



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

Direction générale
pour l'enseignement
supérieur et
l'insertion
professionnelle

Service de la stratégie
de l'enseignement
supérieur et de
l'insertion
professionnelle

Département de
l'architecture et de la
qualité des formations
de niveau licence

NOTE DE PRÉSENTATION

Les présents arrêtés, au nombre de huit, vous sont soumis pour visa avant présentation devant les instances consultatives.

Ils s'inscrivent dans la seconde phase du chantier de rénovation des programmes des classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE) de la filière scientifique, phase consacrée aux programmes de seconde année.

Cependant, l'écriture des nouveaux programmes de seconde année d'informatique et de langues vivantes étrangères, ainsi que de sciences industrielles de l'ingénieur (SII), pour les voies MP, PC, PT, PSI et TSI, ayant pu être menée à bien en même temps que celle des programmes de première année, cette seconde phase ne concerne plus, en fait, que les programmes de mathématiques, de physique et de chimie pour les voies MP, PC, PT, PSI, TPC et TSI, et que ceux de mathématiques, de physique, de chimie et de sciences de la vie et de la terre (SVT) pour les voies BCPST et TB (pour cette dernière voie, un enseignement de biotechnologies étant, en outre, adjoint à celui de SVT). On notera que, pour des raisons de cohérence scientifique, les programmes des deux années de SVT, pour la voie BCPST, et de SVT et biotechnologies, pour la voie TB, n'ont pas été scindés et font l'objet d'une publication globale, la présente version des programmes de première année annulant et remplaçant, sans la modifier, celle publiée dans les arrêtés du 4 avril 2013.

Ces programmes de seconde année ont été élaborés selon les mêmes principes et les mêmes modalités que les programmes de la filière scientifique publiés au printemps dernier. Du 20 mai au 30 juin 2013, ils ont fait l'objet d'une consultation publique en ligne, sur le site du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche. Les 233 commentaires recueillis ont donné lieu à des corrections et ajustements.

Ces programmes entrent en vigueur à la rentrée 2013 pour ceux qui concernent la première année de CPGE, et à la rentrée 2014 pour ceux qui concernent la seconde année.

Les présents arrêtés n'affectent en rien les volumes horaires des enseignements concernés.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'enseignement supérieur et
de la recherche

Arrêté du 2013

**relatif aux programmes de seconde année de mathématiques, de physique et de chimie de la
classe préparatoire scientifique technologie, physique et chimie (TPC)**

NOR ESRS A

Le ministre de l'éducation nationale et la ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche,

Vu le code de l'éducation, et notamment ses articles D. 612-19 à D. 612-29 ;
Vu l'arrêté du 10 février 1995 modifié, définissant la nature des classes composant les classes préparatoires scientifiques aux grandes écoles ;
Vu l'arrêté du 20 juin 1996 modifié, définissant les objectifs de formation et le programme de la classe préparatoire de seconde année de technologie, physique et chimie (TPC) ;
Vu l'avis du Conseil national de l'enseignement supérieur et de la recherche en date du 2013 ;
Vu l'avis du Conseil supérieur de l'éducation en date du 2013,

Arrêtent :

Article 1^{er}

Les programmes de seconde année de mathématiques, de physique et technologie physique, et de chimie et technologie chimique, de la classe préparatoire scientifique technologie, physique et chimie (TPC), figurant respectivement aux annexes 1, 2 et 3 de l'arrêté du 20 juin 1996 modifié susvisé, sont remplacés par les programmes figurant respectivement aux annexes 1, 2 et 3 du présent arrêté.

Article 2

Les programmes du présent arrêté entrent en vigueur à compter de la rentrée universitaire 2014.

Article 3

Le directeur général de l'enseignement scolaire et la directrice générale pour l'enseignement supérieur et l'insertion professionnelle sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent arrêté, qui sera publié au *Journal officiel* de la République française.

Fait le

2013

Pour le ministre de l'éducation nationale et par
délégation :
Le directeur général de l'enseignement scolaire,
J.-P. DELAHAYE

Pour la ministre de l'enseignement supérieur et
de la recherche et par délégation :
Par empêchement de la directrice générale pour
l'enseignement supérieur et l'insertion
professionnelle,
J.- M. JOLION

NB : Le présent arrêté et ses annexes seront consultables au *Bulletin officiel* du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche et au *Bulletin officiel* du ministère de l'éducation nationale du mis en ligne sur les sites www.enseignementsup-recherche.gouv.fr et www.education.gouv.fr

ANNEXE 1

Classe préparatoire TPC deuxième année

Projet de programme de mathématiques

Table des matières

Objectifs de formation	2
Description et prise en compte des compétences	2
Unité de la formation scientifique	3
Architecture et contenu du programme	3
Organisation du texte	4
Usage de la liberté pédagogique	5
Programme	6
Compléments d'algèbre linéaire	6
Déterminants	7
Réduction d'endomorphismes	8
Fonctions vectorielles et courbes paramétrées	9
Intégration d'une fonction continue sur un intervalle	10
Séries numériques	11
Séries entières d'une variable réelle ou complexe	12
Probabilités	13
A - Probabilité sur un univers dénombrable	13
B - Variables aléatoires	14
Espaces préhilbertiens réels, espaces euclidiens	16
A - Structure préhilbertienne	16
B - Isométries d'un espace euclidien	17
Séries de Fourier	18
Équations différentielles	19
Fonctions de plusieurs variables	20

Le programme de mathématiques de TPC2, dans le prolongement de celui de TPC1, s'inscrit entre deux continuités : en amont avec les programmes rénovés du lycée, en aval avec les enseignements dispensés dans les grandes écoles, et plus généralement les poursuites d'études universitaires. Il est conçu pour amener progressivement tous les étudiants au niveau requis pour poursuivre avec succès un cursus d'ingénieur, de chercheur, d'enseignant, de scientifique, et aussi pour leur permettre de se former tout au long de la vie.

Objectifs de formation

Les étudiants des classes préparatoires doivent acquérir les compétences nécessaires aux scientifiques et technologues, qu'ils soient ingénieurs, chercheurs, enseignants, pour identifier les situations auxquelles ils sont confrontés, dégager les meilleures stratégies pour y faire face, prendre avec un recul suffisant des décisions dans un contexte complexe. Dans ce cadre, la formation mathématique vise le développement des compétences générales suivantes :

- **s'engager dans une recherche, mettre en œuvre des stratégies** : découvrir une problématique, l'analyser, la transformer ou la simplifier, expérimenter sur des exemples, formuler des hypothèses, identifier des particularités ou des analogies ;
- **modéliser** : extraire un problème de son contexte pour le traduire en langage mathématique, comparer un modèle à la réalité, le valider, le critiquer ;
- **représenter** : choisir le cadre (numérique, algébrique, géométrique ...) le mieux adapté pour traiter un problème ou représenter un objet mathématique, passer d'un mode de représentation à un autre, changer de registre ;
- **raisonner, argumenter** : effectuer des inférences inductives et déductives, conduire une démonstration, confirmer ou infirmer une conjecture ;
- **calculer, utiliser le langage symbolique** : manipuler des expressions contenant des symboles, organiser les différentes étapes d'un calcul complexe, effectuer un calcul automatisable, à la main ou à l'aide d'un instrument (calculatrice, logiciel...), contrôler les résultats ;
- **communiquer à l'écrit et à l'oral** : comprendre les énoncés mathématiques écrits par d'autres, rédiger une solution rigoureuse, présenter et défendre un travail mathématique.

Description et prise en compte des compétences

S'engager dans une recherche, mettre en œuvre des stratégies

Cette compétence vise à développer les attitudes de questionnement et de recherche, au travers de réelles activités mathématiques, prenant place au sein ou en dehors de la classe. Les différents temps d'enseignement (cours, travaux dirigés, heures d'interrogation) doivent privilégier la découverte et l'exploitation de problématiques, la réflexion sur les démarches suivies, les hypothèses formulées et les méthodes de résolution. Le professeur ne saurait limiter son enseignement à un cours dogmatique : afin de développer les capacités d'autonomie des étudiants, il doit les amener à se poser eux-mêmes des questions, à prendre en compte une problématique mathématique, à utiliser des outils logiciels, et à s'appuyer sur la recherche et l'exploitation, individuelle ou en équipe, de documents.

Les travaux proposés aux étudiants en dehors des temps d'enseignement doivent combiner la résolution d'exercices d'entraînement relevant de techniques bien répertoriées et l'étude de questions plus complexes. Posées sous forme de problèmes ouverts, elles alimentent un travail de recherche individuel ou collectif, nécessitant la mobilisation d'un large éventail de connaissances et de capacités.

Modéliser

Le programme présente des notions, méthodes et outils mathématiques permettant de modéliser l'état et l'évolution de systèmes déterministes ou aléatoires issus de la rencontre du réel et du contexte, et éventuellement du traitement qui en a été fait par la mécanique, la physique, la chimie, les sciences de l'ingénieur. Ces interprétations viennent en retour éclairer les concepts fondamentaux de l'analyse, de l'algèbre linéaire, de la géométrie ou des probabilités. La modélisation contribue ainsi de façon essentielle à l'unité de la formation scientifique et valide les approches interdisciplinaires. À cet effet, il importe de promouvoir l'étude de questions mettant en œuvre des interactions entre les différents champs de connaissance scientifique (mathématiques et physique, mathématiques et chimie, mathématiques et informatique).

Représenter

Un objet mathématique se prête en général à des représentations issues de différents cadres ou registres : algébrique, géométrique, graphique, numérique. Élaborer une représentation, changer de cadre, traduire des informations dans plusieurs registres sont des composantes de cette compétence. Ainsi, en analyse, le concept de fonction s'appréhende à travers diverses représentations (graphique, numérique, formelle) ; en algèbre, un problème linéaire se prête à des représentations de nature géométrique, matricielle ou algébrique ; un problème de probabilités peut recourir à un arbre, un tableau, des ensembles. Le recours régulier à des figures ou à des croquis permet de développer une vision géométrique des objets abstraits et favorise de fructueux transferts d'intuition.

Raisonner, argumenter

La pratique du raisonnement est au cœur de l'activité mathématique. Basé sur l'élaboration de liens déductifs ou inductifs entre différents éléments, le raisonnement mathématique permet de produire une démonstration, qui en est la forme aboutie et communicable. La présentation d'une démonstration par le professeur (ou dans un document) permet aux étudiants de suivre et d'évaluer l'enchaînement des arguments qui la composent ; la pratique de la démonstration leur apprend à créer et à exprimer eux-mêmes de tels arguments. L'intérêt de la construction d'un objet mathématique ou de la démonstration d'un théorème repose sur ce qu'elles apportent à la compréhension même de l'objet ou du théorème : préciser une perception intuitive, analyser la portée des hypothèses, éclairer une situation, exploiter et réinvestir des concepts et des résultats théoriques.

Calculer, manipuler des symboles, maîtriser le formalisme mathématique

Le calcul et la manipulation des symboles sont omniprésents dans les pratiques mathématiques. Ils en sont des composantes essentielles, inséparables des raisonnements qui les guident ou qu'en sens inverse ils outillent. Mener efficacement un calcul simple fait partie des compétences attendues des étudiants. En revanche, les situations dont la gestion manuelle ne relèverait que de la technicité seront traitées à l'aide d'outils de calcul formel ou numérique. La maîtrise des méthodes de calcul figurant au programme nécessite aussi la connaissance de leur cadre d'application, l'anticipation et le contrôle des résultats qu'elles permettent d'obtenir.

Communiquer à l'écrit et à l'oral

La phase de mise au point d'un raisonnement et de rédaction d'une solution permet de développer les capacités d'expression. La qualité de la rédaction et de la présentation, la clarté et la précision des raisonnements, constituent des objectifs très importants. La qualité de structuration des échanges entre le professeur et sa classe, entre le professeur et chacun de ses étudiants, entre les étudiants eux-mêmes, doit également contribuer à développer des capacités de communication (écoute et expression orale) à travers la formulation d'une question, d'une réponse, d'une idée, d'hypothèses, l'argumentation de solutions ou l'exposé de démonstrations. Les travaux individuels ou en petits groupes proposés aux étudiants en dehors du temps d'enseignement, au lycée ou à la maison, (interrogations orales, devoirs libres, comptes rendus de travaux dirigés ou d'interrogations orales) contribuent fortement à développer cette compétence. La communication utilise des moyens diversifiés : les étudiants doivent être capables de présenter un travail clair et soigné, à l'écrit ou à l'oral, au tableau ou à l'aide d'un dispositif de projection.

L'intégration des compétences à la formation des étudiants permet à chacun d'eux de gérer ses propres apprentissages de manière responsable en repérant ses points forts et ses points faibles, et en suivant leur évolution. Les compétences se recouvrent largement et il importe de les considérer globalement : leur acquisition doit se faire dans le cadre de situations suffisamment riches pour nécessiter la mobilisation de plusieurs d'entre elles.

Unité de la formation scientifique

Il est important de mettre en valeur l'interaction entre les différentes parties du programme, tant au niveau du cours que des thèmes des travaux proposés aux étudiants. À titre d'exemples, la géométrie apparaît comme un champ d'utilisation des concepts développés en algèbre linéaire et en analyse ; les équations différentielles sont au cœur des activités de modélisation pour les sciences physiques et les sciences industrielles ; les probabilités permettent d'illustrer certains résultats d'analyse et justifient l'introduction du vocabulaire ensembliste.

C'est ainsi que le programme valorise les interprétations des concepts de l'analyse, de l'algèbre linéaire, de la géométrie et des probabilités en termes de paramètres modélisant l'état et l'évolution de systèmes mécaniques, physiques, chimiques ou industriels (mouvement, vitesse et accélération, signaux continus ou discrets, mesure des grandeurs mécaniques ou physiques...).

La coopération des enseignants d'une même classe ou d'une même discipline et, plus largement, celle de l'ensemble des enseignants d'un cursus donné, doit contribuer de façon efficace et cohérente à la qualité de ces interactions, notamment dans le cadre des travaux d'initiative personnelle encadrés. **Les professeurs de mathématiques doivent régulièrement accéder aux laboratoires** afin de favoriser l'établissement de liens forts entre la formation mathématique et les formations dispensées dans les enseignements scientifiques et technologiques. Cet accès permet de :

- prendre appui sur les situations expérimentales rencontrées dans ces enseignements ;
- connaître les logiciels utilisés et l'exploitation qui peut en être faite pour illustrer les concepts mathématiques ;
- prendre en compte les besoins mathématiques des autres disciplines.

Il importe aussi que le contenu culturel et historique des mathématiques ne soit pas sacrifié au profit de la seule technicité. En particulier, il peut s'avérer pertinent d'analyser l'interaction entre un contexte historique et social donné, une problématique spécifique et la construction, pour la résoudre, d'outils mathématiques.

Architecture et contenu du programme

Le programme s'en tient à un cadre et à un vocabulaire théorique bien délimités, mais suffisamment efficaces pour l'étude de situations usuelles, et assez riches pour servir de support à une formation solide.

Il a été conçu pour s'adapter aux intentions de la réforme de la série STL. Les étudiants de cette série ont désormais pour vocation d'entrer dans un cycle long de formation supérieure : le programme de mathématiques se doit d'être d'une ambition réaliste. Les grands équilibres du programme n'ont pas été modifiés. C'est ainsi que les deux grands axes « Analyse et géométrie » et « Algèbre et géométrie » demeurent présents. S'y ajoute un enseignement de probabilités visant à prolonger les notions figurant dans le programme de TPC1 et à préparer celles qui seront ultérieurement introduites dans les grandes écoles. Les probabilités permettent de développer des aptitudes au raisonnement et à la modélisation, d'établir des ponts avec les autres disciplines, et d'enrichir les thèmes susceptibles d'être abordés lors du TIPE.

La géométrie, en tant qu'outil de modélisation et de représentation, est intégrée à l'ensemble du programme, qui préconise le recours à des figures pour aborder l'algèbre linéaire et préhilbertienne, les fonctions à valeurs dans \mathbb{R}^2 ou \mathbb{R}^3 , et le calcul différentiel.

Le programme d'algèbre comprend deux volets. Le premier prolonge l'étude de l'algèbre linéaire abordée en première année, introduit la notion de déterminant et aboutit à la théorie de la réduction dont il développe quelques applications. Le second, consacré à l'algèbre euclidienne, met l'accent sur les relations entre les points de vue matriciel et géométrique, notamment à travers l'étude des isométries vectorielles en dimensions deux et trois. La réduction des matrices symétriques réelles permet de faire le lien entre ces deux volets.

Le programme d'analyse est introduit par l'étude des fonctions vectorielles d'une variable réelle qui s'attache à relier les registres analytique et géométrique en développant l'étude affine des arcs paramétrés.

L'étude de l'intégration, entamée en première année dans le cadre des fonctions continues sur un segment, se poursuit dans celui des fonctions continues sur un intervalle quelconque.

Le chapitre relatif aux séries numériques a pour objectif la détermination de la nature d'une série par comparaison avec les séries de référence et se limite au cas de la convergence absolue. Il constitue une introduction à l'étude des séries entières et des séries de Fourier. En étroite articulation avec les concepts propres aux sciences physiques, le chapitre sur les séries de Fourier valorise les interprétations en termes de signaux.

L'étude des équations et des systèmes différentiels est limitée au cas linéaire, dont les interventions sont fréquentes tant en mathématiques que dans les autres disciplines scientifiques. L'utilisation dans ce cadre du théorème de Cauchy permet d'établir la structure de l'ensemble des solutions, illustrant la pertinence des outils de l'algèbre linéaire pour résoudre des problèmes d'origine analytique. Le cas particulier où les coefficients sont constants permet de mettre en œuvre des techniques de réduction matricielle. Dans le cas des équations différentielles d'ordre deux à coefficients continus, la recherche de solutions sous la forme de sommes de séries entières établit un lien entre deux parties importantes du programme d'analyse.

Le chapitre relatif au calcul différentiel à plusieurs variables est limité au cas des fonctions numériques de deux ou trois variables réelles. Il fournit des méthodes et des outils opérationnels pour résoudre des problèmes pouvant être issus d'autres disciplines scientifiques (recherche d'extremums, équations aux dérivées partielles). Il comporte un paragraphe présentant les premières notions de géométrie différentielle et favorise ainsi les interprétations et visualisations géométriques.

L'enseignement des probabilités consolide et complète l'étude traitée en première année sur un univers fini et aborde le cadre d'un univers dénombrable. Son objectif majeur est l'étude des variables aléatoires discrètes, en prolongement des variables finies, ce qui permet d'élargir aux processus stochastiques à temps discret le champ des situations réelles se prêtant à une modélisation probabiliste.

Organisation du texte

Les programmes définissent les objectifs de l'enseignement et décrivent les connaissances et les capacités exigibles des étudiants ; ils précisent aussi certains points de terminologie et certaines notations. Ils fixent clairement les limites à respecter tant au niveau de l'enseignement que des épreuves d'évaluation, y compris par les opérateurs de concours. Le programme est décliné en chapitres. Chaque chapitre comporte un bandeau définissant les objectifs essentiels et délimitant le cadre d'étude des notions qui lui sont relatives et un texte présenté en deux colonnes : à gauche figurent les contenus du programme (connaissances et méthodes) ; à droite un commentaire indique les capacités exigibles des étudiants, précise quelques notations ainsi que le sens ou les limites à donner à certaines questions. Dans le cadre de sa liberté pédagogique et dans le respect de la cohérence de la formation globale, le professeur décide de l'organisation de son enseignement et du choix de ses méthodes.

