte.<br>Utiliser le moyen de chauffage ou de refroidissement adéquat.<br>Suivre et contrôler l'évolution de la température dans le réacteur.<br>Choisir un moyen approprié pour réguler une éventuelle ébullition.<br>Utiliser un réfrigérant à reflux, contrôler et réguler le reflux.<br>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.<br>Identifier la nature des phases dans une ampoule à décanter.<br>Distinguer extraction et lavage d'une phase.<br>Utiliser un montage de distillation hétéroazéotropique. |
| 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.<br>Choisir et justifier la méthode de filtration adaptée au système étudié. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| | |
|---|---|
| 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.<br>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 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 mesures 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.<br>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.<br>Repérer une température de fusion.<br>Mesure un indice de réfraction.<br>Mesurer un pouvoir rotatoire.<br>Mesurer une absorbance.<br>Déterminer un coefficient d'absorption molaire en spectroscopie UV-visible.<br>Comparer les données tabulées aux valeurs mesurées et interpréter d'éventuels écarts.<br>Comparer les caractéristiques d'une espèce chimique synthétisée avec celles de l'espèce chimique commerciale.<br>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.<br>Déterminer une concentration ou une quantité de matière par spectrophotométrie UV-visible. |
| **Dosages par titrage**<br>Titrages directs, indirects.<br>Équivalence.<br>Titrages simples, successifs, simultanés.<br>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).<br>Proposer ou justifier le protocole d'un titrage à l'aide de données fournies ou à rechercher.<br>Mettre en œuvre un protocole expérimental correspondant à un titrage direct ou indirect.<br>Choisir et utiliser un indicateur coloré de fin de titrage dans le cas d'un titrage acido-basique. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| | |
|---|---|
| Méthodes d'exploitation des courbes expérimentales. | Exploiter une courbe de titrage pour déterminer une valeur expérimentale d'une constante thermodynamique d'équilibre.<br>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**<br>Suivi en continu de l'évolution temporelle d'une grandeur physique.<br>Limitation de l'évolution temporelle (trempe) d'un système par dilution, transformation chimique ou refroidissement.<br>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.<br>Exploiter les résultats d'un suivi temporel de concentration pour déterminer les caractéristiques cinétiques d'une réaction.<br>Proposer et mettre en œuvre des conditions expérimentales permettant la simplification de la loi de vitesse.<br>Déterminer la valeur d'une énergie d'activation. |

## 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**<br>Règles de sécurité au laboratoire. | Adopter une attitude responsable et adaptée au travail en laboratoire.<br>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.<br>Classes et catégories de danger.<br>Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques.<br>Mentions de danger (H), conseils de prudence (P).<br>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**<br>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.<br>Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