En particulier, l'ordre de présentation des différents chapitres ne doit pas être interprété comme un modèle de progression. Parmi les connaissances (définitions, notations, énoncés, démonstrations, méthodes, algorithmes...) et les capacités de mobilisation de ces connaissances, le texte du programme délimite trois catégories :

- celles qui sont exigibles des étudiants : il s'agit de l'ensemble des points figurant dans la colonne de gauche des différents chapitres ;
- celles qui sont indiquées dans les bandeaux et la colonne de droite comme étant « hors programme ». Elles ne doivent pas être traitées et ne peuvent faire l'objet d'aucune épreuve d'évaluation ;

- celles qui relèvent d'activités possibles ou souhaitables, mais qui ne sont pas exigibles des étudiants. Il s'agit des activités proposées pour illustrer les différentes notions du programme (visualisations à l'aide de l'outil informatique, activités en lien avec les autres disciplines).

Pour les démonstrations des théorèmes dont l'énoncé figure au programme et qui sont repérées dans la colonne de droite par la locution « démonstration non exigible », le professeur est libre d'apprécier, selon le cas, s'il est souhaitable de démontrer en détail le résultat considéré, d'indiquer seulement l'idée de sa démonstration, ou de l'admettre.

Afin de faciliter l'organisation du travail des étudiants et de montrer l'intérêt des notions étudiées, il convient d'en aborder l'enseignement en coordination avec les autres disciplines scientifiques.

Les liens avec les disciplines scientifiques et technologiques sont identifiés par le symbole \Leftrightarrow PC pour la physique et la chimie et \Leftrightarrow I pour l'informatique.

On pourra aussi se reporter à l'annexe aux programmes *Outils mathématiques pour la physique-chimie*.

Usage de la liberté pédagogique

Dans le cadre de la liberté pédagogique qui lui est reconnue par la loi, le professeur choisit ses méthodes, sa progression, ses problématiques. Il peut organiser son enseignement en respectant deux grands principes directeurs :

- pédagogue, il privilégie la mise en activité des étudiants en évitant tout dogmatisme : l'acquisition des connaissances et des capacités est en effet d'autant plus efficace que les étudiants sont acteurs de leur formation. Quel que soit le contexte (cours, travaux dirigés), la pédagogie mise en œuvre développe la participation, la prise d'initiative et l'autonomie des étudiants.
- didacticien, il choisit le contexte favorable à l'acquisition des connaissances et au développement des compétences. La mise en perspective d'une problématique avec l'histoire des sociétés, des sciences et des techniques, mais aussi des questions d'actualité ou des débats d'idées, permet de motiver son enseignement.

Programme

Compléments d'algèbre linéaire

Dans toute cette partie, le corps \mathbb{K} désigne \mathbb{R} ou \mathbb{C} .

Ce chapitre est organisé autour de trois objectifs :

- consolider les acquis de la classe de première année.
- étudier de nouveaux concepts : somme de plusieurs sous-espaces vectoriels, hyperplans, sous-espaces stables, trace.
- passer du point de vue géométrique au point de vue matriciel et inversement.

Le programme valorise les interprétations géométriques en dimensions 2 et 3 et l'illustration des notions et des résultats par de nombreuses figures.

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

a) Familles quelconques de vecteurs

Famille libre, famille génératrice, base.

Extension des résultats vus en première année sur les familles finies.

Base canonique de $\mathbb{K}[X]$.

Toute famille de polynômes non nuls échelonnée en degré est libre.

Toute famille $(P_k)_{k \in \mathbb{N}}$ avec degré de $\deg(P_k) = k$ est une base de $\mathbb{K}[X]$.

b) Sous-espaces vectoriels

Somme d'un nombre fini de sous-espaces vectoriels.

Somme directe.

En dimension finie, base adaptée à une décomposition en somme directe.

Par définition, la somme F de p sous-espaces F_i est directe si tout vecteur de F se décompose de manière unique comme somme de vecteurs des F_i . Caractérisation d'une somme directe par l'unicité de la décomposition du vecteur nul.

Pour $p \geq 3$, toute autre caractérisation est hors programme.

Interprétation géométrique en dimension 2 et 3.

Hyperplan d'un espace vectoriel de dimension finie n défini comme étant un sous-espace vectoriel de dimension $n - 1$.

Équations d'un hyperplan.

Caractérisation comme sous-espace admettant une droite comme supplémentaire.

c) Endomorphismes remarquables d'un espace vectoriel

Homothéties.

Projecteurs et symétries associés à deux sous-espaces vectoriels supplémentaires.

Caractérisations $p \circ p = p$ et $s \circ s = \text{id}_E$.

d) Sous-espaces stables

Sous-espace stable par un endomorphisme. Matrice dans une base adaptée.

Les étudiants doivent savoir interpréter une forme matricielle par bloc en termes de sous-espace stable, et inversement.

e) Trace

Trace d'une matrice.

Linéarité, $\text{Tr}(AB) = \text{Tr}(BA)$

Deux matrices semblables ont même trace.

Trace d'un endomorphisme en dimension finie.

Déterminants

Ce chapitre développe une théorie du déterminant des matrices carrées, puis des endomorphismes d'un espace de dimension finie. Il met en évidence l'aspect algébrique (caractérisation des matrices inversibles) et l'aspect géométrique (volume orienté).

Les capacités attendues sont la connaissance et l'utilisation des propriétés du déterminant permettant un calcul simple via des opérations élémentaires. Tout excès de technicité est exclu et l'outil informatique est utilisé dès que le calcul s'avère trop lourd.

Dans toute cette partie, \mathbb{K} désigne \mathbb{R} ou \mathbb{C} .

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

a) Déterminant d'une matrice carrée

Il existe une unique application de $\mathcal{M}_n(\mathbb{K})$ dans \mathbb{K} , appelée déterminant, telle que

- i. le déterminant est linéaire par rapport à chacune des colonnes ;
- ii. l'échange de deux colonnes a pour effet de multiplier le déterminant par -1 ;
- iii. le déterminant de la matrice unité I_n vaut 1.

Notation \det .

La démonstration de ce théorème pour $n \geq 4$ et la notion générale de forme multilinéaire sont hors programme. Pour $n \in \{2, 3\}$, on interprète géométriquement cette définition par les notions d'aire et de volume algébriques.

b) Propriétés du déterminant

Le déterminant d'une matrice ayant deux colonnes égales est nul.

Expression de $\det(\lambda A)$ pour $(\lambda, A) \in \mathbb{K} \times \mathcal{M}_n(\mathbb{K})$.

Effet sur un déterminant des opérations élémentaires en colonnes.

\Leftrightarrow I : calcul du déterminant d'une matrice.

Déterminant d'une matrice triangulaire.

Une matrice carrée est inversible si et seulement si son déterminant est non nul.

Déterminant d'un produit de matrices carrées.

Déterminant de l'inverse.

Déterminant de la transposée d'une matrice carrée.

Démonstration hors programme.

Démonstration hors programme.

Le déterminant vérifie les mêmes propriétés vis-à-vis des lignes que des colonnes.

Développement par rapport à une colonne ou une ligne du déterminant d'une matrice.

Démonstration non exigible.

La notion de comatrice est hors programme.

c) Déterminant d'une famille de vecteurs, d'un endomorphisme

Déterminant d'une famille de vecteurs dans une base. Caractérisation des bases.

Déterminant d'un endomorphisme. Caractérisation des automorphismes.

La formule de changement de bases pour un déterminant est hors programme.

Traduction sur les déterminants d'endomorphismes des propriétés vues sur les déterminants de matrices.

Réduction d'endomorphismes

Ce chapitre étudie la réduction des matrices et des endomorphismes d'un espace vectoriel de dimension finie. L'application des résultats de la réduction à la recherche des solutions d'une récurrence linéaire d'ordre 2 à coefficients constants crée un nouveau pont entre l'algèbre et l'analyse et anticipe l'étude des équations différentielles linéaires dont la résolution repose sur des outils similaires.

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

a) Éléments propres

Valeur propre, vecteur propre, sous-espace propre d'un endomorphisme. Spectre.

Une somme finie de sous-espaces propres associés à des valeurs propres distinctes est directe.

Polynôme caractéristique d'un endomorphisme.

Le polynôme caractéristique d'un endomorphisme f peut s'écrire sous la forme :

$$X^n - \text{Tr}(f)X^{n-1} + \dots + (-1)^n \det(f).$$

Les racines du polynôme caractéristique sont les valeurs propres.

Ordre de multiplicité d'une valeur propre. Comparaison entre l'ordre de multiplicité d'une valeur propre et la dimension du sous-espace propre associé.

Éléments propres et polynôme caractéristique d'une matrice.

Interprétation en termes de droite stable.

Le polynôme caractéristique, défini par la fonction polynomiale $X \mapsto \chi_f(X) = \det(X\text{Id}_E - f)$, est de coefficient dominant égal à 1.

Extension des définitions et des résultats précédents.

b) Endomorphismes et matrices diagonalisables

Un endomorphisme est dit diagonalisable s'il existe une base dans laquelle sa matrice est diagonale.

Un endomorphisme de E est diagonalisable si et seulement si la somme des sous-espaces propres est égale à E .

Un endomorphisme est diagonalisable si et seulement si son polynôme caractéristique est scindé et si l'ordre de multiplicité de chaque valeur propre est égal à la dimension du sous-espace propre associé.

Un endomorphisme d'un espace vectoriel de dimension n ayant n valeurs propres distinctes est diagonalisable.

Une matrice est dite diagonalisable si elle est semblable à une matrice diagonale.

Interprétation : existence d'une base de vecteurs propres.

Extension des résultats précédents au cas des matrices.

c) Applications de la diagonalisation

Calcul des puissances d'une matrice diagonalisable.

Récurrence linéaire d'ordre 2 à coefficients constants.

Structure de l'ensemble des suites numériques vérifiant une relation de récurrence linéaire d'ordre 2 à coefficients constants. Équation caractéristique.

Les étudiants doivent savoir résoudre les récurrences vectorielles de la forme $X_{n+1} = AX_n$ où A est une matrice diagonalisable.

On se limite au cas homogène.

Cette application est l'occasion de voir des matrices de $M_2(\mathbb{K})$ trigonalisables.

Les étudiants doivent savoir traduire une récurrence scalaire d'ordre 2 en une récurrence vectorielle d'ordre 1 du type $X_{n+1} = AX_n$.

Les étudiants doivent savoir trouver une base de l'espace vectoriel des solutions dans le cas d'une relation d'ordre 2.

Fonctions vectorielles et courbes paramétrées

Ce chapitre fournit l'occasion de revoir une partie des notions abordées dans le cours d'analyse de première année. L'étude des fonctions vectorielles en dimension inférieure ou égale à trois permet de présenter des résultats utiles dans les autres disciplines scientifiques et introduit le paragraphe sur les courbes paramétrées. Dans ce cadre, le but est de tracer des courbes sans support logiciel quand les calculs se prêtent à un tracé rapide. Pour des calculs dont la gestion relève d'une technicité excessive, on utilise un outil informatique qui permet en plus de mettre en évidence des problèmes d'échelle et de restriction d'intervalle. L'étude des courbes définies par une équation polaire est hors programme.

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

a) Fonctions d'une variable réelle à valeurs dans \mathbb{R}^2 ou \mathbb{R}^3

Continuité et dérivabilité (éventuellement à gauche ou à droite) en un point ou sur un intervalle.

Ces notions sont définies sur les fonctions coordonnées. Les étudiants doivent savoir interpréter géométriquement et cinématiquement la notion de dérivée en un point.
 \Leftrightarrow PC : cinématique.

Dérivée d'une somme de deux fonctions vectorielles, du produit d'une fonction à valeurs réelles et d'une fonction à valeurs vectorielles.

Applications de classe \mathcal{C}^k sur un intervalle I . Espace vectoriel $\mathcal{C}^k(I, \mathbb{R}^n)$.

Formule de Taylor-Young pour une fonction de classe \mathcal{C}^k . Développement limité d'une fonction de classe \mathcal{C}^k .

Dans l'espace euclidien \mathbb{R}^2 ou \mathbb{R}^3 (éventuellement orienté), dérivation d'un produit scalaire, d'une norme, d'un déterminant ou d'un produit vectoriel.

b) Arcs paramétrés

Rappels sur les graphes de fonctions réelles d'une variable réelle, tangente à un tel graphe.

Arc paramétré.

Tangente en un point.

La tangente en un point est définie comme la limite des sécantes.

Caractérisation de la tangente à partir du premier vecteur dérivé non nul.

L'étude locale en un point où tous les vecteurs dérivés successifs sont nuls est hors programme.

Cas particulier d'un point régulier.

Interprétation cinématique.

Position relative local de la courbe par rapport à sa tangente.

Les étudiants doivent savoir déterminer la position d'une courbe par rapport à sa tangente à l'aide des développements limités de chacune des composantes.

Exemples de constructions d'arcs plans.

Les étudiants doivent savoir exploiter les éventuelles propriétés des fonctions (parité, périodicité) afin de restreindre l'ensemble d'étude. L'étude des points stationnaire et des courbes asymptotes est hors programme.

\Leftrightarrow I : tracé de courbes paramétrées.

Intégration d'une fonction continue sur un intervalle

L'objectif de ce chapitre est d'étendre la notion d'intégrale étudiée en première année à des fonctions continues sur un intervalle quelconque par le biais des intégrales généralisées.

L'étude de la semi-convergence des intégrales n'est pas un objectif du programme.

Les fonctions considérées sont continues sur un intervalle de \mathbb{R} et à valeurs dans $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou \mathbb{C} .

a) Intégrale d'une fonction continue sur un intervalle

Pour $f: [a, b[\rightarrow \mathbb{K}$, $b > a$ ou $b = +\infty$, l'intégrale $\int_a^b f(t) dt$ est dite convergente si la fonction $x \mapsto \int_a^x f(t) dt$ admet une limite finie quand x tend vers b par valeurs inférieures. Si tel est le cas, on note cette limite $\int_a^b f(t) dt$.

Théorèmes de comparaison pour les fonctions à valeurs réelles, continues et de signe constant sur $[a, b[$, sous l'hypothèse $f \leq g$ ou $f(t) \underset[t < b]{t \rightarrow b} \sim g(t)$.

Intégration d'une fonction sur une intervalle quelconque.

Intégrales de référence :

$$\int_1^{+\infty} \frac{dt}{t^\alpha}, \int_0^1 t^{-\alpha} dt \quad (\alpha \in \mathbb{R}).$$

Linéarité, positivité, croissance de l'intégrale et relation de Chasles.

Théorème de changement de variable : étant données une fonction f continue sur $]a, b[$ et une fonction φ strictement croissante de classe \mathcal{C}^1 sur $]\alpha, \beta[$, les intégrales $\int_a^b f(t) dt$ et $\int_\alpha^\beta f(\varphi(u)) \varphi'(u) du$ avec $a = \lim_{t \rightarrow \alpha} \varphi(u)$ et $b = \lim_{t \rightarrow \beta} \varphi(u)$ sont de même nature et égales en cas de convergence.

Il suffit de vérifier l'hypothèse $f \leq g$ au voisinage de b .

Adaptation aux fonctions définies sur un intervalle $]a, b[$ où $a < b$, a réel ou $a = -\infty$, puis sur un intervalle $]a, b[$, avec $a < b$ quelconques.

Les étudiants doivent connaître la nature de $\int_0^1 \ln(t) dt$ et $\int_0^{+\infty} e^{-at} dt$ selon le signe de a .

Breve extension des propriétés étudiées en première année.

Adaptation au cas où φ est strictement décroissante.

Pour les intégrales impropres en un point quelconque, les étudiants doivent savoir se ramener aux intégrales de référence par un changement de variable affine.

Aucun théorème d'intégration par parties sur un intervalle quelconque n'est au programme.

b) Intégrales des fonctions positives

Théorèmes de comparaison pour les fonctions continues et positives sur $[a, b[$ ou les hypothèses $f \leq g$ ou $f(t) \underset[t < b]{t \rightarrow b} \sim g(t)$.

Une fonction continue et positive sur $]a, b[$ est nulle si et seulement si son intégrale est nulle.

Les étudiants doivent savoir se ramener à une intégrale de référence pour étudier la nature d'une intégrale.

c) Intégrales absolument convergentes

Définition d'une intégrale absolument convergente.

Une intégrale absolument convergente est convergente.

De plus, on a l'inégalité $\left| \int_a^b f \right| \leq \int_a^b |f|$.

Comparaison en module à des fonctions réelles positives : $|f| \leq g$, et dans le cas où $|f(t)| \underset[t < b]{t \rightarrow b} \sim g(t)$.

L'étude des intégrales semi-convergentes n'est pas un objectif du programme.

Démonstration non exigible.

Démonstration non exigible pour les fonctions à valeurs dans \mathbb{C} .

Théorème de comparaison : si g est positive localement au voisinage de b et si $f(t) = o(g(t))$, la convergence de l'intégrale de g implique la convergence absolue de l'intégrale de f .

Une fonction continue est dite intégrable sur l'intervalle I si son intégrale sur I est absolument convergente.

Espace vectoriel des fonctions intégrables sur I .

Séries numériques

L'étude des séries prolonge celle des suites et prépare celle des séries entières et des séries de Fourier. Elle permet de mettre en œuvre l'analyse asymptotique. L'objectif majeur est la maîtrise de la convergence absolue.

a) Généralités

Série à termes réels ou complexes ; sommes partielles.

Convergence ou divergence ; en cas de convergence, somme et restes.

Linéarité de la somme.

Le terme général d'une série convergente tend vers 0.

Séries géométriques : sommes partielles, condition nécessaire et suffisante de convergence, valeur de la somme en cas de convergence.

Une suite (u_n) converge si et seulement si la série $\sum(u_{n+1} - u_n)$ converge.

La série est notée $\sum u_n$.

La valeur de la somme est notée $\sum_{n=0}^{+\infty} u_n$ en cas de convergence.

Les étudiants doivent savoir prouver qu'une série diverge grossièrement en étudiant la limite du terme général.

b) Séries à termes positifs

Une série à termes positifs converge si et seulement si la suite de ses sommes partielles est majorée.

Si (u_n) et (v_n) sont positives et si, pour tout n , $u_n \leq v_n$, alors

- la convergence de $\sum v_n$ implique celle de $\sum u_n$, et

$$\sum_{n=0}^{+\infty} u_n \leq \sum_{n=0}^{+\infty} v_n$$

- la divergence de $\sum u_n$ implique celle de $\sum v_n$.

Si (u_n) et (v_n) sont positives et si $u_n \sim v_n$, alors $\sum v_n$ et $\sum u_n$ sont de même nature.

Comparaison à une série géométrique, règle de d'Alembert.

Théorème de comparaison séries-intégrales : si $f : [n_0, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}_+$ est une fonction continue, positive et décroissante, alors la série $\sum f(n)$ et l'intégrale

$$\int_{n_0}^{+\infty} f(t) dt$$

Séries de Riemann.

Toute autre règle de comparaison est hors programme.

Sur des exemples simples, application à l'étude asymptotique des sommes partielles.

Les étudiants doivent savoir comparer une série positive à une série de Riemann pour étudier sa nature.

c) Séries absolument convergentes

Convergence absolue d'une série à termes réels ou complexes.

La convergence absolue implique la convergence.

Inégalité triangulaire.

Démonstration non exigible.

La notion de semi-convergence est hors programme.

Séries entières d'une variable réelle ou complexe

Les séries entières considérées sont à coefficients réels ou complexes. Les objectifs de ce chapitre sont les suivants :

- étudier la convergence d'une série entière de variable complexe et mettre en évidence la notion de rayon de convergence ;
- étudier les propriétés de sa somme en se limitant au cas d'une variable réelle ;
- établir les développements en série entière des fonctions usuelles.