## Deuxième partie

# Contenus thématiques

**Thème E – énergie : conversions et transferts** 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

**Thème C – constitution et transformations de la matière** 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

**Thème M – mouvements et interactions** 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

**Thème S – ondes et signaux** 20
S.4 Filtrage linéaire d'un signal . . . 20
S.5 Interaction lumière-matière . . . 21

**Thème T – phénomènes de transport** 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.<br>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.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| Enthalpie libre.<br><br>Identité thermodynamique pour la fonction d'état $G$.<br>Potentiel chimique. | Relier la variation de l'enthalpie libre et la création d'entropie lors d'une transformation spontanée à $T$ et $P$ constantes.<br>Établir un critère d'évolution et un critère d'équilibre pour une transformation à $T$ et $P$ constantes en termes d'enthalpie libre.<br>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.<br>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 :<br>— des gaz parfaits : $\mu_i(T,P_i) = \mu_i^\circ(T) + RT\ln\left(\frac{P_i}{P^\circ}\right)$ ;<br>— des constituants en mélange idéal en phase condensée : $\mu_i(T,P,x_i) = \mu_i^{\text{réf}}(T,P) + RT\ln(x_i)$ ;<br>— 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.<br>Exprimer et utiliser le potentiel chimique d'un constituant dans un mélange idéal et dans une solution diluée.<br>Déterminer la variation d'enthalpie libre d'un système physico-chimique entre deux états d'équilibre thermodynamique.<br>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.<br>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.<br>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.<br>État standard.<br>Enthalpie standard de réaction et entropie standard de réaction.<br>Enthalpie standard de formation, état standard de référence d'un élément, entropie molaire standard absolue.<br>Loi de Hess. | Déterminer l'enthalpie standard et l'entropie standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques.<br>Interpréter le signe de l'enthalpie standard de réaction.<br>Prévoir le signe de l'entropie standard de réaction. |
| Effets thermiques en réacteur monobare :<br>— transfert thermique associé à une transformation chimique en réacteur monobare isotherme ;<br>— 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. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| | |
|---|---|
| Enthalpie libre de réaction : expression en fonction des potentiels chimiques.<br>Critère d'évolution, critère d'équilibre dans le cas d'un système chimique dont l'évolution spontanée est modélisée par une seule réaction à $T$ et $P$ constantes.<br>Enthalpie libre standard de réaction, constante thermodynamique d'équilibre et relation de van't Hoff dans le cadre de l'approximation d'Ellingham. | Relier l'enthalpie libre de réaction à la constante thermodynamique d'équilibre et au quotient de réaction.<br>Prévoir le sens d'évolution d'un système chimique.<br>Calculer la constante thermodynamique d'équilibre à partir de grandeurs standard de réaction.<br>Modéliser l'évolution de la constante thermodynamique d'équilibre avec la température dans le cadre de l'approximation d'Ellingham.<br>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. |
| Nombre de degrés de liberté d'un système physico-chimique à l'équilibre ; variance.<br><br>Perturbation d'un système à l'équilibre chimique. | Reconnaître si une grandeur intensive est ou non un facteur d'équilibre.<br>Dénombrer les degrés de liberté d'un système à l'équilibre et interpréter le résultat.<br>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. |
| | **Déterminer une grandeur standard de réaction.** |

### 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 |
|---|---|
| Caractérisation d'un mélange binaire.<br><br>Miscibilité totale ou nulle. | Convertir des fractions molaires en fractions massiques dans le cas de systèmes binaires et inversement.<br>Citer les facteurs d'influence de la miscibilité : interactions entre entités chimiques, température. |
| Diagrammes de phases solide-liquide isobares :<br>— avec miscibilité totale à l'état solide,<br>— avec miscibilité nulle à l'état solide, avec ou sans composé défini à fusion congruente ; eutectique. | Exploiter un faisceau de courbes d'analyse thermique pour établir l'allure d'un diagramme de phases solide-liquide isobare.<br>Attribuer les différentes zones du diagramme.<br>Exploiter un diagramme de phases isobare pour décrire l'évolution d'un système lors d'une variation de température.<br>Calculer et commenter la valeur de la variance en un point du diagramme.<br>Décrire les caractéristiques des mélanges indifférents, eutectiques et des composés définis. |
| Théorème des moments chimiques.<br><br>Cristallisation fractionnée. | Déterminer la ou les phases en présence et leur composition en un point donné d'un diagramme de phases solide-liquide isobare.<br>Interpréter une cristallisation fractionnée à l'aide de diagrammes de phases solide-liquide isobares.<br>Effectuer un bilan de matière pour une cristallisation fractionnée. |