La théorie des séries entières sera appliquée à la recherche de solutions d'équations différentielles linéaires.

a) Convergence d'une série entière

Série entière d'une variable réelle ou complexe.

Lemme d'Abel : étant donné un nombre réel $r > 0$, tel que la suite $(a_n r^n)_n$ soit bornée, alors, pour tout nombre complexe z tel que $|z| < r$ la série $\sum a_n z^n$ est absolument convergente.

Rayon de convergence défini comme borne supérieure dans $\mathbb{R} \cup \{+\infty\}$ des réels $r \geq 0$ tels que la suite $(a_n r^n)_n$ est bornée.

Disque ouvert de convergence, intervalle ouvert réel de convergence.

Si $|a_n| \leq |b_n|$ pour tout n , alors le rayon de convergence de la série entière $\sum a_n z^n$ est supérieur ou égal à celui de $\sum b_n z^n$.

Si $|a_n| \sim |b_n|$, le rayon de convergence de la série entière $\sum a_n z^n$ est égal à celui de $\sum b_n z^n$.

Les séries entières $\sum a_n z^n$ et $\sum n a_n z^n$ ont le même rayon de convergence.

Si le rayon de convergence R est un réel strictement positif, alors pour $|z| < R$ la série $\sum a_n z^n$ converge absolument et pour $|z| > R$, la série $\sum a_n z^n$ diverge grossièrement.

Toute étude systématique de la convergence sur le cercle de convergence est exclue.

La règle de d'Alembert relative aux séries entières est hors programme.

Démonstration non exigible.

b) Somme d'une série entière d'une variable réelle

Fonction somme d'une série entière. Domaine de définition.

La fonction somme est continue sur l'intervalle de convergence ouvert.

La fonction somme est de classe \mathcal{C}^∞ sur son intervalle ouvert de convergence. Dérivation terme à terme.

Intégration terme à terme sur un segment inclus dans l'intervalle ouvert de convergence.

Ce domaine n'est pas nécessairement ouvert.

Démonstrations hors programme.

Démonstrations hors programme.

Démonstration hors programme.

c) Fonction développable en série entière

Fonction développable en série entière au voisinage de 0. Unicité du développement en série entière.

Lien avec la série de Taylor.

Développements en série entière usuels :

$$\frac{1}{1-x}; \quad \ln(1+x); \quad e^x;$$

$$(1+x)^\alpha; \quad \cos(x); \quad \sin(x).$$

Les étudiants doivent savoir utiliser l'unicité de la solution d'un problème de Cauchy pour déterminer un développement en série entière.

c) Exponentielle complexe

Expression admise pour un nombre complexe z de $\exp(z)$ (ou e^z) comme somme de la série entière $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{z^n}{n!}$.

En première année, l'exponentielle complexe est définie par la relation

$$e^{x+iy} = e^x(\cos(y) + i \sin(y))$$

où x et y sont deux réels quelconques.

Probabilités

On aborde dans ce chapitre l'étude des probabilités sur un univers Ω dénombrable, afin de modéliser les processus stochastiques à temps discret. Les résultats démontrés en première année dans le cadre d'un univers fini sont étendus sans démonstration. La construction d'espaces probabilisés modélisant notamment une suite d'expériences aléatoires indépendantes est hors de portée à ce niveau. On se limite au cas où l'ensemble des événements est l'ensemble des parties de Ω . La notion de tribu est hors programme.

A - Probabilité sur un univers dénombrable

a) Espace probabilisé dénombrable

Un ensemble est dit dénombrable s'il peut être décrit en extension par $\{x_n; n \in \mathbb{N}\}$.

Expérience aléatoire, événements.

Suite infinie d'événements ; union et intersection.

Système complet d'événements.

On appelle probabilité sur Ω toute application P de $\mathcal{P}(\Omega)$ dans $[0, 1]$ vérifiant $P(\Omega) = 1$ et, pour toute suite $(A_k)_{k \in \mathbb{N}}$ d'événements deux à deux incompatibles :

$$P\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{n=0}^{+\infty} P(A_n)$$

Dénombrabilité de \mathbb{N} et de \mathbb{Z} .

Toute autre connaissance sur la dénombrabilité est hors programme.

Extension des définitions vues en première année.

Les étudiants doivent faire le lien entre point de vue probabiliste et point de vue ensembliste.

b) Indépendance et conditionnement

Si A et B sont deux événements tels que $P(B) > 0$, on appelle probabilité conditionnelle de A sachant B le réel

$$P_B(A) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

On la note aussi $P(A|B)$. L'application P_B est une probabilité.

Formules des probabilités composées.
 Formule des probabilités totales : si $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est un système complet d'événements de probabilités non nulles, alors la série $\sum P(B \cap A_n)$ converge et,

$$P(B) = \sum_{n=0}^{+\infty} P(B \cap A_n) = \sum_{n=0}^{+\infty} P(B | A_n) P(A_n)$$

Formules de Bayes : si A et B sont deux événements tels que $P(A) > 0, P(B) > 0$, alors,

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) P(A)}{P(B)}$$

Indépendance de deux événements.

Si $P(B) > 0$, l'indépendance de A et B équivaut à $P(A | B) = P(A)$.

Indépendance mutuelle d'une famille finie d'événements.

L'indépendance des événements A_i deux à deux n'entraîne pas leur indépendance mutuelle si $n \geq 3$.

B - Variables aléatoires

L'utilisation de variables aléatoires pour modéliser des situations simples dépendant du hasard fait partie des capacités attendues des étudiants. On se limite en pratique aux variables aléatoires définies sur un univers dénombrable.

a) Variable aléatoire réelle

Une variable aléatoire réelle X est une application définie sur Ω à valeurs dans \mathbb{R} .

Loi de probabilité.

L'application P_X est définie par la donnée des $P(X = x)$ pour x dans $X(\Omega)$.

Fonction de répartition ; croissance.

Notation P_X .

$$F_X(x) = P(X \leq x).$$

La connaissance des propriétés générales des fonctions de répartition n'est pas exigible.

Les étudiants doivent savoir déterminer la loi d'une variable aléatoire à partir de sa fonction de répartition.

Image d'une variable aléatoire par une application.

Si f est une application à valeurs réelles, on admet que $f(X)$ est une variable aléatoire et on se limite aux cas simples du type X^2 et X^3 .

b) Espérance

La variable aléatoire réelle X est dite d'espérance finie si la série $\sum x_n P(X = x_n)$ est absolument convergente. Dans ce cas, on appelle espérance de X le réel

$$\sum_{n=0}^{+\infty} x_n P(X = x_n).$$

Linéarité de l'espérance.

On admet que la somme $\sum_{n=0}^{+\infty} x_n P(X = x_n)$ ne dépend pas de l'ordre d'énumération.

Notation $E(X)$.

\Leftrightarrow PC : énergie moyenne de systèmes à spectre discret.

Démonstration hors programme.

Théorème du transfert : si X est une variable aléatoire et f une application à valeurs réelles définie sur l'image $\{x_n, n \in \mathbb{N}\}$ de X , alors $f(X)$ est d'espérance finie si et seulement si la série $\sum P(X = x_n) f(x_n)$ converge absolument. Dans ce cas, on a :

$$E(f(X)) = \sum_{n=0}^{+\infty} P(X = x_n) f(x_n).$$

Si X et Y sont deux variables aléatoires discrètes indépendantes, alors $E(XY) = E(X)E(Y)$.

Démonstration hors programme.
Les étudiants doivent savoir calculer une espérance en appliquant le théorème du transfert.

Démonstration hors programme.

c) Variance et écart type d'une variable aléatoire

Si la variable aléatoire X^2 est d'espérance finie, alors X est elle-même d'espérance finie.

Lorsque X^2 est d'espérance finie, on appelle variance de X le réel $E(X^2) - (E(X))^2$.

Écart type d'une variable aléatoire.

Formule $V(aX + b) = a^2V(X)$ pour a et b deux réels donnés.

Inégalité de Bienaymé-Tchebychev.

Notation $V(X)$.

Les moments d'ordre supérieur ne sont pas au programme.

L'inégalité de Markov n'est pas au programme.

d) Lois usuelles

Pour $p \in]0, 1[$, loi géométrique de paramètre p : la variable aléatoire X suit la loi $\mathcal{G}(p)$ si et seulement si

$$\forall k \in \mathbb{N}^*, \quad P(X = k) = p(1 - p)^{k-1}.$$

Pour $\lambda \in \mathbb{R}$, loi de Poisson de paramètre λ : la variable aléatoire X suit la loi $\mathcal{P}(\lambda)$ si et seulement si

$$\forall k \in \mathbb{N}, \quad P(X = k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}.$$

Approximation de la loi binomiale par la loi de Poisson : si, pour tout n , X_n suit une loi binomiale de paramètre (n, p_n) et si $\lim_{n \rightarrow \infty} np_n = \lambda$, alors, pour tout $k \in \mathbb{N}$, on a

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(X_n = k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}$$

•
Espérance et variance d'une loi géométrique, d'une loi de Poisson.

Notation $X \hookrightarrow \mathcal{G}(p)$.

Les étudiants doivent reconnaître des situations modélisables par une loi géométrique.

La loi géométrique peut être interprétée comme rang du premier succès dans une suite infinie d'épreuves de Bernoulli indépendantes et de même paramètre p . On remarquera que cette interprétation requiert l'existence d'une suite $(X_n)_{n \geq 1}$ de variables de Bernoulli indépendantes, donc un univers non dénombrable. Elle est donnée à titre heuristique.

Notation $X \hookrightarrow \mathcal{P}(\lambda)$.

Les étudiants doivent reconnaître des situations modélisables par une loi de Poisson.

\Leftrightarrow PC : compteur Geiger.

\Leftrightarrow I : simulation de cette approximation.

La notion de convergence en loi est hors programme.

Espaces préhilbertiens réels, espaces euclidiens

Ce chapitre est organisé autour de trois objectifs :

- introduire les notions fondamentales liées à la structure préhilbertienne ;
- étudier les isométries vectorielles et les matrices orthogonales, notamment dans le cas des dimensions 2 et 3 en insistant sur les représentations géométriques ;
- traiter la réduction des matrices symétriques réelles et l'appliquer à la classification et à l'étude des coniques.

A - Structure préhilbertienne

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

a) Produit scalaire

Produit scalaire.
Espace vectoriel préhilbertien réel, espace vectoriel euclidien.
Produit scalaire canonique sur \mathbb{R}^n .

Notations $\langle x, y \rangle, (x|y), x \cdot y$.

On peut identifier \mathbb{R}^n et l'espace des vecteurs colonnes correspondants. Exemples de produits scalaires définis par une intégrale sur des espaces de fonctions et de polynômes.

Norme associée à un produit scalaire, distance associée.
Inégalité de Cauchy-Schwarz, cas d'égalité.

b) Orthogonalité

Vecteurs orthogonaux, sous-espaces orthogonaux.
Orthogonal d'un sous-espace vectoriel F .
Théorème de Pythagore.
Famille orthogonale, famille orthonormale (ou orthonormée).
Toute famille orthogonale de vecteurs non nuls est libre.
Algorithme d'orthonormalisation de Gram-Schmidt.

Notation F^\perp .

Les étudiants doivent savoir mettre en œuvre l'algorithme dans le cas d'un nombre restreint de vecteurs.
 \Leftrightarrow I : détermination d'une base orthonormée de polynômes.

Existence de bases orthonormales en dimension finie.
Coordonnées d'un vecteur dans une base orthonormale ;
expression du produit scalaire et de la norme.

d) Projection orthogonale sur un sous-espace de dimension finie

Si F est un sous-espace vectoriel de dimension finie d'un espace préhilbertien, alors F et F^\perp sont supplémentaires.
Projection orthogonale sur un sous-espace vectoriel. Expression du projeté orthogonal dans une base orthonormale.

En dimension finie, dimension de l'orthogonal.

Les étudiants doivent savoir déterminer le projeté orthogonal $p_F(x)$ d'un vecteur x sur le sous-espace F en résolvant un système linéaire traduisant l'orthogonalité de $x - p_F(x)$ aux vecteurs d'une famille génératrice de F .
 \Leftrightarrow I : programmation de ces méthodes.

Le projeté orthogonal de x sur F est l'unique élément de F qui minimise $\|x - y\|$ avec $y \in F$. Distance d'un vecteur x à un sous-espace vectoriel F de dimension finie.

Notation $d(x, F)$.

B - Isométries d'un espace euclidien

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

a) Isométries vectorielles d'un espace euclidien

Un endomorphisme d'un espace euclidien est une isométrie vectorielle s'il conserve la norme. Caractérisation par la conservation du produit scalaire.

Caractérisation par la conservation de la norme, par l'image d'une base orthonormale.

Symétrie orthogonale par rapport à un sous-espace. Réflexion.

Groupe orthogonal d'un espace euclidien E .

Si un sous-espace est stable par une isométrie vectorielle, son orthogonal est stable par cette isométrie.

L'étude des formes quadratiques n'est pas au programme.

Notation $O(E)$. On vérifie ici les propriétés donnant une structure de groupe, mais la définition axiomatique des groupes est hors programme.

b) Matrices orthogonales

Une matrice M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est orthogonale si $M^T M = I_n$. Traduction à l'aide des colonnes de M , à l'aide des lignes de M .

Groupe orthogonal.

Si \mathcal{B}_0 est une base orthonormale de E , une base \mathcal{B} de E est orthonormale si et seulement si la matrice de passage de \mathcal{B}_0 à \mathcal{B} est orthogonale.

Si \mathcal{B}_0 est une base orthonormale de E et u un endomorphisme de E , alors u est une isométrie vectorielle de E si et seulement si $\text{Mat}_{\mathcal{B}_0}(u)$ est orthogonale.

Déterminant d'une matrice orthogonale, d'une isométrie vectorielle.

Isométrie positive, négative (directes, indirectes). Groupe spécial orthogonal.

Notations $O_n(\mathbb{R})$, $O(n)$.

Application à l'orientation d'un espace euclidien et à la notion de base orthonormale directe.

Notations $SO_n(\mathbb{R})$, $SO(n)$ et $SO(E)$.

c) Classification en dimension 2 et 3

Description du groupe orthogonal en dimension 2 et 3.

Utilisation de la réduction pour la classifications des isométries vectorielles.

Les étudiants doivent savoir déterminer les caractéristiques géométriques d'une isométrie.

\Leftrightarrow PC : moment cinétique, force de Laplace.

d) Matrices symétriques réelles.

Matrices symétriques réelles.

Notation $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$.

La notion d'endomorphisme symétrique est hors programme.

Les sous-espaces propres d'une matrice symétrique réelle sont deux à deux orthogonaux.

Théorème spectral : pour toute matrice symétrique réelle A , il existe une matrice diagonale D et une matrice orthogonale P telles que $A = PDP^{-1}$.

Démonstration hors programme.

\Leftrightarrow PC : matrice d'inertie.

Séries de Fourier

L'étude des séries de Fourier est présentée dans le cadre des fonctions T -périodiques, continues par morceaux et à valeurs dans \mathbb{R} . Ce chapitre développe des compétences de calcul à travers celui des coefficients de Fourier et l'application du théorème de Parseval. L'interprétation géométrique de la n -ième somme de Fourier comme projection orthogonale relie les points de vue analytique et géométrique de la théorie. Ce chapitre est aussi particulièrement favorable aux interactions entre les disciplines.

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

a) Fonctions continues et \mathcal{C}^1 par morceaux

Une fonction définie sur un segment $[a, b]$ à valeurs réelles est dite continue par morceaux (respectivement de classe \mathcal{C}^1 par morceaux) sur $[a, b]$, s'il existe une subdivision $a_0 = a < a_1 < \dots < a_n = b$ telle que chaque restriction de f à chaque intervalle $]a_i, a_{i+1}[$ est prolongeable en tant que fonction continue (respectivement \mathcal{C}^1) sur $[a_i, a_{i+1}]$.

Une fonction T -périodique est dite continue (respectivement \mathcal{C}^1) par morceaux si elle est continue par morceaux (respectivement \mathcal{C}^1 par morceaux) sur une période.

Espace vectoriel des fonctions à valeurs réelles, T -périodiques et continues par morceaux (respectivement \mathcal{C}^1 par morceaux) sur \mathbb{R} .

Intégrale sur une période d'une fonction T -périodique et continue par morceaux.

\Leftrightarrow PC : signaux physiques ; dualité temps-fréquence.

Extension rapide de la définition et des propriétés de l'intégrale au cas des fonctions continues par morceaux.

b) Coefficients et séries de Fourier

Coefficients de Fourier trigonométriques d'une fonction f .

Cas des fonctions paires et impaires.

Sommes partielles de Fourier d'une fonction f définies, pour $n \in \mathbb{N}^*$, par :

$$S_n(f)(t) = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)) \text{ où } \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Notation $a_k(f)$ et $b_k(f)$ ou, plus simplement, a_k et b_k .

Le coefficient a_0 est défini comme la valeur moyenne sur une période.

Les coefficients exponentiels sont introduits pour présenter certains résultats, mais aucune formule n'est exigible.

Dans le cas des fonctions continues, interprétation géométrique de $S_n(f)$ comme la projection orthogonale de f sur le sous-espace vectoriel engendré par les fonctions $t \mapsto \cos(k\omega t)$ et $t \mapsto \sin(k\omega t)$ ($k \in \llbracket 0, n \rrbracket$) pour le produit scalaire défini par $\langle f, g \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)g(t) dt$.

c) Théorèmes de convergence

Théorème de Parseval : si f est une fonction T -périodique et continue par morceaux sur \mathbb{R} , les séries $\sum a_n^2$ et $\sum b_n^2$ convergent et

$$\frac{1}{T} \int_0^T |f(t)|^2 dt = a_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2)$$

Théorème de Dirichlet : si f est une fonction T -périodique et de classe \mathcal{C}^1 par morceaux sur \mathbb{R} , alors la série de Fourier de f converge en tout point et

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n(f)(t) = \frac{1}{2} \lim_{h \rightarrow 0} (f(t+h) + f(t-h))$$

La démonstration est hors programme.

Interprétation géométrique du théorème de Parseval dans le cas des fonctions continues.

Les étudiants doivent savoir appliquer ce résultat pour calculer la somme de certaines séries numériques.

La démonstration est hors programme.

On appelle régularisée de f la fonction définie sur \mathbb{R} par $t \mapsto \frac{1}{2} \lim_{h \rightarrow 0} (f(t+h) + f(t-h))$.

\Leftrightarrow I : tracé de sommes partielles de Fourier d'une fonction.

Cas où f est continue et de classe \mathcal{C}^1 par morceaux.

Les étudiants doivent savoir appliquer ce résultat pour calculer la somme de certaines séries numériques.

Équations différentielles

L'étude des équations différentielles est limitée au cas linéaire. L'accent est mis sur les techniques de résolution des équations scalaires d'ordre 2 et des systèmes linéaires à coefficients constants, en raison de leur importance dans d'autres champs disciplinaires. L'approche graphique offerte par l'outil informatique met en évidence les problèmes de stabilité des solutions.

a) Équations différentielles scalaires d'ordre 2

Équation $y'' + a(t)y' + b(t)y = c(t)$ où a , b et c sont continues sur I à valeurs réelles ou complexes.

Théorème de Cauchy linéaire : existence et unicité de la solution d'un problème de Cauchy.

Espace vectoriel des solutions de l'équation homogène.

Forme générale des solutions de l'équation $y'' + a(t)y' + b(t)y = c(t)$. Principe de superposition des solutions.