## 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

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

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.<br>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.<br>Identifier la nature des actes élémentaires dans un mécanisme en chaîne.<br>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.<br>Écrire les équations des actes élémentaires d'un cycle catalytique fourni.<br>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.<br><br>Traitement cinétique d'un mécanisme : approximation de l'étape cinétiquement déterminante, approximation du pré-équilibre rapide, approximation de l'état quasi-stationnaire. | **Capacité numérique :** 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.<br>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.<br>Établir une loi de vitesse à partir d'un mécanisme réactionnel et la confronter à la loi de vitesse obtenue expérimentalement.<br>**Établir la loi de vitesse d'une réaction pour tester un mécanisme réactionnel.** |
| 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.<br>**Capacité numérique :** 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. | Extraire la valeur d'une constante thermodynamique d'équilibre à partir d'un diagramme de prédominance ou d'existence.<br>Extraire les données thermodynamiques pertinentes de tables pour étudier un système en solution aqueuse.<br>Utiliser des diagrammes de prédominance, d'existence ou potentiel-pH pour identifier des espèces incompatibles ou prévoir la nature des espèces majoritaires.<br>Écrire l'équation de la réaction modélisant une transformation en solution aqueuse et déterminer la valeur de sa constante thermodynamique d'équilibre.<br>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.<br>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.<br>Confronter les prévisions thermodynamiques à des données expérimentales et interpréter d'éventuels écarts en termes cinétiques ou de modélisation inappropriée. |
| **Transformations modélisées par des réactions d'oxydo-réduction**<br>Enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard d'oxydo-réduction des couples impliqués. | Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple oxydant-réducteur à partir de données thermodynamiques (constantes thermodynamiques d'équilibre, potentiels standard). |
| **Diagrammes potentiel-pH**<br>Lecture et exploitation des diagrammes potentiel-pH.<br>Diagramme potentiel-pH de l'eau. | Attribuer les différents domaines d'un diagramme potentiel-pH fourni à des espèces chimiques données.<br>Prévoir une éventuelle dismutation ou médiamutation en fonction du pH du milieu. |
| **Transformations modélisées par des réactions de complexation-décomplexation**<br>Atome ou ion central, ligand, modélisation de la liaison entité chimique centrale-ligand par recouvrement $\sigma$ entre orbitales, complexe, indice de coordination.<br>Constante de formation globale d'un complexe.<br>Réaction d'échange de ligands : relation entre structure et propriétés du ligand, effet chélate, influence de la proportion relative de ligands.<br>Influence de la complexation sur les propriétés d'oxydo-réduction. | Relier qualitativement la liaison entité chimique centrale-ligand à la notion de recouvrement d'orbitales.<br>Citer des exemples de complexes intervenant dans le domaine des sciences du vivant pour le transport de ligand et l'activation d'un ligand.<br>Justifier par un argument entropique l'origine de l'effet chélate.<br>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.<br>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. |
| **Transformations modélisées par des réactions de précipitation-solubilisation** | |

| | |
|---|---|
| Mise en solution d'un solide ionique : produit de solubilité.<br>Condition de précipitation d'un solide ionique : diagramme d'existence.<br>Solubilité et paramètres d'influence de la solubilité : température, effet d'ion commun, pH, complexation. | Citer des exemples de précipités intervenant dans le domaine de la géologie.<br>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.<br>Prévoir qualitativement l'évolution de la solubilité suite à l'introduction d'un ion commun ou d'un ligand.<br>Justifier qualitativement l'allure et exploiter une courbe de solubilité en fonction du pH.<br>**Capacité numérique :** à l'aide d'un langage de programmation, déterminer les conditions optimales pour séparer deux ions par précipitation sélective. |
| | **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.** |

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

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

#### Activation du caractère électrophile

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

#### Activation du caractère nucléophile

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

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

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

### 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 |
|---|---|
| **Protection-déprotection**<br>Protection-déprotection du groupe carbonyle ou d'un diol par acétalisation ; conditions expérimentales.<br>Protection-déprotection du groupe hydroxyle : synthèse et hydrolyse d'esters, synthèse d'éther-oxydes.<br>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.<br>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**<br>Modifications de groupes caractéristiques et de chaînes carbonées.<br>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.<br>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.<br>Concevoir une stratégie de synthèse simple en tenant compte des impacts environnementaux. |

# 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.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

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

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

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

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

## 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. | 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.<br>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.<br>Interpréter qualitativement le rôle d'un tensioactif. |

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

## 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 |
|---|---|
| **Description d'un fluide en écoulement**<br>Particule de fluide. Champ eulérien des vitesses.<br>Ligne de courant, tube de courant.<br>Écoulement stationnaire. | Décrire, en utilisant le vocabulaire adapté, l'écoulement d'un fluide.<br>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.<br>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. |
| **Actions mécaniques dans un fluide en écoulement**<br>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 $\mathrm{d}\vec{F} = \eta \dfrac{\mathrm{d}v_x(y)}{\mathrm{d}y} \mathrm{d}S\,\vec{e}_x$.<br>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.<br>**Capacité numérique :** 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. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