Résolution dans le cas où une solution de l'équation homogène ne s'annulant pas est connue.

\Leftrightarrow PC : mécanique.

Démonstration hors programme.

\Leftrightarrow I : méthode d'Euler pour la recherche d'une solution approchée d'un problème de Cauchy.

Les solutions s'écrivent comme la somme d'une solution particulière de l'équation avec second membre et d'une solution de l'équation homogène.

Recherche de solutions particulières, notamment développables en série entière.

b) Systèmes différentiels linéaires à coefficients constants

Écriture sous la forme $X'(t) = AX(t)$ où A est une matrice réelle ou complexe de taille $n \times n$ à coefficients constants.

Existence et unicité de la solution du problème de Cauchy.

Structure de l'ensemble des solutions.

Comportement asymptotique des solutions en fonction du signe de la partie réelle des valeurs propres de A dans le cas où A est diagonalisable.

Équivalence entre une équation scalaire d'ordre n et un système d'ordre 1 de dimension n .

Cas particulier des équations différentielles linéaires d'ordre 2 homogène à coefficients constants.

\Leftrightarrow PC : cinétique chimique.

La démonstration est hors programme.

Pratique de la résolution dans le cas où la matrice A est diagonalisable.

\Leftrightarrow PC : stabilité des solutions, état d'équilibre.

Lien avec la forme des solutions d'une équation scalaire d'ordre 2 étudiée en première année.

Fonctions de plusieurs variables

Les fonctions considérées dans ce chapitre sont définies sur une partie de \mathbb{R}^n et à valeurs dans \mathbb{R} . On se limite en pratique aux cas où $n \leq 3$. L'étude des fonctions de plusieurs variables se veut résolument pratique : présentation de recherche d'extremums, résolution d'équations aux dérivées partielles simples.

CONTENUS

CAPACITÉS & COMMENTAIRES

a) Introduction à la topologie de \mathbb{R}^n , $n \leq 3$

Norme et distance euclidienne dans \mathbb{R}^n .	Tout développement sur les normes non euclidiennes est hors programme.
Boules. Partie bornée de \mathbb{R}^n . Partie ouverte, partie fermée. Point intérieur, point extérieur, point adhérent. Frontière (ou bord) d'une partie de \mathbb{R}^n .	Chaque définition est assortie d'une figure. Les caractérisations séquentielles sont hors programme.

b) Limite et continuité

Limite en un point adhérent, continuité en un point, continuité sur une partie. Opérations. Toute fonction réelle continue sur une partie fermée bornée est bornée et atteint ses bornes.	L'étude de la continuité d'une fonction de plusieurs variables n'est pas un attendu du programme. Démonstration hors programme.
---	--

c) Dérivées partielles, fonctions de classe \mathcal{C}^1 et \mathcal{C}^2 sur une partie ouverte

Dérivées partielles d'ordre 1.	Les notions de différentielle et de jacobienne ne sont pas au programme. \Leftrightarrow PC : notation différentielle $df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy$.
Gradient.	Notation ∇f . \Leftrightarrow PC : équation de la diffusion thermique, équation de propagation.
Point critique. Application de classe \mathcal{C}^1 . Opérations. Développement limité à l'ordre 1 d'une fonction \mathcal{C}^1 . Dérivée de $t \mapsto f(x(t), y(t))$. Dérivées partielles de $(u, v) \mapsto h(f(u, v), g(u, v))$.	Existence admise. Les étudiants doivent connaître le cas particulier des coordonnées polaires et savoir étendre les deux résultats précédents au cas de trois variables. \Leftrightarrow PC : laplacien.
Dérivées partielles d'ordre 2. Application de classe \mathcal{C}^2 . Opérations. Théorème de Schwarz.	Démonstration hors programme.

d) Équations aux dérivées partielles

Exemples simples de résolutions d'équations aux dérivées partielles premières ou secondes.	Les étudiants doivent être capables d'utiliser un changement de variables dans les deux cas suivants : transformation affine, passage en coordonnées polaires. Il n'est pas attendu de revenir aux coordonnées cartésiennes lors d'un changement en coordonnées polaires. L'expression des solutions en fonction des variables initiales n'est pas un attendu du programme. \Leftrightarrow PC : équation du transport, équation de la diffusion thermique, équation de propagation.
--	--

e) Extremums d'une fonction de plusieurs variables

Si une fonction de classe \mathcal{C}^1 sur un ouvert de \mathbb{R}^n admet un extremum local en un point, alors celui-ci est un point critique.

Exemples de recherche d'extremums globaux sur une partie fermée bornée de \mathbb{R}^n . \Leftrightarrow PC : mécanique et électricité.

ANNEXE 2

Programme de physique de la voie TPC2

Le programme de physique de la classe de TPC2 s'inscrit dans la continuité du programme de TPC1. Il s'appuie sur des champs disciplinaires variés : optique interférentielle, phénomènes de transports, mécanique des fluides, électromagnétisme, propagation d'ondes et propose en outre une introduction à la physique quantique. Ce programme est conçu pour amener tous les étudiants à poursuivre avec succès un cursus d'ingénieur, de chercheur, d'enseignant, de scientifique, pour éveiller leur curiosité et leur permettre de se former tout au long de la vie.

L'objectif de l'enseignement de physique est d'abord de développer des compétences propres à la pratique de la démarche scientifique :

- observer et s'appropriier une problématique ;
- analyser et modéliser ;
- valider ;
- réaliser et créer.

Cette formation doit aussi développer d'autres compétences dans un cadre scientifique :

- communiquer, à l'écrit et à l'oral ;
- être autonome et faire preuve d'initiative.

Ces compétences sont construites à partir d'un socle de connaissances et de capacités défini par ce programme. Comme celui de première année, ce programme identifie, pour chacun des items, les connaissances scientifiques, mais aussi les savoir-faire, les capacités que les étudiants doivent maîtriser à l'issue de la formation. L'acquisition de ces capacités constitue un objectif prioritaire pour le professeur.

Observer, mesurer, confronter un modèle au réel nécessitent la pratique d'une démarche expérimentale. La formation expérimentale de l'étudiant revêt donc une importance essentielle, au même titre que sa formation théorique. En outre elle donne un sens aux concepts et aux lois introduites. En classe de TPC2, cette formation expérimentale est poursuivie ; elle s'appuie sur les capacités développées en première année, elle les affermit et les complète.

Comprendre, décrire, modéliser, prévoir, nécessitent aussi une solide formation théorique. Celle-là est largement complétée en classe de TPC2. Le professeur s'appuiera sur des exemples concrets afin de lui donner du sens. La diversité des domaines scientifiques abordés ne doit pas masquer à l'étudiant la transversalité des concepts et des méthodes utilisés, que le professeur veillera à souligner. Théorique et expérimentale, la formation de l'étudiant est multiforme et doit être abordée par des voies variées. Ainsi le professeur doit-il rechercher un point d'équilibre entre des approches apparemment distinctes, mais souvent complémentaires : conceptuelle et expérimentale, abstraite et concrète, théorique et appliquée, inductive et déductive, qualitative et quantitative.

L'autonomie de l'étudiant et sa capacité à prendre des initiatives sont développées à travers la pratique d'activités de type « résolution de problèmes », qui visent à apprendre à mobiliser des savoirs et des savoir-faire pour répondre à des questionnements précis. Ces résolutions de problèmes peuvent aussi être de nature expérimentale ; la formation expérimentale vise non seulement à apprendre à l'étudiant à réaliser des mesures ou des expériences selon un protocole fixé, mais aussi à l'amener à proposer lui-même un protocole et à le mettre en œuvre. Cette capacité à proposer un protocole doit être résolument développée au cours de la formation expérimentale.

Dans ce programme comme dans celui de première année, il est proposé au professeur d'aborder certaines notions à partir de l'étude d'un document. L'objectif de cette « approche documentaire » est d'apprendre à l'étudiant à compléter ses connaissances et ses savoir-faire par l'exploitation de ressources et de documents scientifiques variés, ce qu'il aura inévitablement à pratiquer dans la suite de sa formation et de sa vie professionnelle.

La mise en œuvre de la démarche scientifique en physique-chimie fait souvent appel aux mathématiques, tant pour la formulation du modèle que pour en extraire des prédictions. Le professeur veillera à n'avoir recours à la technicité mathématique que lorsqu'elle s'avère indispensable, et à mettre l'accent sur la compréhension des phénomènes physiques. Néanmoins l'étudiant doit savoir utiliser de façon autonome certains outils mathématiques (précisés dans l'appendice « outils mathématiques ») dans le cadre des activités relevant de la physique.

Enfin, lorsqu'il en aura l'opportunité, le professeur familiarisera l'étudiant à recourir à une approche numérique, qui permet une modélisation plus fine et plus réaliste du réel, par exemple par la prise en compte d'effets non linéaires. C'est l'occasion pour l'étudiant d'exploiter ses capacités concernant l'ingénierie numérique et la simulation qu'il a acquises en première année en informatique et sciences du numérique. Dans ce domaine des démarches collaboratives sont recommandées.

Le programme de physique de la classe de TPC2 inclut celui de la classe de TPC1, et son organisation est la même :

- Dans la première partie sont décrites les compétences que la pratique de la « **démarche scientifique** » permet de développer pendant les deux années de formation à travers certaines de ses composantes : la démarche expérimentale, la résolution de problèmes et les approches documentaires. Ces compétences et les capacités associées continueront à être exercées et mises en œuvre dans des situations variées tout au long de la deuxième année en s'appuyant sur les autres parties du programme. Les compétences mentionnées dans cette partie tissent des liens transversaux entre les différentes rubriques du programme, contribuant ainsi à souligner l'idée d'une science constituée de domaines interdépendants.
- Dans la deuxième partie, intitulée « **formation expérimentale** », sont décrites les méthodes et les capacités expérimentales que les élèves doivent maîtriser à la fin de l'année scolaire. Elles complètent celles décrites dans la deuxième partie du programme de TPC1, qui restent exigibles, et devront être régulièrement exercées durant la classe de TPC2. Leur mise en œuvre à travers les activités expérimentales doit s'appuyer sur des problématiques concrètes contenant celles identifiées en gras dans la partie « formation disciplinaire ».
- La troisième partie, intitulée « **formation disciplinaire** », décrit les connaissances et capacités associées aux contenus disciplinaires propres à la classe de TPC2. Comme dans le programme de première année, elles sont présentées en deux colonnes : la première colonne décrit les « notions et contenus » ; en regard, la seconde colonne précise les « capacités exigibles » associées dont l'acquisition par les étudiants doit être la priorité du professeur. L'évaluation vise à mesurer le degré de maîtrise du socle ainsi défini et le niveau d'autonomie et d'initiative des étudiants. Lors de la conception des évaluations, on veillera soigneusement à identifier les capacités mobilisées afin d'en élargir le plus possible le spectre. Certains items de cette partie, **identifiés en caractères gras**, se prêtent particulièrement à une approche expérimentale. Ils doivent être abordés, au choix, à travers des expériences de cours exploitées de manière approfondie et collective, ou lors de séances de travaux pratiques où l'autonomie et l'initiative individuelle de l'étudiant sont davantage privilégiées. D'autres items sont signalés comme devant être abordés au moyen d'une approche numérique ou d'une approche documentaire.
- Trois appendices listent le matériel, les outils mathématiques et les outils transversaux que les étudiants doivent savoir utiliser de façon autonome dans le cadre des enseignements de physique en fin de l'année de TPC2. Ils complètent le matériel et les outils mathématiques rencontrés en première année et dont la maîtrise reste nécessaire.

Ce programme indique les objectifs de formation à atteindre en fin d'année pour tous les étudiants. Il ne représente en aucun cas une progression imposée pour chaque semestre. La formation de seconde année est divisée en deux semestres. Toutefois le professeur est ici libre de traiter le programme dans l'ordre qui lui semble le plus adapté à ses étudiants. Dans le cadre de sa liberté pédagogique, le professeur, pédagogue et didacticien, organise son enseignement en respectant trois grands principes directeurs :

- Il doit privilégier la mise en activité des étudiants en évitant le 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 aider à la réflexion, la participation et l'autonomie des étudiants. La formation expérimentale, l'approche documentaire, la résolution de problèmes favorisent cette mise en activité.
- Il doit savoir recourir à la mise en contexte des contenus scientifiques : le questionnement scientifique peut être introduit à partir de phénomènes naturels, de procédés ou d'objets technologiques. Lorsque le thème traité s'y prête, le professeur peut le mettre en perspective avec l'histoire des sciences et des techniques, des questions d'actualité ou des débats d'idées.
- Il contribue à la nécessaire mise en cohérence des enseignements scientifiques ; la progression en physique doit être articulée avec celles mises en œuvre dans les autres disciplines, mathématiques, informatique et chimie.

Partie 1 - Démarche scientifique

1. Démarche expérimentale

La physique et la chimie sont des sciences à la fois théoriques et expérimentales. Ces deux parties de la démarche scientifique s'enrichissent mutuellement, leur intrication est un élément essentiel de notre enseignement.

C'est la raison pour laquelle ce programme fait une très large place à la méthodologie expérimentale, selon deux axes forts et complémentaires :

- Le premier a trait à la formation expérimentale à laquelle l'intégralité de la deuxième partie est consacrée. Compte tenu de l'important volume horaire dédié aux travaux pratiques, ceux-ci doivent permettre l'acquisition de compétences spécifiques décrites dans cette partie, de capacités dans le domaine de la mesure (réalisation, évaluation de la précision, analyse du résultat...) et des techniques associées. Cette composante importante de la formation d'ingénieur ou de chercheur a vocation à être évaluée de manière appropriée dans l'esprit décrit dans cette partie.

- Le second concerne l'identification, tout au long du programme dans la troisième partie (contenus disciplinaires), de problématiques se prêtant particulièrement à une approche expérimentale. Ces items, **identifiés en gras**, doivent être abordés, au choix, à travers des expériences de cours exploitées de manière approfondie et collective, ou lors de séances de travaux pratiques où l'autonomie et l'initiative individuelle de l'étudiant sont davantage privilégiées.

Les expériences de cours et les séances de travaux pratiques, complémentaires, ne répondent donc pas tout à fait aux mêmes objectifs :

- Les expériences de cours doivent susciter un questionnement actif et collectif autour d'une expérience bien choisie permettant de faire évoluer la réflexion théorique et la modélisation, d'aboutir à des lois simplificatrices et unificatrices, de dégager des concepts transversaux entre différents domaines de la physique.

- Les séances de travaux pratiques doivent permettre, dans une approche contextualisée, suscitée par une problématique clairement identifiée et, chaque fois que cela est possible, transversale, l'acquisition de savoir-faire techniques, de connaissances dans le domaine de la mesure et de l'évaluation de sa précision, d'autonomie dans la mise en œuvre de protocoles simples associés à la mesure des grandeurs physiques les plus souvent mesurées.

La liste de matériel jointe en appendice de ce programme précise le cadre technique dans lequel les étudiants doivent savoir évoluer en autonomie avec une information minimale. Son placement en appendice du programme, et non à l'intérieur de la partie dédiée à la formation expérimentale, est délibéré : il exclut l'organisation de séances de travaux pratiques dédiées à un appareil donné et centrées seulement sur l'acquisition des compétences techniques associées.

Compétences spécifiques mobilisées lors des activités expérimentales

Les activités expérimentales en classe préparatoire aux grandes écoles (CPGE) mobilisent les compétences spécifiques qui figurent dans le tableau ci-dessous. Des capacités associées sont explicitées afin de préciser les contours de chaque compétence, elles ne constituent donc pas une liste exhaustive et peuvent parfois relever de plusieurs domaines de compétences.

Les compétences doivent être acquises à l'issue de la formation expérimentale en CPGE, le niveau d'exigence est naturellement à mettre en perspective avec celui des autres parties du programme de la filière concernée. Elles nécessitent d'être régulièrement mobilisées par les élèves et sont évaluées en s'appuyant, par exemple, sur l'utilisation de grilles d'évaluation.

L'ordre de présentation de celles-ci ne préjuge pas d'un ordre de mobilisation de ces compétences lors d'une séance ou d'une séquence. Certaines ne sont d'ailleurs pas propres à la seule méthodologie expérimentale, et s'inscrivent plus largement dans la démarche scientifique, voire toute activité de nature éducative et formatrice (communiquer, autonomie, travail en équipe, etc).

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier	<ul style="list-style-type: none">- rechercher, extraire et organiser l'information en lien avec une situation expérimentale- énoncer une problématique d'approche expérimentale- définir les objectifs correspondants
Analyser	<ul style="list-style-type: none">- formuler et échanger des hypothèses- proposer une stratégie pour répondre à la problématique- proposer un modèle- choisir, concevoir ou justifier un protocole ou un dispositif expérimental- évaluer l'ordre de grandeur d'un phénomène et de ses variations
Réaliser	<ul style="list-style-type: none">- mettre en œuvre un protocole- utiliser (avec la notice) le matériel de manière adaptée, en autonomie pour celui de la liste « matériel », avec aide pour tout autre matériel- mettre en œuvre des règles de sécurité adéquates- effectuer des représentations graphiques à partir de données expérimentales
Valider	<ul style="list-style-type: none">- exploiter des observations, des mesures en identifiant les sources d'erreurs et en estimant les incertitudes- confronter un modèle à des résultats expérimentaux- confirmer ou infirmer une hypothèse, une information- analyser les résultats de manière critique- proposer des améliorations de la démarche ou du modèle
Communiquer	<ul style="list-style-type: none">- à l'écrit comme à l'oral :<ul style="list-style-type: none">o présenter les étapes de son travail de manière synthétique, organisée, cohérente et compréhensibleo utiliser un vocabulaire scientifique adaptéo s'appuyer sur des schémas, des graphes- faire preuve d'écoute, confronter son point de vue
Être autonome, faire preuve d'initiative	<ul style="list-style-type: none">- travailler seul ou en équipe- solliciter une aide de manière pertinente- s'impliquer, prendre des décisions, anticiper

Concernant la compétence « **Communiquer** », l'aptitude à rédiger un compte-rendu écrit constitue un objectif de la formation. Dans ce cadre, on doit développer les capacités à définir la problématique du questionnement, à décrire les méthodes, en particulier expérimentales, utilisées pour y répondre, à présenter les résultats obtenus et l'exploitation, graphique ou numérique, qui en a été faite, et à

analyser les réponses apportées au questionnement initial et leur qualité. Les activités expérimentales sont aussi l'occasion de travailler l'expression orale lors d'un point de situation ou d'une synthèse finale par exemple. Le but est de préparer les élèves de CPGE à la présentation des travaux et projets qu'ils auront à conduire et à exposer au cours de leur formation en école d'ingénieur et, plus généralement, dans le cadre de leur métier de chercheur ou d'ingénieur. L'utilisation d'un cahier de laboratoire, au sens large du terme en incluant par exemple le numérique, peut constituer un outil efficace d'apprentissage.

La compétence « **Être autonome, faire preuve d'initiative** » est par nature transversale et participe à la définition du niveau de maîtrise des autres compétences. Le recours à des activités s'appuyant sur les questions ouvertes est particulièrement adapté pour former les élèves à l'autonomie et l'initiative.

2. Résolution de problèmes

Dans l'acquisition de l'autonomie, la « résolution de problèmes » est une activité intermédiaire entre l'exercice cadré qui permet de s'exercer à de nouvelles méthodes, et la démarche par projet, pour laquelle le but à atteindre n'est pas explicite. Il s'agit pour l'étudiant de mobiliser ses connaissances, capacités et compétences afin d'aborder une situation dans laquelle il doit atteindre un but bien précis, mais pour laquelle le chemin à suivre n'est pas indiqué. Ce n'est donc pas un « problème ouvert » pour lequel on soumet une situation en demandant « Que se passe-t-il ? ». L'objectif à atteindre doit être clairement donné et le travail porte sur la démarche à suivre, l'obtention du résultat et son regard critique.

La résolution de problèmes permet de se confronter à des situations où plusieurs approches sont possibles, qu'il s'agisse de la méthode mise en œuvre ou du degré de précision recherché. Ces situations se prêtent bien à une résolution progressive pour laquelle un premier modèle permettra d'obtenir rapidement un résultat, qui sera ensuite discuté et amélioré. Cette résolution étagée doit permettre à tous les élèves d'aborder le problème selon leur rythme en s'appuyant sur les compétences qu'ils maîtrisent.

C'est sur la façon d'appréhender une question scientifique, sur le choix raisonné de la méthode de résolution et sur les moyens de vérification qu'est centrée la formation de l'élève lors de la démarche de résolution de problèmes. La résolution de problèmes mobilise les compétences qui figurent dans le tableau ci-dessous. Des capacités associées sont explicitées afin de préciser les contours de chaque compétence, elles ne constituent donc pas une liste exhaustive et peuvent parfois relever de plusieurs domaines de compétences.

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier le problème.	Faire un schéma modèle. Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole. Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées. Relier le problème à une situation modèle connue. ...
Établir une stratégie de résolution (analyser).	Décomposer le problème en des problèmes plus simples. Commencer par une version simplifiée. Expliciter la modélisation choisie (définition du système, ...). Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées. ...
Mettre en œuvre la stratégie (réaliser).	Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée. Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique. Utiliser l'analyse dimensionnelle. ...

Avoir un regard critique sur les résultats obtenus (valider).	S'assurer que l'on a répondu à la question posée. Vérifier la pertinence du résultat trouvé, notamment en comparant avec des estimations ou ordres de grandeurs connus. Comparer le résultat obtenu avec le résultat d'une autre approche (mesure expérimentale donnée ou déduite d'un document joint, simulation numérique, ...). Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue
Communiquer.	Présenter la solution ou la rédiger, en expliquant le raisonnement et les résultats. ...

3. Approches documentaires

En seconde année, comme en première année, le programme de physique prévoit un certain nombre **d'approches documentaires**, identifiées comme telles dans la colonne « capacités exigibles » de la partie « formation disciplinaire ».

L'objectif de ces activités reste le même puisqu'il s'agit :

- dans la perspective d'une formation tout au long de la vie, d'habituer les étudiants à se cultiver en utilisant des documents variés (texte, schéma, graphe, vidéo, photo,...), démarche dans laquelle ils sont acteurs de leur formation ;
- d'acquérir des éléments de culture (construction du savoir scientifique, histoire des sciences, étapes d'une démarche scientifique, raisonnements, ordres de grandeurs, avancée de la recherche sur des sujets contemporains, ouverture sur les problèmes sociétaux...) dans les domaines de la physique des XX^e et XXI^e siècles et de leurs applications ;
- de mobiliser et de développer des compétences liées à la recherche, à l'extraction, à l'organisation, à l'analyse et à la synthèse de l'information recueillie ou fournie, compétences essentielles pour les futurs ingénieurs et chercheurs scientifiques. Ces compétences et des exemples de capacités associées sont présentés dans le tableau ci-dessous. Elles peuvent servir de support pour la formation et l'évaluation des étudiants.

À l'issue de l'activité documentaire, une synthèse finale est indispensable pour bien identifier les nouvelles connaissances, les nouveaux modèles et les éléments de culture générale que les étudiants doivent s'approprier.

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> - Dégager la problématique principale - Acquérir de nouvelles connaissances en autonomie - Identifier la complémentarité d'informations présentées sous des formes différentes (texte, graphe, tableau,...)
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier les idées essentielles et leurs articulations - Relier qualitativement ou quantitativement différents éléments du ou des documents - Identifier une tendance, une corrélation, une grandeur d'influence - Conduire un raisonnement scientifique qualitatif ou quantitatif. - S'appuyer sur ses connaissances et savoir-faire et sur les documents proposés pour enrichir l'analyse
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> - Extraire une information d'un texte, d'un graphe, d'un tableau - Trier et organiser des données, des informations - Tracer un graphe à partir de données - Schématiser un dispositif, une expérience, une méthode de mesure,... - Décrire un phénomène à travers la lecture d'un graphe, d'un tableau,...

	<ul style="list-style-type: none"> - Conduire une analyse dimensionnelle - Utiliser un modèle décrit
Valider	<ul style="list-style-type: none"> - Faire preuve d'esprit critique - Confronter le contenu du document avec ses connaissances et savoir-faire - Repérer les points faibles d'une argumentation (contradiction, partialité, incomplétude,...) - Estimer des ordres de grandeur et procéder à des tests de vraisemblance
Communiquer à l'écrit comme à l'oral	<ul style="list-style-type: none"> - Rédiger/présenter une synthèse, une analyse, une argumentation,... (clarté, justesse, pertinence, exhaustivité, logique) - Résumer un paragraphe sous la forme d'un texte, d'un schéma, d'une carte mentale - Illustrer son propos par des schémas, des graphes, des développements mathématiques

Partie 2 : Formation expérimentale

Cette partie présente l'ensemble des capacités expérimentales nouvelles que les élèves doivent acquérir au cours de l'année de TPC2 durant les séances de travaux pratiques. Elle vient prolonger la partie correspondante de TPC1 dont les capacités doivent être complètement acquises à l'issue des deux années de préparation, et restent donc naturellement au programme de seconde année TPC.

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.

Nature et méthodes	Capacités exigibles
1. Mesures de longueurs et d'angles Caractéristiques spatiales d'un émetteur (ondes lumineuses, ondes acoustiques, ondes centimétriques...)	Construire l'indicatrice de rayonnement. Étudier la dépendance par rapport à la distance au récepteur.
2. Mesures de temps et de fréquences Fréquence ou période : <ul style="list-style-type: none"> • Mesure indirecte : par comparaison avec une fréquence connue voisine, en utilisant une détection synchrone. Analyse spectrale.	Réaliser une détection synchrone élémentaire à l'aide d'un multiplieur et d'un passe-bas simple adapté à la mesure. Mettre en évidence le phénomène de repliement du spectre provoqué par l'échantillonnage avec un oscilloscope numérique ou une carte d'acquisition. Choisir les paramètres d'une acquisition numérique destinée à une analyse spectrale afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon, tout en optimisant la résolution spectrale.

<p>3. Électricité Élaborer un signal électrique analogique :</p> <ul style="list-style-type: none"> • modulé en fréquence 	<p>Utiliser la fonction de commande externe de la fréquence d'un GBF par une tension (VCF).</p>
<p>4. Optique</p> <p>Analyser une lumière complètement polarisée.</p> <p>Étudier la cohérence temporelle d'une source.</p> <p>Mesurer une faible différence de nombre d'onde : doublet spectral, modes d'une diode laser.</p>	<p>Identifier de façon absolue l'axe d'un polariseur par une méthode mettant en œuvre la réflexion vitreuse</p> <p>Identifier les lignes neutres d'une lame quart d'onde ou demi-onde, sans distinction entre axe lent et rapide.</p> <p>Modifier la direction d'une polarisation rectiligne.</p> <p>Obtenir une polarisation circulaire à partir d'une polarisation rectiligne, sans prescription sur le sens de rotation.</p> <p>Mesurer un pouvoir rotatoire naturel.</p> <p>Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue par une démarche autonome non imposée.</p> <p>Obtenir une estimation semi-quantitative de la longueur de cohérence d'une radiation à l'aide d'un interféromètre de Michelson en lame d'air.</p> <p>Réaliser la mesure avec un interféromètre de Michelson.</p>
<p>5. Mécanique</p> <p>Mesurer un moment d'inertie.</p> <p>Mesurer un coefficient de tension superficielle.</p>	<p>Repérer la position d'un centre de masse et mesurer un moment d'inertie à partir d'une période et de l'application de la loi d'Huygens fournie.</p>

Partie 3 : Formation disciplinaire

1. Optique

Présentation

Le programme de TPC2 s'inscrit dans la continuité de la rubrique « signaux physiques » du programme de TPC1. Dans la partie 1 on introduit les éléments spécifiques à l'émission, la propagation et la détection des ondes lumineuses. Puis les parties 2-4 traitent essentiellement des interférences lumineuses avec un cheminement naturel du simple au compliqué : partant des trous d'Young éclairés par une source ponctuelle strictement monochromatique, on étudie ensuite l'évolution de la visibilité sous l'effet d'un élargissement spatial et spectral de la source. Le brouillage des franges précédentes sous l'effet d'un élargissement spatial conduit à montrer un des avantages de l'interféromètre de Michelson éclairé par une source étendue (franges d'égale inclinaison et franges d'égale épaisseur) en constatant expérimentalement l'existence d'un lieu de localisation des franges. L'objectif de cette partie

n'est pas le calcul d'intensités de la lumière : on exploite le plus souvent les variations de l'ordre d'interférences (avec la position du point d'observation, la position du point source et la longueur d'onde) pour interpréter les observations sans expliciter l'intensité de la lumière.

L'analyse de Fourier joue un rôle important dans cette partie, d'une part dans le domaine temporel pour décomposer une onde réelle en ondes monochromatiques et d'autre part dans le domaine spatial pour décomposer le coefficient de transmission d'une mire en un fond continu plus une somme de fonctions sinusoïdales. Comme dans l'ensemble du programme de TPC2 on se limite à une approche semi-quantitative. Il s'agit exclusivement :

- de décomposer un signal en composantes sinusoïdales sans chercher à expliciter les amplitudes et phases de ces composantes ;
- d'utiliser le fait que le spectre d'un signal périodique de fréquence f est constitué des fréquences nf avec n entier ;
- d'utiliser la relation en ordre de grandeur entre la largeur spectrale « utile » ($\Delta\omega$ ou Δk_x) et l'étendue caractéristique d'un signal non périodique (Δt ou Δx).

Objectifs généraux de formation

- Faire le lien entre des descriptions complémentaires en termes de rayons lumineux et en termes d'ondes ;
- utiliser les propriétés d'un récepteur de lumière pour distinguer ce qui est accessible directement à la mesure en optique (intensité, déphasage entre deux ondes) et ce qui ne l'est pas (phase d'une onde) ;
- utiliser l'analyse de Fourier et exploiter la notion de spectre ; transposer ces notions du domaine temporel au domaine spatial ;
- prendre conscience des enjeux métrologiques en mesurant à l'échelle humaine des grandeurs temporelles et spatiales du domaine microscopique ;
- prendre conscience de l'existence de phénomènes aléatoires (temps de cohérence d'une radiation émise par une source).

La partie 1 introduit les outils nécessaires. La réponse des récepteurs est environ proportionnelle à la moyenne du carré du champ électrique de l'onde. Le programme utilise uniquement le mot « intensité » pour décrire la grandeur détectée mais on peut utiliser indifféremment les mots « intensité » et « éclairement » sans chercher à les distinguer à ce niveau de formation. La loi de Malus (orthogonalité des rayons lumineux et des surfaces d'ondes dans l'approximation de l'optique géométrique) est admise. Dans le cadre de l'optique, on qualifiera de plane ou sphérique une onde par référence à la forme des surfaces d'ondes.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Modèle scalaire des ondes lumineuses	
<p>α) Modèle de propagation dans l'approximation de l'optique géométrique.</p> <p>Chemin optique. Déphasage dû à la propagation.</p> <p>Surfaces d'ondes. Loi de Malus.</p> <p>Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.</p>	<p>Associer la grandeur scalaire de l'optique à une composante d'un champ électrique.</p> <p>Exprimer le retard de phase en un point en fonction du retard de propagation ou du chemin optique.</p> <p>Utiliser l'égalité des chemins optiques sur les rayons d'un point objet à son image.</p> <p>Associer une description de la formation des images en termes de rayon lumineux et en termes de surfaces d'onde.</p>
<p>β) Modèle d'émission. Approche expérimentale de la longueur de cohérence temporelle. Relation entre le</p>	<p>Classifier différentes sources lumineuses (lampe spectrale basse pression, laser, source de lumière blanche...) en fonction du temps de cohérence de</p>

<p>temps de cohérence et la largeur spectrale.</p> <p>χ) Récepteurs. Intensité.</p>	<p>leurs diverses radiations et connaître quelques ordres de grandeur des longueurs de cohérence temporelle associées. Utiliser la relation $\Delta f \cdot \Delta t \approx 1$ pour relier le temps de cohérence et la largeur spectrale $\Delta \lambda$ de la radiation considérée.</p> <p>Relier l'intensité à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique.</p> <p>Citer le temps de réponse de l'œil. Choisir un récepteur en fonction de son temps de réponse et de sa sensibilité fournis.</p>
---	---

Notions et contenus	Capacités exigibles
2. Superposition d'ondes lumineuses	
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi$. Contraste.	Établir la formule de Fresnel. Citer la formule de Fresnel et justifier son utilisation par la cohérence des deux ondes. Associer un bon contraste à des intensités I_1 et I_2 voisines.
Superposition de deux ondes incohérentes entre elles.	Justifier et utiliser l'additivité des intensités.
Superposition de N ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique dans le cas $N \gg 1$.	Utiliser un grapheur pour discuter l'influence de N sur la finesse sans calculer explicitement l'intensité sous forme compacte. Utiliser la construction de Fresnel pour établir la condition d'interférences constructives et la demi-largeur $2\pi/N$ des franges brillantes.

Dans la partie 3, les trous d'Young permettent de confronter théorie et expérience. En revanche, les fentes d'Young sont abordées de manière exclusivement expérimentale. Aucun autre interféromètre à division du front d'onde n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young	
Trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source ponctuelle à grande distance finie et observation à grande distance finie. Champ d'interférences. Ordre d'interférences p .	Savoir que les franges ne sont pas localisées. Définir, déterminer et utiliser l'ordre d'interférences.
Variations de p avec la position du point d'observation ; franges d'interférences.	Interpréter la forme des franges observées sur un écran éloigné parallèle au plan contenant les trous d'Young.
Comparaison entre deux dispositifs expérimentaux : trous d'Young et fentes d'Young.	Confronter les deux dispositifs : analogies et différences.
Variation de p par rajout d'une lame à faces parallèles sur un des trajets.	Interpréter la modification des franges
Variations de p avec la position d'un point source ; perte de contraste par élargissement spatial de la source.	Utiliser le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $ \Delta p > 1/2$ (où $ \Delta p $ est évalué sur la moitié de l'étendue spatiale de la source) pour interpréter

Variations de p avec la longueur d'onde. Perte de contraste par élargissement spectral de la source.	des observations expérimentales. Utiliser le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $ \Delta p > 1/2$ (où $ \Delta p $ est évalué sur la moitié de l'étendue spectrale de la source) pour interpréter des observations expérimentales. Relier la longueur de cohérence, $\Delta\lambda$ et λ en ordre de grandeur.
Observations en lumière blanche (blanc d'ordre supérieur, spectre cannelé).	Déterminer les longueurs d'ondes des cannelures.
Généralisation au montage de Fraunhofer : trous d'Young ; ensemble de N trous alignés équidistants.	Confronter ce modèle à l'étude expérimentale du réseau plan.

Dans la partie 4, l'étude de l'interféromètre de Michelson en lame d'air permet de confronter théorie et expérience. En revanche, l'étude de l'interféromètre de Michelson en coin d'air est abordée de manière exclusivement expérimentale. Pour la modélisation d'un interféromètre de Michelson on suppose la séparatrice infiniment mince.

Notions et contenus	Capacités exigibles
4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson	
a) Interféromètre de Michelson équivalent à une lame d'air éclairée par une source spatialement étendue. Localisation (constatée) des franges. Franges d'égale inclinaison.	Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation. Établir et utiliser l'expression de l'ordre d'interférence en fonction de l'épaisseur de la lame, l'angle d'incidence et la longueur d'onde. Mesurer l'écart $\Delta\lambda$ d'un doublet et la longueur de cohérence d'une radiation. Interpréter les observations en lumière blanche.
b) Interféromètre de Michelson équivalent à un coin d'air éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (constatée) des franges. Franges d'égale épaisseur.	Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation. Admettre et utiliser l'expression de la différence de marche en fonction de l'épaisseur pour exprimer l'ordre d'interférences. Analyser un objet (miroir déformé, lame de phase introduite sur un des trajets, etc). Interpréter les observations en lumière blanche.

La partie 5 est essentiellement expérimentale.

Notions et contenus	Capacités exigibles
5. Onde transmise par un objet diffractant plan éclairé par une onde plane sous incidence normale.	
Réseau unidimensionnel d'extension infinie de coefficient de transmission $t(X)$ sinusoïdal et de pas supérieur à la longueur d'onde. Plan de Fourier.	Construire l'onde transmise par superposition de trois ondes planes définies par la condition aux limites sur le réseau. Interpréter les observations dans le plan de Fourier.
Mire unidimensionnelle d'extension latérale infinie de N traits parallèles équidistants. Fréquence spatiale.	Relier une fréquence spatiale du spectre de la mire à la position d'un point du plan de Fourier. Relier l'amplitude de l'onde en ce point à la composante du spectre de Fourier

	<p>correspondant.</p> <p>Interpréter les observations dans le plan de Fourier.</p>
<p>Fente rectiligne de coefficient de transmission uniforme.</p>	<p>Relier une fréquence spatiale du spectre de la fente à la position d'un point du plan de Fourier. Relier l'amplitude de l'onde en ce point à la composante du spectre de Fourier correspondant.</p> <p>Interpréter les observations dans le plan de Fourier.</p> <p>Faire le lien avec la relation $\sin \theta = \lambda/a$ vue en première année.</p>
<p>Filtrage optique</p>	<p>Utiliser l'analyse de Fourier pour interpréter les effets d'un filtrage de fréquences spatiales dans le plan de Fourier.</p>

2. Thermodynamique

Présentation

Le programme de thermodynamique de TPC2 s'inscrit dans le prolongement du programme de TPC1 : les principes de la thermodynamique peuvent être désormais écrits sous forme infinitésimale $dU+dE = \delta W+\delta Q$ et $dS = \delta S_e + \delta S_c$ pour un système évoluant entre deux instants t et $t+dt$ infiniment proches, d'une part dans le cadre de l'étude des machines thermiques avec écoulement en régime stationnaire et d'autre part dans le cadre de l'étude de la diffusion thermique. Les expressions des variations infinitésimales dU et dS en fonction des variables d'état doivent être fournies pour les systèmes envisagés.

Lors de l'étude de la diffusion de particules on néglige la convection. La mise en équation de la diffusion thermique est limitée au cas des solides ; on peut utiliser les résultats ainsi établis dans des fluides en l'absence de convection en affirmant la généralisation des équations obtenues dans les solides.

Cette rubrique contribue à asseoir la maîtrise des opérateurs d'analyse vectorielle (gradient, divergence, laplacien) mais le formalisme doit rester au deuxième plan. Les mises en équations locales sont faites exclusivement sur des géométries cartésiennes unidimensionnelles. On admet ensuite les formes générales des équations en utilisant les opérateurs d'analyse vectorielle, ce qui permet de traiter des problèmes dans d'autres géométries en fournissant les expressions de la divergence et du laplacien.

Enfin, aucune connaissance sur les solutions d'une équation de diffusion ne figure au programme. La loi phénoménologique de Newton à l'interface entre un solide et un fluide peut être utilisée dès lors qu'elle est fournie.