### M.6.2 Dynamique des fluides

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| **Écoulement parfait et stationnaire d'un fluide** | |
| Relation de Bernoulli sous la forme $\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 \pm gz = \text{cste}$. | Exploiter la relation de Bernoulli, en procédant, le cas échéant, à la simplification de termes négligeables. |
| Effet Venturi. Application à la mesure d'un débit de volume.<br><br>Tube de Pitot. Application à la mesure d'une vitesse d'écoulement. | Décrire le principe de l'effet Venturi.<br>Établir la relation donnant le débit de volume dans un tube de Venturi.<br>Décrire le principe du tube de Pitot.<br>Établir la relation donnant la vitesse d'écoulement du fluide. |
| **Modèles d'écoulements unidirectionnels de cisaillement, laminaires, parallèles et stationnaires de fluides réels** | |
| 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. | Associer un système fermé à un système ouvert pour établir le bilan de quantité de mouvement.<br>Établir et exploiter le bilan de quantité de mouvement. |
| 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.<br>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. |
| Écoulement de Poiseuille.<br><br>Loi de Poiseuille.<br>Résistance hydraulique. Associations en série et en parallèle de deux résistances hydrauliques. | 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.<br>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.<br>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.<br>Modéliser une association série ou parallèle de résistances hydrauliques par une résistance hydraulique équivalente. |
| **Écoulement d'un fluide réel à travers un milieu poreux** | |
| Porosité. Perméabilité.<br><br>Loi de Darcy. Pression motrice. | Définir la porosité d'un milieu.<br>Établir le lien entre porosité et perméabilité d'un milieu pour le modèle simplifié de tubes capillaires parallèles.<br>Exploiter la loi de Darcy énoncée avec la pression motrice.<br>**Mesurer la porosité ou la perméabilité d'un milieu poreux.** |

# 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.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| 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.<br>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.<br>Exploiter une courbe de réponse en gain ou en phase associée à une fonction de transfert harmonique d'ordre quelconque.<br>**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.** |

### 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.<br><br>Existence de différentes voies de désexcitation radiatives et non radiatives, durée de vie de l'état excité.<br>Espèce chimique fluorophore, fluorescence, déplacement de Stokes, coefficient d'absorption molaire et rendement quantique de fluorescence. | Associer un domaine spectral de rayonnement électromagnétique à la nature d'une transition entre niveaux d'énergie électroniques ou vibrationnels.<br>Interpréter la différence d'énergie entre photons absorbés et photons émis.<br>Identifier, par comparaison, un spectre d'absorption et un spectre d'émission d'une espèce chimique fluorophore.<br>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-

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

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 |
|---|---|
| **Modèle phénoménologique de la conduction thermique**<br>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.<br>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).<br><br>Citer l'ordre de grandeur de la conductivité thermique de l'air, de l'eau et d'un métal, à température et pression ambiantes. |
| Coefficient de diffusivité thermique.<br><br>Loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le 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.<br>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.<br>Exploiter la conservation du flux thermique en régime stationnaire et en l'absence de sources internes. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

# 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**
   - Oscilloscope numérique
   - Carte d'acquisition et logiciel dédié
   - Générateur de signaux basse fréquence
   - Multimètre numérique
   - Microcontrôleur
   - Dynamomètre
   - Accéléromètre
   - Webcam avec logiciel dédié
   - Appareil photo numérique ou caméra numérique
   - Thermomètre ou thermocouple
   - 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, matériel de distillation hétéroazéotropique
   - 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