Objectifs généraux de formation

Le cours de thermodynamique de TPC2 permet une révision du cours de thermodynamique de TPC1 et contribue à asseoir les compétences correspondantes. Au-delà, l'étude des phénomènes de diffusion contribue à la formation générale en physique des milieux continus en introduisant des outils formels puissants (divergence, laplacien) dans un contexte concret. Les compétences développées sont :

- réaliser des bilans sous forme globale et locale ;
- manipuler des équations aux dérivées partielles (analyse en ordre de grandeur, conditions initiales, conditions aux limites) ;

- mettre en évidence l'analogie entre les différentes équations locales traduisant le bilan d'une grandeur scalaire extensive ;
- mettre en évidence un squelette algébrique commun à plusieurs phénomènes physiques ;
- utiliser les trois échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique ;
- distinguer une loi phénoménologique et une loi universelle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Systèmes ouverts en régime stationnaire	
Premier et deuxième principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire, dans le seul cas d'un écoulement unidimensionnel dans la section d'entrée et la section de sortie.	Établir les relations $\Delta h + \Delta e = w_u + q$ et $\Delta s = s_e + s_c$ et les utiliser pour étudier des machines thermiques réelles à l'aide de diagrammes thermodynamiques (T,s) et (P,h).

Notions et contenus	Capacités exigibles
2.1 Diffusion de particules	
Vecteur densité de flux de particules \mathbf{j}_N .	Exprimer le nombre de particules traversant une surface en utilisant le vecteur \mathbf{j}_N .
Bilans de particules.	Utiliser la notion de flux pour traduire un bilan global de particules. Établir une équation traduisant un bilan local dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne, éventuellement en présence de sources internes. Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence et son expression fournie.
Loi de Fick.	Utiliser la loi de Fick. Citer l'ordre de grandeur d'un coefficient de diffusion dans un gaz dans les conditions usuelles.
Régimes stationnaires.	Utiliser la conservation du flux sous forme locale ou globale en l'absence de source interne.
Équation de diffusion en l'absence de sources internes.	Établir une équation de la diffusion dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur laplacien et son expression fournie. Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
2.2 Diffusion thermique	
Vecteur densité de flux thermique \mathbf{j}_q	Exprimer le flux thermique à travers une surface en utilisant le vecteur \mathbf{j}_q .
Premier principe de la thermodynamique.	Utiliser le premier principe dans le cas d'un milieu solide pour établir une équation locale dans le cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne, éventuellement en présence de sources internes. Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence et son expression fournie.

Loi de Fourier.	Utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, béton, acier.
Régimes stationnaires. Résistance thermique.	Utiliser la conservation du flux sous forme locale ou globale en l'absence de source interne. Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique. Exprimer une résistance thermique dans le cas d'un modèle unidimensionnel en géométrie cartésienne. Utiliser des associations de résistances thermiques.
Équation de la diffusion thermique en l'absence de sources internes.	Établir une équation de la diffusion dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur laplacien et son expression fournie. Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle. Utiliser la relation de Newton $\delta Q = h(T_s - T_a)dSdt$ fournie comme condition aux limites à une interface solide-fluide.

3. Mécanique

Présentation

Le programme de mécanique de TPC2 s'inscrit dans le prolongement des rubriques « mécanique » et « statique des fluides » du programme de TPC1 : il est constitué de deux sous-parties, l'une consacrée à la dynamique de rotation autour d'un axe fixe et l'autre à l'étude des fluides en mouvement.

Objectifs généraux de formation

Le cours de mécanique de TPC2 vise à satisfaire aux objectifs de formation suivants :

- réinvestir les capacités méthodologiques acquises en mécanique du point pour étudier une situation de dynamique de rotation autour d'un axe fixe ;
- conduire des bilans pour étudier un solide mobile autour d'un axe fixe d'une part du point de vue de sa dynamique et d'autre part du point de vue énergétique ;
- décrire et expliquer certaines caractéristiques d'un fluide en écoulement ;
- définir des grandeurs locales ;
- manipuler des équations aux dérivées partielles (analyse en ordre de grandeur, conditions aux limites).

Dans la partie 1, l'étude du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe gardant une direction fixe dans un référentiel galiléen mais pour lequel l'axe de rotation ne serait pas fixe est exclue.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Solide en rotation autour d'un axe fixe	
1.1 Loi du moment cinétique	
Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un point et par rapport à un axe orienté.	Relier la direction et le sens du vecteur moment cinétique aux caractéristiques du mouvement.

Moment cinétique d'un système discret de points par rapport à un axe orienté.	Maîtriser le caractère algébrique du moment cinétique scalaire.
Généralisation au cas du solide en rotation autour d'un axe : moment d'inertie.	Exploiter la relation pour le solide entre le moment cinétique scalaire, la vitesse angulaire de rotation et le moment d'inertie fourni. Relier qualitativement le moment d'inertie à la répartition des masses.
Moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté. Couple. Liaison pivot. Notions simples sur les moteurs ou freins dans les dispositifs rotatifs.	Calculer le moment d'une force par rapport à un axe orienté en utilisant le bras de levier. Définir un couple. Définir une liaison pivot et justifier le moment qu'elle peut produire. Savoir qu'un moteur ou un frein contient nécessairement un stator pour qu'un couple puisse s'exercer sur le rotor.
Loi du moment cinétique en un point fixe dans un référentiel galiléen.	Reconnaître les cas de conservation du moment cinétique.
Loi scalaire du moment cinétique appliquée au solide en rotation autour d'un axe fixe orienté dans un référentiel galiléen.	
Pendule de torsion.	Établir l'équation du mouvement. Expliquer l'analogie avec l'équation de l'oscillateur harmonique. Établir une intégrale première du mouvement.
Pendule pesant.	Établir l'équation du mouvement. Expliquer l'analogie avec l'équation de l'oscillateur harmonique. Établir une intégrale première du mouvement. Approche numérique : Utiliser les résultats fournis par un logiciel de résolution numérique ou des simulations pour mettre en évidence le non isochronisme des oscillations.
Notions et contenus	Capacités exigibles
1.2 Approche énergétique du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté, dans un référentiel galiléen	
Énergie cinétique d'un solide en rotation.	Utiliser la relation $E_c = \frac{I}{2} J_A \omega^2$, l'expression de J_A étant fournie.
Loi de l'énergie cinétique pour un solide.	Établir l'équivalence dans ce cas entre la loi scalaire du moment cinétique et celle de l'énergie cinétique.

La partie 2, fluides en mouvement, étudie le transport de masse dans les fluides en écoulement. Son objectif est d'introduire les grandeurs pertinentes caractérisant un écoulement, en cohérence avec les autres phénomènes de transport. Il ne s'agit pas ici d'établir les équations d'Euler ou de Navier-Stokes, en particulier, l'expression de l'accélération comme la dérivée particulaire de la vitesse est hors programme.

La notion de viscosité est introduite sur un exemple d'écoulement de cisaillement simple. Le nombre de Reynolds est présenté comme un nombre sans dimension permettant de caractériser le régime

d'écoulement. Il est exploité afin d'évoquer les propriétés de similitude entre des systèmes réalisés à des échelles différentes et caractérisés par les mêmes nombres sans dimension.

Notions et contenus	Capacités exigibles
2. Fluides en écoulement	
2.1. Débits et lois de conservation	
Particule de fluide.	Définir la particule de fluide comme un système mésoscopique de masse constante.
Vitesse de la particule de fluide.	Distinguer vitesse microscopique et vitesse mésoscopique.
Masse volumique μ , vecteur densité de courant de masse $\mu \mathbf{v}$.	Citer des ordres de grandeur des masses volumiques de l'eau et de l'air dans les conditions usuelles.
Débit massique.	Définir le débit massique et l'écrire comme le flux du vecteur $\mu \mathbf{v}$ à travers une surface orientée.
Conservation de la masse.	Écrire les équations bilans, globale ou locale, traduisant la conservation de la masse.
Écoulement stationnaire.	Définir un écoulement stationnaire et les notions de ligne de courant et de tube de courant de masse. Exploiter la conservation du débit massique.
Écoulement incompressible et homogène.	Définir un écoulement incompressible et homogène par un champ de masse volumique constant et uniforme. Relier cette propriété à la conservation du volume pour un système fermé.
Débit volumique.	Définir le débit volumique et l'écrire comme le flux de \mathbf{v} à travers une surface orientée. Justifier la conservation du débit volumique le long d'un tube de courant indéformable.
2.2 Actions de contact sur un fluide	
Pression.	Identifier la force de pression comme étant une action normale à la surface. Utiliser l'équivalent volumique des actions de pression $-\mathbf{grad}(P)$.
Viscosité dynamique pour un fluide newtonien.	Relier l'expression de la force surfacique de viscosité au profil de vitesse dans le cas d'un écoulement parallèle unidimensionnel et incompressible. Exprimer la dimension du coefficient de viscosité dynamique. Citer l'ordre de grandeur du coefficient de viscosité dynamique de l'eau. Citer la condition d'adhérence à l'interface fluide-solide.
Coefficient de tension superficielle.	Mesurer un coefficient de tension superficielle. Utiliser l'expression de l'énergie de tension superficielle pour interpréter un protocole expérimental.
2.3 Écoulement interne incompressible et homogène dans une conduite cylindrique	
Écoulements laminaire, turbulent.	Décrire les différents régimes d'écoulement (laminaire et turbulent).
Vitesse débitante.	Relier le débit volumique à la vitesse débitante.
Nombre de Reynolds.	Interpréter le nombre de Reynolds comme un paramètre adimensionné caractérisant le régime

	d'écoulement. Évaluer le nombre de Reynolds et l'utiliser pour caractériser le régime d'écoulement.
Chute de pression dans une conduite horizontale. Résistance hydraulique.	Dans le cas d'un écoulement à faible nombre de Reynolds, établir la loi de Hagen-Poiseuille et en déduire la résistance hydraulique. Exploiter le graphe de la chute de pression en fonction du nombre de Reynolds, pour un régime d'écoulement quelconque. Exploiter un paramétrage adimensionné permettant de transposer des résultats expérimentaux ou numériques sur des systèmes similaires réalisés à des échelles différentes.
2.4 Écoulement externe incompressible et homogène autour d'un obstacle	
Force de traînée subie par une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme. Coefficient de traînée C_x ; graphe de C_x en fonction du nombre de Reynolds. Notion de couche limite. Forces de traînée et de portance d'une aile d'avion à haut nombre de Reynolds.	Associer une gamme de nombre de Reynolds à un modèle de traînée linéaire ou un modèle quadratique. Pour les écoulements à grand nombre de Reynolds décrire qualitativement la notion de couche limite. Définir et orienter les forces de portance et de traînée. Exploiter les graphes de C_x et C_z en fonction de l'angle d'incidence.

4. Électromagnétisme

Présentation

L'électromagnétisme a été étudié en TPC1 dans un domaine restreint (induction électromagnétique et forces de Laplace) et sans le support des équations locales. Le programme de TPC2 couvre en revanche tout le spectre des fréquences, des régimes stationnaires jusqu'aux phénomènes de propagation en passant par les régimes quasi-stationnaires et prend appui sur les équations locales (équation de conservation de la charge et équations de Maxwell). Le programme est découpé en rubriques indépendantes dont l'ordre de présentation relève de la liberté pédagogique du professeur. De nombreuses approches sont possibles, y compris en fractionnant les parties. Les phénomènes de propagation sont étudiés essentiellement dans le cadre de la rubrique Physique des ondes du programme : l'articulation entre les parties Électromagnétisme et Physique des ondes relève elle aussi de la liberté pédagogique.

Toute étude de distributions de courants superficiels est exclue. La modélisation superficielle d'une distribution de charges est strictement limitée à la modélisation du condensateur plan par deux plans infinis uniformément chargés : on fait remarquer la discontinuité du champ à la traversée d'une nappe de charges superficielles mais les relations de passage ne figurent pas au programme.

S'agissant des potentiels, on se limite à introduire le potentiel scalaire en électrostatique et à faire remarquer que le champ électrique ne dérive pas d'un potentiel scalaire en régime variable.

L'apprentissage de l'électromagnétisme contribue à la maîtrise progressive des opérateurs d'analyse vectorielle qui sont utilisés par ailleurs en thermodynamique et en mécanique des fluides. Quel que soit l'ordre dans lequel le professeur choisit de présenter ces parties, il convient d'introduire ces opérateurs en insistant sur le contenu physique sous-jacent.

L'étude de l'électromagnétisme n'est pas centrée sur les calculs de champs : ceux-ci se limitent donc à des calculs motivés par des applications pratiques d'intérêt évident. La recherche des lignes de champs d'un champ donné est traitée exclusivement à l'aide de logiciels d'intégration numérique.

Objectifs généraux de formation

- Découper un système en éléments infinitésimaux et sommer des grandeurs physiques (champs créés, forces subies).
- Exploiter des cartes de lignes de champ fournies.
- Exploiter des propriétés de symétries.
- Manipuler des ordres de grandeur allant du microscopique au macroscopique.
- Distinguer les champs de vecteurs à flux conservatif et les champs de vecteurs à circulation conservative.
- Manipuler des modèles (dipôles, condensateur plan, solénoïde long, etc.)

La partie 1 étudie les sources du champ électromagnétique dans l'approximation des milieux continus. Par ailleurs il convient de souligner et d'exploiter les analogies formelles avec les autres théories de champ : diffusion de particules, diffusion thermique, mécanique des fluides.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Sources du champ électromagnétique	
1.1 Description microscopique et mésoscopique des sources	
Densité volumique de charges. Charge traversant un élément de surface fixe et vecteur densité de courant. Intensité du courant.	Exprimer ρ et \mathbf{j} en fonction de la vitesse moyenne des porteurs de charge, de leur charge et de leur densité volumique. Relier l'intensité du courant et le flux de \mathbf{j} .
1.2 Conservation de la charge	
Équation locale de conservation de la charge. Conséquences en régime stationnaire.	Établir l'équation traduisant la conservation de la charge dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Citer et utiliser une généralisation (admise) en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence, son expression étant fournie. Exploiter le caractère conservatif du vecteur \mathbf{j} en régime stationnaire. Relier ces propriétés aux lois usuelles de l'électrocinétique.
1.3 Conduction électrique dans un conducteur ohmique	
Loi d'Ohm locale dans un métal fixe, l'action de l'agitation thermique et des défauts du réseau fixe étant décrite par une force phénoménologique de la forme $-m\mathbf{v}/\tau$ Conductivité électrique. Résistance d'une portion de conducteur filiforme. Approche descriptive de l'effet Hall. Effet thermique du courant électrique : loi de Joule locale.	Déduire du modèle un ordre de grandeur de τ et en déduire un critère de validité du modèle en régime variable. Déduire du modèle un ordre de grandeur de v et en déduire un critère pour savoir s'il convient de prendre en compte un éventuel champ magnétique. Interpréter qualitativement l'effet Hall dans une géométrie rectangulaire. Exprimer la puissance volumique dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique.

La partie 2 étudie les lois de l'électrostatique et quelques applications. Les calculs de champs doivent être motivés par l'utilisation de ces champs pour étudier des situations d'intérêt pratique évident. Ces calculs ne s'appuient sur la loi de Coulomb que pour des distributions de charges discrètes. Dans le cas des distributions continues, on se limite aux situations de haute symétrie permettant de calculer le champ par le théorème de Gauss et aux superpositions de champs ainsi obtenus.

Notions et contenus	Capacités exigibles
2. Electrostatique	
2.1 Champ électrostatique	
<p>Loi de Coulomb. Champ et potentiel électrostatiques créés par une charge ponctuelle : relation $\mathbf{E} = -\text{grad } V$. Principe de superposition.</p> <p>Circulation conservative du champ électrique et signification physique : énergie potentielle d'une charge q dans un champ \mathbf{E}.</p> <p>Équation locale $\text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{0}$.</p> <p>Propriétés de symétrie.</p> <p>Théorème de Gauss et équation locale $\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$.</p> <p>Propriétés topographiques.</p>	<p>Citer l'ordre de grandeur du champ créé par le noyau sur l'électron dans un atome d'hydrogène.</p> <p>Associer la circulation de \mathbf{E} au travail de la force $q\mathbf{E}$.</p> <p>Utiliser le théorème de Stokes. Associer les propriétés locales $\text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{0}$ dans tout l'espace et $\mathbf{E} = -\text{grad } V$.</p> <p>Associer la relation $\mathbf{E} = -\text{grad } V$ au fait que les lignes de champ sont orthogonales aux surfaces équipotentielles et orientées dans le sens des potentiels décroissants.</p> <p>Exploiter les propriétés de symétrie des sources (translation, rotation, symétrie plane, conjugaison de charges) pour prévoir des propriétés du champ créé.</p> <p>Choisir une surface adaptée et utiliser le théorème de Gauss.</p> <p>Justifier qu'une carte de lignes de champs puisse ou non être celle d'un champ électrostatique ; repérer d'éventuelles sources du champ et leur signe. Associer l'évolution de la norme de \mathbf{E} à l'évasement des tubes de champ loin des sources. Dédire les lignes équipotentielles d'une carte de champ électrostatique, et réciproquement. Évaluer le champ électrique à partir d'un réseau de lignes équipotentielles.</p>
2.2 Exemples de champs électrostatiques	
<p>Dipôle électrostatique. Moment dipolaire.</p> <p>Potentiel et champ créés.</p> <p>Actions subies par un dipôle placé dans un champ électrostatique d'origine extérieure : résultante et moment.</p>	<p>Décrire les conditions de l'approximation dipolaire.</p> <p>Établir l'expression du potentiel V. Comparer la décroissance avec la distance du champ et du potentiel dans le cas d'une charge ponctuelle et dans le cas d'un dipôle. Tracer l'allure des lignes de champ.</p> <p>Utiliser les expressions fournies de l'énergie potentielle E_p, de la résultante \mathbf{F} et du moment \mathbf{M}.</p>

Énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure. Approche descriptive des interactions ion-molécule et molécule-molécule. Dipôle induit. Polarisabilité.	Prévoir qualitativement l'évolution d'un dipôle dans un champ d'origine extérieure \mathbf{E} . Expliquer qualitativement la solvatation des ions dans un solvant polaire. Expliquer qualitativement pourquoi l'énergie d'interaction entre deux molécules polaires n'est pas en $1/r^3$. Exprimer la polarisabilité d'un atome en utilisant le modèle de Thomson. Associer la polarisabilité et le volume de l'atome en ordre de grandeur.
Plan infini uniformément chargé en surface. Condensateur plan modélisé par deux plans parallèles portant des densités superficielles de charges opposées et uniformes. Capacité. Densité volumique d'énergie électrostatique.	Établir l'expression du champ créé. Établir l'expression du champ créé. Déterminer la capacité du condensateur. Citer l'ordre de grandeur du champ disruptif dans l'air. Associer l'énergie d'un condensateur apparue en électrocinétique à une densité volumique d'énergie.

La partie 3 se consacre à l'étude du champ magnétique en régime stationnaire en prenant appui sur les équations locales : la loi de Biot et Savart ne figure pas au programme. L'objectif est davantage l'étude des propriétés du champ magnétique que le calcul de champs magnétiques : ceux-ci doivent donc se limiter à des situations d'intérêt pratique évident. Pour nourrir cette rubrique en applications on utilise les forces de Laplace et de Lorentz étudiées en TPC1. Enfin, la notion de potentiel-vecteur est hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
3. Magnétostatique	
3.1 Champ magnétostatique	
Équations locales de la magnétostatique et formes intégrales : flux conservatif et théorème d'Ampère. Linéarité des équations.	Choisir un contour, une surface et les orienter pour appliquer le théorème d'Ampère. Utiliser une méthode de superposition.
Propriétés de symétrie. Propriétés topographiques.	Exploiter les propriétés de symétrie des sources (rotation, symétrie plane, conjugaison de charges) pour prévoir des propriétés du champ créé. Justifier qu'une carte de lignes de champs puisse ou non être celle d'un champ magnétostatique ; repérer d'éventuelles sources du champ et leur signe/sens. Associer l'évolution de la norme de \mathbf{B} à l'évasement des tubes de champ.
3.2 Exemples de champs magnétostatiques	
Câble rectiligne « infini ». Limite du fil rectiligne infini.	Déterminer le champ créé par un câble rectiligne infini. Calculer et connaître le champ créé par un fil rectiligne infini. Utiliser ces modèles près d'un circuit filiforme réel.
Solénoïde long sans effets de bords.	Calculer et connaître le champ à l'intérieur, la nullité du champ extérieur étant admise.
Inductance propre. Densité volumique	Établir les expressions de l'inductance propre et de

d'énergie magnétique.	l'énergie d'une bobine modélisée par un solénoïde. Associer cette énergie à une densité d'énergie volumique.
3.3 Dipôles magnétostatiques	
Moment magnétique d'une boucle de courant plane.	Définir le moment magnétique associé à une boucle de courant plane. Utiliser un modèle planétaire pour relier le moment magnétique d'un atome d'hydrogène à son moment cinétique. Par analogie avec une boucle de courant, associer à un aimant un moment magnétique. Connaître un ordre de grandeur du moment magnétique associé à un aimant usuel.
Rapport gyromagnétique de l'électron. Magnéton de Bohr.	Construire en ordre de grandeur le magnéton de Bohr par analyse dimensionnelle. Interpréter sans calculs les sources microscopiques du champ magnétique. Évaluer l'ordre de grandeur maximal du moment magnétique volumique d'un aimant permanent.
Ordre de grandeur de la force surfacique d'adhérence entre deux aimants permanents identiques en contact.	Obtenir l'expression de la force surfacique d'adhérence par analyse dimensionnelle.
Actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure : résultante et moment. Énergie potentielle d'un dipôle magnétique rigide placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.	Utiliser des expressions fournies. Approche documentaire de l'expérience de Stern et Gerlach : expliquer sans calculs les résultats attendus dans le cadre de la mécanique classique ; expliquer les enjeux de l'expérience.

La partie 4 présente les équations de Maxwell en régime dépendant du temps. La notion de potentiel-vecteur est hors-programme mais on insiste sur le fait que le champ électrique ne dérive pas en général d'un potentiel scalaire. L'étude détaillée des ondes électromagnétiques qui prolonge cette partie est placée dans la partie Physique des ondes. On ne mentionne ici les phénomènes de propagation que pour les négliger dans le cadre des régimes lentement variables. Le cadre adopté est celui de l'ARQS « magnétique » où les effets des distributions de courants dominent ceux des distributions de charges.

Notions et contenus	Capacités exigibles
4. Équations de Maxwell	
4.1 Postulats de l'électromagnétisme	
Force de Lorentz. Équations locales de Maxwell. Formes intégrales. Compatibilité avec les cas particuliers de l'électrostatique et de la magnétostatique ; compatibilité avec la conservation de la charge.	Utiliser les équations de Maxwell sous forme locale ou intégrale. Faire le lien entre l'équation de Maxwell-Faraday et la loi de Faraday étudiée en TPC1.
Linéarité.	Utiliser une méthode de superposition.

4.2 Aspects énergétiques	
Vecteur de Poynting. Densité volumique d'énergie électromagnétique. Équation locale de Poynting.	Utiliser les grandeurs énergétiques pour faire des bilans d'énergie électromagnétique. Associer le vecteur de Poynting et l'intensité utilisée en optique.
4.3 Validation de l'approximation des régimes quasi-stationnaires « magnétique »	
Équations de propagation des champs E et B dans le vide. Caractère non instantané des interactions électromagnétiques. Relation $\epsilon_0\mu_0c^2=1$.	Établir les équations de propagation. Interpréter c.
ARQS « magnétique ».	Discuter la légitimité du régime quasi-stationnaire. Simplifier les équations de Maxwell et l'équation de conservation de la charge et utiliser les formes simplifiées. Étendre le domaine de validité des expressions des champs magnétiques obtenues en régime stationnaire.

5. Physique des ondes

Présentation

Le programme de physique des ondes de TPC2 s'inscrit dans le prolongement de la partie « signaux physiques » du programme de TPC1 où des propriétés unificatrices (diffraction, interférences, battements...) ont été abordées en s'appuyant sur une approche expérimentale et sans référence à une équation d'onde. Il s'agit désormais de mettre en place l'équation d'onde de D'Alembert en électromagnétisme et en acoustique. On aborde ensuite l'étude de la dispersion, de l'atténuation et de l'absorption associées à des phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants. La propagation d'ondes dans des milieux différents conduit naturellement à étudier la réflexion et la transmission d'ondes à une interface. L'étude de la physique des ondes s'achève par une introduction à la physique quantique.

Objectifs généraux de formation

L'étude de la physique des ondes doit conduire les étudiants à développer, entre autres, les compétences suivantes :

- mettre en évidence les analogies existant entre des phénomènes relevant de domaines de la physique très différents, mais dont le comportement est régi par les mêmes équations aux dérivées partielles ;
- utiliser les ondes planes monochromatiques comme outil privilégié de résolution d'une équation d'onde linéaire, et caractériser celle-ci par une relation de dispersion ;
- choisir de manière pertinente entre des ondes stationnaires (c'est-à-dire dont les variations spatiale et temporelle sont factorisées en représentation réelle) et des ondes progressives ;
- associer les modes propres d'un système confiné à des ondes stationnaires dont les pulsations sont quantifiées ;
- utiliser l'analyse de Fourier et la superposition pour faire le lien entre une solution physique réelle spatialement et temporellement limitée, et des solutions mathématiques élémentaires non réalistes ;
- utiliser des conditions initiales et/ou des conditions aux limites connues pour déterminer la solution d'une équation d'ondes par superposition ;
- linéariser des équations à partir de la manipulation d'ordres de grandeur pertinents associés au phénomène étudié ;

- identifier les principaux types de comportements ondulatoires associés aux domaines asymptotiques d'une relation de dispersion simple (propagation sans déformation, dispersion, absorption, atténuation).

La partie 1 est consacrée à l'étude de phénomènes ondulatoires non dispersifs régis par l'équation d'onde de D'Alembert. Le choix a été fait ici de privilégier les solutions harmoniques dans la résolution pour leur universalité comme solutions adaptées aux équations d'ondes linéaires. Les solutions générales $f(x-ct)$ et $g(x+ct)$ apparaissent ici comme un cas particulier que l'on retrouve par superposition. La méthode de séparation des variables n'est donc pas exigible sur cette partie. S'agissant de la modélisation microscopique des solides, l'objectif est principalement d'établir la loi de Hooke qui sera ensuite utilisée pour mettre en équations les ondes longitudinales dans l'approximation du solide continu. Dans le cadre de la physique des ondes, on qualifiera de plane une onde par référence à sa dépendance spatiale $f(x,t)$.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de D'Alembert	
1.1. Ondes mécaniques unidimensionnelles dans les solides déformables	
Équation d'onde pour des ondes transversales sur une corde vibrante infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements transverses.	Établir l'équation d'onde en utilisant un système infinitésimal.
Modèle microscopique de solide élastique unidimensionnel (chaîne d'atomes élastiquement liés) : loi de Hooke. Ondes acoustiques longitudinales dans une tige solide dans l'approximation des milieux continus.	Relier la raideur des ressorts fictifs à l'énergie de liaison et évaluer l'ordre de grandeur du module d'Young. Établir l'équation d'onde en utilisant un système infinitésimal.
Équation de D'Alembert ; célérité. Exemples de solutions de l'équation de D'Alembert : - ondes progressives harmoniques - ondes stationnaires harmoniques	Reconnaître une équation de D'Alembert. Associer qualitativement la célérité d'ondes mécaniques, la raideur et l'inertie du milieu support. Différencier une onde stationnaire d'une onde progressive par la forme de leur représentation réelle. Utiliser qualitativement l'analyse de Fourier pour décrire une onde non harmonique.
Applications : - régime libre : modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités - régime forcé : résonances sur la corde de Melde.	Décrire les modes propres. En négligeant l'amortissement, associer mode propre et résonance en régime forcé.
1.2. Ondes électromagnétiques dans le vide	
Équations de propagation de E et B dans une région sans charge ni courant. Structure d'une onde plane progressive harmonique.	Établir et citer les équations de propagation. Établir et décrire la structure d'une OPPH. Utiliser le principe de superposition d'OPPH.

<p>Aspects énergétiques.</p> <p>Polarisation des ondes électromagnétiques planes progressives harmoniques : polarisation elliptique, circulaire et rectiligne.</p> <p>Analyse d'une lumière totalement polarisée. Utiliser une lame quart d'onde ou demi-onde pour modifier ou analyser un état de polarisation, avec de la lumière totalement polarisée.</p>	<p>Relier la direction du vecteur de Poynting et la direction de propagation de l'onde. Relier le flux du vecteur de Poynting à un flux de photons en utilisant la relation d'Einstein-Planck. Citer quelques ordres de grandeur de flux énergétiques surfaciques moyens (laser hélium-néon, flux solaire, téléphonie, etc) et les relier aux ordres de grandeur des champs électriques associés.</p> <p>Relier l'expression du champ électrique à l'état de polarisation d'une onde.</p> <p>Reconnaître une lumière non polarisée. Distinguer une lumière non polarisée d'une lumière totalement polarisée.</p>
--	---

La partie 2 est consacrée aux phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants. L'étude est menée sur des ondes harmoniques planes en représentation complexe. On s'appuie soit sur les plasmas localement neutres soit sur les milieux ohmiques. On admet que les DLHI relèvent d'un traitement analogue faisant apparaître l'indice complexe mais aucune modélisation du comportement des DLHI ne figure au programme. On se limite dans tous les cas à des milieux non magnétiques.

<p>2. Phénomènes de propagation linéaires</p> <p>2.1 Ondes électromagnétiques dans les plasmas et dans les métaux</p>	
<p>Interaction entre une onde plane progressive harmonique et un plasma localement neutre sans collisions. Conductivité imaginaire pure. Interprétation énergétique.</p> <p>Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu localement neutre possédant une conductivité complexe : relation de dispersion, indice complexe. Dispersion, absorption.</p> <p>Cas particulier d'une propagation unidirectionnelle dans un plasma sans collisions : onde évanescente dans le domaine réactif ($\omega < \omega_p$) ; absence de propagation de l'énergie en moyenne temporelle.</p>	<p>Décrire le modèle. Construire une conductivité complexe en justifiant les approximations. Associer le caractère imaginaire pur de la conductivité complexe à l'absence de puissance échangée en moyenne temporelle entre le champ et les porteurs de charges.</p> <p>Établir une relation de dispersion pour des ondes planes progressives harmoniques. Associer les parties réelle et imaginaire de k aux phénomènes de dispersion et d'absorption.</p> <p>Reconnaître une onde évanescente (onde stationnaire atténuée).</p> <p>Approche documentaire : à l'aide de données sur l'ionosphère illustrer quelques aspects des télécommunications.</p>

Cas particulier d'un conducteur ohmique de conductivité réelle : effet de peau.	Repérer une analogie formelle avec les phénomènes de diffusion. Connaître l'ordre de grandeur de l'épaisseur de peau du cuivre à 50 Hz.
---	---

La partie 3 est consacrée à la réflexion et la transmission d'ondes électromagnétiques à une interface plane sous incidence normale, dans le cas de milieux non magnétiques. La notion de densité de courants superficiels et les relations de passage du champ électromagnétique ne figurent pas au programme. La notion de conducteur parfait ne figure pas au programme, les conditions aux limites sur la composante normale du champ électrique et la composante tangentielle du champ magnétique doivent être fournies si nécessaire dans un problème.

3. Interfaces entre deux milieux	
Réflexion d'une onde plane progressive harmonique entre deux demi-espaces d'indices complexes \underline{n}_1 et \underline{n}_2 sous incidence normale : coefficients de réflexion et de transmission du champ électrique.	Exploiter la continuité (admise) du champ électromagnétique dans cette configuration pour obtenir l'expression du coefficient de réflexion en fonction des indices complexes.
Cas d'une interface vide-plasma. Coefficients de réflexion et de transmission en puissance.	Distinguer les comportements dans le domaine de transparence et dans le domaine réactif du plasma.
Cas d'une interface vide-conducteur ohmique de conductivité réelle constante.	Établir les expressions des coefficients de réflexion et transmission du champ pour un métal réel. Passer à la limite d'une épaisseur de peau nulle.
Cas d'une interface vide-conducteur ohmique dans le domaine optique visible.	Identifier le comportement du métal dans ce domaine, avec celui d'un plasma localement neutre peu dense en-dessous de sa pulsation de plasma. Associer la forme du coefficient complexe de réflexion à l'absence de propagation d'énergie dans le métal en moyenne temporelle.
Polarisation par réflexion vitreuse sous incidence oblique.	Identifier l'incidence de Brewster et utiliser cette configuration pour repérer la direction absolue d'un polariseur.

La physique quantique fait l'objet de la partie 4. Elle est restreinte à l'étude de systèmes unidimensionnels. Une introduction qualitative est proposée, les concepts essentiels abordés sont la dualité onde-corpuscule, l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde, et les conséquences de l'inégalité de Heisenberg spatiale dans des situations confinées. Cette découverte est suivie d'une présentation plus quantitative, volontairement limitée dans ses ambitions, elle s'insère dans cette partie générale sur les ondes dans la mesure où elle propose une approche ondulatoire simple de la physique quantique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
4.1 Introduction au monde quantique	
Dualité onde-particule pour la lumière et la matière. Relations de Planck-Einstein et de Louis de Broglie.	Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.

	<p>Approche documentaire : décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.</p> <p>Approche documentaire : décrire un exemple d'expérience illustrant la notion d'ondes de matière.</p>
Interprétation probabiliste associée à la fonction d'onde : approche qualitative.	Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes.
Inégalité de Heisenberg spatiale.	À l'aide d'une analogie avec la diffraction des ondes lumineuses, établir l'inégalité en ordre de grandeur : $\Delta p \Delta x \geq \hbar$.
Énergie minimale de l'oscillateur harmonique quantique.	Établir le lien entre confinement spatial et énergie minimale (induit par l'inégalité de Heisenberg spatiale).
4.2 Approche ondulatoire de la mécanique quantique	
Amplitude de probabilité	
Fonction d'onde $\psi(x,t)$ associée à une particule dans un problème unidimensionnel. Densité linéique de probabilité.	Normaliser une fonction d'onde. Faire le lien qualitatif avec la notion d'orbitale en chimie.
Principe de superposition. Interférences.	Relier la superposition de fonctions d'ondes à la description d'une expérience d'interférences entre particules.
Équation de Schrödinger pour une particule libre	
Équation de Schrödinger. États stationnaires.	Utiliser l'équation de Schrödinger fournie. Identifier les états stationnaires aux états d'énergie fixée. Établir et utiliser la relation : $\psi(x,t) = \phi(x) \exp(-iEt/\hbar)$ et l'associer à la relation de Planck-Einstein. Distinguer l'onde associée à un état stationnaire en mécanique quantique d'une onde stationnaire au sens usuel de la physique des ondes. Utiliser l'équation de Schrödinger pour la partie spatiale $\phi(x)$. En exploitant l'expression classique de l'énergie de la particule, associer la relation de dispersion obtenue et la relation de de Broglie.
Équation de Schrödinger dans un puits de potentiel	
Quantification de l'énergie dans un puits de potentiel rectangulaire de profondeur infinie.	Établir les expressions des énergies des états stationnaires. Faire l'analogie avec la recherche des pulsations propres d'une corde vibrante fixée en ses deux extrémités. Retrouver qualitativement l'énergie minimale à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale.
Énergie de confinement quantique.	Associer le confinement d'une particule quantique à une augmentation de l'énergie cinétique.

Appendice 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en appendice 1 du programme de physique de TPC1. Elle regroupe avec celle-ci 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 ces listes lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une introduction guidée suffisamment détaillée.

1. Domaine optique

- Lames quart d'onde, lames demi-onde
- Réseau de coefficient de transmission sinusoïdal
- Interféromètre de Michelson motorisé

2. Domaine électrique

- Générateur de signaux Basse Fréquence avec fonction de commande externe de la fréquence par une tension

Appendice 2 : outils mathématiques

Les outils mathématiques dont la maîtrise est nécessaire à la mise en œuvre du programme de physique TPC2 sont d'une part ceux qui figurent dans l'appendice 2 du programme de TPC1 et d'autre part ceux qui figurent dans la liste ci-dessous.

Le thème « analyse vectorielle » prolonge l'étude de l'outil « gradient » abordée en TPC1 en introduisant de nouveaux opérateurs : seules leurs expressions en coordonnées cartésiennes sont exigibles. Toutes les autres formules utiles (expressions en coordonnées cylindriques ou sphériques, actions sur des produits, combinaisons d'opérateurs, etc) doivent être fournies.

Le thème « analyse de Fourier » prolonge l'étude de l'outil « séries de Fourier » abordée en TPC1 en admettant la décomposition d'une fonction non périodique du temps en une somme continue de fonctions sinusoïdales. De même qu'en TPC1 où le calcul des coefficients d'un développement en série de Fourier est exclu, on ne cherche pas en TPC2 à expliciter le poids relatif et les déphasages relatifs des différentes composantes de Fourier, de telle sorte que la transformée de Fourier n'est pas exigible. On insiste en revanche sur la relation liant en ordre de grandeur la largeur spectrale « utile » ($\Delta\omega$ ou Δk_x) et l'étendue caractéristique d'un signal non périodique (Δt ou Δx).

Dans le thème « équations aux dérivées partielles », aucune méthode générale d'étude n'est exigible : on se limite à chercher des solutions d'une forme donnée par substitution, menant ainsi soit à des équations différentielles classiques, soit à une relation de dispersion.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Calcul différentiel	
Fonctions de plusieurs variables à valeurs réelles. Dérivées partielles. Différentielle. Théorème de Schwarz.	Relier la différentielle et les dérivées partielles premières. Utiliser le théorème de Schwarz (admis).
Intégration de l'expression d'une dérivée partielle.	Intégrer une expression de la forme $\partial f/\partial x=g(x,y)$ à y fixé en introduisant une fonction $\phi(y)$ inconnue comme « constante d'intégration ».

Notions et contenus	Capacités exigibles
2. Analyse vectorielle	
a) gradient	Relier le gradient à la différentielle d'un champ scalaire à t fixé. Exprimer les composantes du gradient en coordonnées cartésiennes.
b) divergence	Citer et utiliser le théorème d'Ostrogradski. Exprimer la divergence en coordonnées cartésiennes.
c) rotationnel	Citer et utiliser le théorème de Stokes. Exprimer le rotationnel en coordonnées cartésiennes.
d) laplacien d'un champ scalaire	Définir $\Delta f = \text{div}(\mathbf{grad} f)$. Exprimer le laplacien en coordonnées cartésiennes.
e) laplacien d'un champ de vecteurs	Exprimer le laplacien d'un champ de vecteurs en coordonnées cartésiennes.
f) cas des champs proportionnels à $\exp(i\omega t - \mathbf{ik} \cdot \mathbf{r})$ ou $\exp(\mathbf{ik} \cdot \mathbf{r} - i\omega t)$	Exprimer l'action des opérateurs d'analyse vectorielle sur un tel champ à l'aide du vecteur \mathbf{ik} .