# 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. Le tableau ci-dessous recense non seulement les outils mathématiques et les capacités exigibles du programme de BCPST1, dont l'acquisition est consolidée en seconde année, mais aussi des capacités supplémentaires introduites en classe de seconde année BCPST2.
Comme en première année, 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.<br>Donner l'expression analytique des solutions dans le seul cas où $n = p = 2$. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| | |
|---|---|
| Équations non linéaires. | Représenter graphiquement une équation de la forme $f(x) = g(x)$.<br>Interpréter graphiquement la ou les solutions. |
| **Équations différentielles** | |
| Équations différentielles à coefficients constants | Identifier l'ordre.<br>Mettre une équation différentielle du premier ou du second ordre sous forme canonique. |
| Équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants de la forme : $y' + ay = b$. | Trouver la solution de l'équation sans second membre (équation homogène).<br>Déterminer une solution particulière de l'équation compte tenu du second membre.<br>Trouver la solution de l'équation correspondant à des conditions initales données. |
| Équation différentielle linéaire du deuxième ordre à coefficients constants de la forme : $y'' + ay' + by = 0$.<br><br>Équation différentielle linéaire du deuxième ordre à coefficients constants de la forme : $y'' + ay = A\cos(\omega t + \varphi)$. | Utiliser l'équation caractéristique pour trouver la solution générale de l'équation.<br>Prévoir le caractère borné ou non de ses solutions (critère de stabilité).<br>Trouver l'expression de la solution compte tenu de conditions initiales données.<br>Représenter graphiquement cette solution.<br>Prévoir le caractère borné ou non de ses solutions (critère de stabilité).<br>Trouver l'expression de la solution en régime établi (solution particulière).<br>Trouver l'expression de la solution de l'équation complète, compte tenu de conditions initiales données. |
| Autres équations différentielles du premier ou du second ordre. | Obtenir une intégrale première d'une équation de Newton $x'' = f(x)$ et l'exploiter graphiquement.<br>Séparer les variables d'une équation du premier ordre à variables séparables.<br>Faire le lien entre les conditions initiales et la représentation graphique de la solution correspondante. |
| **Fonctions** | |
| Fonctions usuelles. | Exponentielle, logarithme népérien et décimal, cosinus, sinus, tangente, puissance réelle ($x \mapsto x^\alpha$). |
| Dérivée. Notation $\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$. | |
| Développements limités. | Utiliser la formule de Taylor à l'ordre un ou deux ; interpréter graphiquement.<br>Connaître et utiliser les développements limités à l'ordre 1 des fonctions $(1+x)^\alpha$, $\exp(x)$, $\ln(1+x)$ au voisinage de $x = 0$ et à l'ordre 2 des fonctions $\cos(x)$ et $\sin(x)$ au voisinage de $x = 0$. |
| Primitive et intégrale. | Interpréter l'intégrale comme une somme de contributions infinitésimales, en lien avec la méthode des rectangles en mathématiques. |
| Valeur moyenne. | Exprimer la valeur moyenne sous forme d'une intégrale.<br>Connaître la valeur moyenne sur une période des fonctions cos, sin, $\cos^2$ et $\sin^2$. |
| Représentation graphique d'une fonction. | Déterminer un comportement asymptotique ; rechercher un extremum local.<br>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.<br>Utiliser le système des coordonnées cartésiennes. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| | |
|---|---|
| Projection d'un vecteur et produit scalaire. | Interpréter géométriquement le produit scalaire et connaître son expression en fonction des coordonnées dans une base orthonormée.<br>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.<br>Utiliser leur effet sur l'orientation de l'espace. |
| Courbes planes. | Reconnaître l'équation cartésienne d'une droite, 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.<br>Citer les formules d'addition et de duplication des cosinus et sinus ; utiliser un formulaire dans les autres cas. |
| Nombres complexes et représentation dans le plan. Somme et produit de nombres complexes. | Calculer et interpréter géométriquement la partie réelle, la partie imaginaire, le module et l'argument d'un nombre complexe. |

# 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 recense les outils ainsi que les capacités exigibles introduits en première année BCPST1 et complétés pour la seconde année BCPST2. 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 `matplotlib` 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 `matplotlib` pour tracer la courbe représentative d'une fonction et rendre le graphe exploitable (présence d'une légende, choix des échelles...). |
| **Équations algébriques** | |
| Résolution d'une équation algébrique ou d'une équation transcendante : méthode dichotomique. | Déterminer, en s'appuyant sur une représentation graphique, un intervalle adapté à la recherche numérique d'une racine par une méthode dichotomique.<br>Utiliser la fonction `bisect` de la bibliothèque `scipy.optimize` (sa spécification étant fournie). |
| **Équations différentielles** | |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr

| | |
|---|---|
| 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.<br>Utiliser la fonction `odeint` de la bibliothèque `scipy.integrate` (sa spécification étant fournie). |
| **Statistiques** | |
| Régression linéaire. | Utiliser la fonction `polyfit` de la bibliothèque `numpy` (sa spécification étant fournie) pour exploiter des données.<br>Utiliser les fonctions de base du module `random` de la bibliothèque `numpy` (sa spécification étant fournie) pour simuler un processus aléatoire. |

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021
http://enseignementsup-recherche.gouv.fr