Notions et contenus	Capacités exigibles
2. Analyse de Fourier	
Synthèse spectrale d'une fonction périodique.	Utiliser un développement en série de Fourier fourni. Utiliser un raisonnement par superposition. Transposer l'analyse de Fourier du domaine temporel au domaine spatial.
Synthèse spectrale d'une fonction non périodique.	Utiliser un raisonnement par superposition. Transposer l'analyse de Fourier du domaine temporel au domaine spatial. Citer et utiliser la relation liant en ordre de grandeur la largeur spectrale « utile » ($\Delta\omega$ ou Δk_x) et l'étendue caractéristique d'un signal non périodique (Δt ou Δx).

Notions et contenus	Capacités exigibles
3. Équations aux dérivées partielles	
Exemples d'équations aux dérivées partielles : équation de Laplace, équation de diffusion, équation de D'Alembert, équation de Schrödinger.	Identifier une équation aux dérivées partielles connue. Transposer une solution familière dans un domaine de la physique à un autre domaine. Obtenir des solutions de forme donnée par substitution. Utiliser des conditions initiales et des conditions aux limites.

Appendice 3 : outils transversaux

La liste ci-dessous explicite un certain nombre d'outils transversaux dont la maîtrise est indispensable au physicien. Leur apprentissage progressif et contextualisé doit amener les étudiants au bout des deux années de CPGE à en faire usage spontanément quel que soit le contexte. S'agissant de l'analyse dimensionnelle, il convient d'éviter tout dogmatisme : en particulier la présentation de la dimension d'une grandeur par le biais de son unité dans le système international est autorisée. S'agissant de la recherche d'une expression par analyse dimensionnelle il ne s'agit en aucun cas d'en faire un exercice de style : en particulier le théorème Pi de Buckingham est hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Analyse de pertinence	
Homogénéité d'une expression.	Contrôler l'homogénéité d'une expression, notamment par référence à des expressions connues.
Caractère scalaire ou vectoriel des grandeurs physiques présentes dans une expression.	Contrôler la compatibilité d'une expression avec le caractère scalaire ou vectoriel des grandeurs mise en jeu.
Caractère infinitésimal ou non infinitésimal des grandeurs physiques présentes dans une expression.	Contrôler la compatibilité d'une expression avec le caractère infinitésimal ou non infinitésimal des grandeurs mise en jeu.
Sens de variation d'une expression par rapport à un paramètre.	Interpréter qualitativement et en faire un test de pertinence.
Limites d'une expression pour des valeurs nulles ou infinies des paramètres.	Tester les limites d'une expression. Interpréter qualitativement ou en faire un test de pertinence.
Nullité d'une expression.	Repérer l'annulation d'une expression pour une valeur particulière d'un paramètre. Interpréter qualitativement ou en faire un test de pertinence.
Divergence d'une expression.	Repérer la divergence d'une expression pour une valeur particulière d'un paramètre. Interpréter qualitativement ou en faire un test de pertinence. Proposer éventuellement des éléments non pris en compte dans le modèle susceptibles de brider la divergence (frottements, non linéarités, etc).

Notions et contenus	Capacités exigibles
2. Calcul numérique.	
Calcul numérique d'une expression.	Calculer sans outil l'ordre de grandeur (puissance de dix) d'une expression simple. Afficher un résultat numérique avec un nombre de chiffres significatifs cohérent avec les données et une unité correcte dans le cas d'un résultat dimensionné. Commenter un résultat numérique (justification d'une approximation, comparaisons à des valeurs de référence bien choisies, etc). En faire un test de pertinence.

Notions et contenus	Capacités exigibles
3. Outils de communication	
Tableaux de données numériques simples.	Transformer un tableau de données numériques en représentation graphique. Renseigner correctement les axes.
Exploitation d'une représentation graphique.	Repérer les comportements intéressants dans le contexte donné : monotonie, extrema, branches infinies, signes. Interpréter le caractère localement rectiligne selon qu'on travaille en échelles linéaire, semi-logarithmique ou log-log.
Schémas et figures.	Transposer un texte en une figure schématisant les éléments essentiels. Élaborer une courte synthèse à partir de plusieurs éléments graphiques : tableaux, schémas, courbes...

Notions et contenus	Capacités exigibles
4. Analyse dimensionnelle	
Dimension d'une expression.	Déterminer la dimension d'une expression, notamment par référence à des expressions connues.
Recherche d'une expression de type monôme par analyse dimensionnelle.	Déterminer les exposants d'une expression de type monôme $E=A^{\alpha}B^{\beta}C^{\gamma}$ par analyse dimensionnelle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
5. Analyse d'ordre de grandeur	
Comparaison en ordre de grandeur des différents termes d'une équation différentielle ou d'une équation aux dérivées partielles.	À partir d'une mise en évidence des échelles pertinentes d'un problème, évaluer et comparer l'ordre de grandeur des différents termes d'une équation afin de la simplifier en conséquence.

ANNEXE 3

Programme de chimie de la voie TPC2

Le programme de chimie de la classe de TPC2 s'inscrit dans la continuité du programme de TPC1. Ce programme est conçu pour amener tous les étudiants à poursuivre avec succès un cursus d'ingénieur, de chercheur, d'enseignant, de scientifique, pour éveiller leur curiosité et leur permettre de se former tout au long de la vie.

L'objectif de l'enseignement de chimie est d'abord de développer des compétences propres à la pratique de la démarche scientifique :

- observer et s'approprier une problématique ;
- analyser et modéliser ;
- valider ;
- réaliser et créer.

Cette formation doit aussi développer d'autres compétences dans un cadre scientifique :

- communiquer, à l'écrit et à l'oral ;
- être autonome et faire preuve d'initiative.

Ces compétences sont construites à partir d'un socle de connaissances et de capacités défini par ce programme. Comme celui de première année, ce programme identifie, pour chacun des items, les connaissances scientifiques, mais aussi les savoir-faire, les capacités que les étudiants doivent maîtriser à l'issue de la formation. L'acquisition de ces capacités constitue un objectif prioritaire pour le professeur.

Observer, mesurer, confronter un modèle au réel nécessitent la pratique d'une démarche expérimentale. La formation expérimentale de l'étudiant revêt donc une importance essentielle, au même titre que sa formation théorique. En outre elle donne un sens aux concepts et aux lois introduites. En classe de TPC2, cette formation expérimentale est poursuivie ; elle s'appuie sur les capacités développées en première année, elle les affermit et les complète.

Comprendre, décrire, modéliser, prévoir, nécessitent aussi une solide formation théorique. Celle-là est largement complétée en classe de TPC2. Le professeur s'appuiera sur des exemples concrets afin de lui donner du sens. La diversité des domaines scientifiques abordés ne doit pas masquer à l'étudiant la transversalité des concepts et des méthodes utilisés, que le professeur veillera à souligner. Théorique et expérimentale, la formation de l'étudiant est multiforme et doit être abordée par des voies variées. Ainsi le professeur doit-il rechercher un point d'équilibre entre des approches apparemment distinctes, mais souvent complémentaires : conceptuelle et expérimentale, abstraite et concrète, théorique et appliquée, inductive et déductive, qualitative et quantitative.

L'autonomie de l'étudiant et sa capacité à prendre des initiatives sont développées à travers la pratique d'activités de type « résolution de problèmes », qui visent à apprendre à mobiliser des savoirs et des savoir-faire pour répondre à des questionnements précis. Ces résolutions de problèmes peuvent aussi être de nature expérimentale ; la formation expérimentale vise non seulement à apprendre à l'étudiant à réaliser des mesures ou des expériences selon un protocole fixé, mais aussi à l'amener à proposer lui-même un protocole et à le mettre en œuvre. Cette capacité à proposer un protocole doit être résolument développée au cours de la formation expérimentale.

Dans ce programme comme dans celui de première année, il est proposé au professeur d'aborder certaines notions à partir de l'étude d'un document. L'objectif de cette « approche documentaire » est d'apprendre à l'étudiant à compléter ses connaissances et ses savoir-faire par l'exploitation de ressources et de documents scientifiques variés, ce qu'il aura inévitablement à pratiquer dans la suite de sa formation et de sa vie professionnelle.

La mise en œuvre de la démarche scientifique en physique-chimie fait souvent appel aux mathématiques, tant pour la formulation du modèle que pour en extraire des prédictions. Le professeur

veillera à n'avoir recours à la technicité mathématique que lorsqu'elle s'avère indispensable, et à mettre l'accent sur la compréhension des phénomènes physiques et chimiques. Néanmoins l'étudiant doit savoir utiliser de façon autonome certains outils mathématiques (précisés dans l'appendice « outils mathématiques ») dans le cadre des activités relevant de la chimie.

Enfin, lorsqu'il en aura l'opportunité, le professeur familiarisera l'étudiant à recourir à une approche numérique, qui permet une modélisation plus fine et plus réaliste du réel, par exemple par la prise en compte d'effets non linéaires. C'est l'occasion pour l'étudiant d'exploiter ses capacités concernant l'ingénierie numérique et la simulation qu'il a acquises en première année en informatique et sciences du numérique. Dans ce domaine des démarches collaboratives sont recommandées.

Le programme de chimie de la classe de TPC2 inclut celui de la classe de TPC1, et son organisation est la même :

- Dans la première partie sont décrites les compétences que la pratique de la « **démarche scientifique** » permet de développer pendant les deux années de formation à travers certaines de ses composantes : la démarche expérimentale, la résolution de problèmes et les approches documentaires. Ces compétences et les capacités associées continueront à être exercées et mises en œuvre dans des situations variées tout au long de la deuxième année en s'appuyant sur les autres parties du programme. Les compétences mentionnées dans cette partie tissent des liens transversaux entre les différentes rubriques du programme, contribuant ainsi à souligner l'idée d'une science constituée de domaines interdépendants.
- Dans la deuxième partie, intitulée « **formation expérimentale** », sont décrites les méthodes et les capacités expérimentales que les élèves doivent maîtriser à la fin de l'année scolaire. Elles complètent celles décrites dans la deuxième partie du programme de TPC1, qui restent exigibles, et devront être régulièrement exercées durant la classe de TPC2. Leur mise en œuvre à travers les activités expérimentales doit s'appuyer sur des problématiques concrètes contenant celles identifiées en gras dans la partie « formation disciplinaire ».
- La troisième partie, intitulée « **formation disciplinaire** », décrit les connaissances et capacités associées aux contenus disciplinaires propres à la classe de TPC2. Comme dans le programme de première année, elles sont présentées en deux colonnes : la première colonne décrit les « notions et contenus » ; en regard, la seconde colonne précise les « capacités exigibles » associées dont l'acquisition par les étudiants doit être la priorité du professeur. L'évaluation vise à mesurer le degré de maîtrise du socle ainsi défini et le niveau d'autonomie et d'initiative des étudiants. Lors de la conception des évaluations, on veillera soigneusement à identifier les capacités mobilisées afin d'en élargir le plus possible le spectre.
Certains items de cette partie, **identifiés en caractères gras**, se prêtent particulièrement à une approche expérimentale. Ils doivent être abordés, au choix, à travers des expériences de cours exploitées de manière approfondie et collective, ou lors de séances de travaux pratiques où l'autonomie et l'initiative individuelle de l'étudiant sont davantage privilégiées. D'autres items sont signalés comme devant être abordés au moyen d'une approche numérique ou d'une approche documentaire.
- Deux appendices listent le matériel et les outils mathématiques que les étudiants doivent savoir utiliser de façon autonome dans le cadre des enseignements de chimie en fin de l'année de TPC2. Ils complètent le matériel et les outils mathématiques rencontrés en première année et dont la maîtrise reste nécessaire.

Ce programme indique les objectifs de formation à atteindre en fin d'année pour tous les étudiants. Il ne représente en aucun cas une progression imposée pour chaque semestre. La formation de seconde année est divisée en deux semestres. Toutefois le professeur est ici libre de traiter le programme dans l'ordre qui lui semble le plus adapté à ses étudiants. Dans le cadre de sa liberté pédagogique, le professeur, pédagogue et didacticien, organise son enseignement en respectant trois grands principes directeurs :

- Il doit privilégier la mise en activité des étudiants en évitant le 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

contribuer à la réflexion, la participation et l'autonomie des étudiants. La formation expérimentale, l'approche documentaire, la résolution de problèmes favorisent cette mise en activité.

- Il doit savoir recourir à la mise en contexte des contenus scientifiques : le questionnement scientifique peut être introduit à partir de phénomènes naturels, de procédés ou d'objets technologiques. Lorsque le thème traité s'y prête, le professeur peut le mettre en perspective avec l'histoire des sciences et des techniques, des questions d'actualité ou des débats d'idées.
- Il contribue à la nécessaire mise en cohérence des enseignements scientifiques ; la progression en physique-chimie doit être articulée avec celles mises en œuvre dans les autres disciplines, mathématiques, physique et informatique.

Partie 1 - Démarche scientifique

1. Démarche expérimentale

La chimie est une science à la fois théorique et expérimentale. Ces deux parties de la démarche scientifique s'enrichissant mutuellement, leur intrication est un élément essentiel de son enseignement. C'est la raison pour laquelle ce programme fait une très large place à la méthodologie expérimentale, selon deux axes forts et complémentaires :

- Le premier a trait à la formation expérimentale à laquelle l'intégralité de la deuxième partie est consacrée. Compte tenu de l'important volume horaire dédié aux travaux pratiques, ceux-ci doivent permettre l'acquisition de compétences spécifiques décrites dans cette partie, de capacités dans le domaine de la mesure (réalisation, évaluation de la précision, analyse du résultat...) et des techniques associées. Cette composante importante de la formation d'ingénieur ou de chercheur a vocation à être évaluée de manière appropriée dans l'esprit décrit dans cette partie.

- Le second concerne l'identification, tout au long du programme dans la troisième partie (formation disciplinaire), de problématiques se prêtant particulièrement à une approche expérimentale. Ces items, **identifiés en gras**, doivent être abordés, au choix, à travers des expériences de cours exploitées de manière approfondie et collective, ou lors de séances de travaux pratiques où l'autonomie et l'initiative individuelle de l'étudiant sont davantage privilégiées.

Les expériences de cours et les séances de travaux pratiques, complémentaires, ne répondent donc pas tout à fait aux mêmes objectifs :

- Les expériences de cours doivent susciter un questionnement actif et collectif autour d'une expérience bien choisie permettant de faire évoluer la réflexion théorique et la modélisation, d'aboutir à des lois simplificatrices et unificatrices, de dégager des concepts transversaux entre différents domaines de la chimie.

- Les séances de travaux pratiques doivent permettre, dans une approche contextualisée, suscitée par une problématique clairement identifiée et, chaque fois que cela est possible, transversale, l'acquisition de savoir-faire techniques, de connaissances dans le domaine de la mesure et de l'évaluation de sa précision, d'autonomie dans la mise en œuvre de protocoles simples associés à la mesure des grandeurs physiques les plus souvent mesurées.

La liste de matériel jointe en appendice de ce programme précise le cadre technique dans lequel les étudiants doivent savoir évoluer en autonomie avec une information minimale. Son placement en appendice du programme, et non à l'intérieur de la partie dédiée à la formation expérimentale, est délibéré : il exclut l'organisation de séances de travaux pratiques dédiées à un appareil donné et centrées seulement sur l'acquisition des compétences techniques associées.

Compétences spécifiques mobilisées lors des activités expérimentales

Les activités expérimentales en classe préparatoire aux grandes écoles (CPGE) mobilisent les compétences spécifiques qui figurent dans le tableau ci-dessous. Des capacités associées sont

explicitées afin de préciser les contours de chaque compétence, elles ne constituent donc pas une liste exhaustive et peuvent parfois relever de plusieurs domaines de compétences.

Les compétences doivent être acquises à l'issue de la formation expérimentale en CPGE, le niveau d'exigence est naturellement à mettre en perspective avec celui des autres parties du programme de la filière concernée. Elles nécessitent d'être régulièrement mobilisées par les élèves et sont évaluées en s'appuyant, par exemple, sur l'utilisation de grilles d'évaluation.

L'ordre de présentation de celles-ci ne préjuge pas d'un ordre de mobilisation de ces compétences lors d'une séance ou d'une séquence. Certaines ne sont d'ailleurs pas propres à la seule méthodologie expérimentale, et s'inscrivent plus largement dans la démarche scientifique, voire toute activité de nature éducative et formatrice (communiquer, autonomie, travail en équipe, etc.).

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> - rechercher, extraire et organiser l'information en lien avec une situation expérimentale - énoncer une problématique d'approche expérimentale - définir les objectifs correspondants
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> - formuler et échanger des hypothèses - proposer une stratégie pour répondre à la problématique - proposer un modèle - choisir, concevoir ou justifier un protocole ou un dispositif expérimental - évaluer l'ordre de grandeur d'un phénomène et de ses variations
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> - mettre en œuvre un protocole - utiliser (avec la notice) le matériel de manière adaptée, en autonomie pour celui de la liste « matériel », avec aide pour tout autre matériel - mettre en œuvre des règles de sécurité adéquates - effectuer des représentations graphiques à partir de données expérimentales
Valider	<ul style="list-style-type: none"> - exploiter des observations, des mesures en identifiant les sources d'erreurs et en estimant les incertitudes - confronter un modèle à des résultats expérimentaux - confirmer ou infirmer une hypothèse, une information - analyser les résultats de manière critique - proposer des améliorations de la démarche ou du modèle
Communiquer	<ul style="list-style-type: none"> - à l'écrit comme à l'oral : <ul style="list-style-type: none"> o présenter les étapes de son travail de manière synthétique, organisée, cohérente et compréhensible o utiliser un vocabulaire scientifique adapté o s'appuyer sur des schémas, des graphes - faire preuve d'écoute, confronter son point de vue
Être autonome, faire preuve d'initiative	<ul style="list-style-type: none"> - travailler seul ou en équipe - solliciter une aide de manière pertinente - s'impliquer, prendre des décisions, anticiper

Concernant la compétence « **Communiquer** », l'aptitude à rédiger un compte-rendu écrit constitue un objectif de la formation. Dans ce cadre, on doit développer les capacités à définir la problématique du questionnement, à décrire les méthodes, en particulier expérimentales, utilisées pour y répondre, à présenter les résultats obtenus et l'exploitation, graphique ou numérique, qui en a été faite, et à analyser les réponses apportées au questionnement initial et leur qualité. Les activités expérimentales sont aussi l'occasion de travailler l'expression orale lors d'un point de situation ou d'une synthèse finale par exemple. Le but est de préparer les élèves de CPGE à la présentation des travaux et projets qu'ils auront à conduire et à exposer au cours de leur formation en école d'ingénieur et, plus généralement, dans le cadre de leur métier de chercheur ou d'ingénieur. L'utilisation d'un cahier de laboratoire, au

sens large du terme en incluant par exemple le numérique, peut constituer un outil efficace d'apprentissage.

La compétence « **Être autonome, faire preuve d'initiative** » est par nature transversale et participe à la définition du niveau de maîtrise des autres compétences. Le recours à des activités s'appuyant sur les questions ouvertes est particulièrement adapté pour former les élèves à l'autonomie et l'initiative.

2. Résolution de problèmes

Dans l'acquisition de l'autonomie, la « résolution de problèmes » est une activité intermédiaire entre l'exercice cadré qui permet de s'exercer à de nouvelles méthodes, et la démarche par projet, pour laquelle le but à atteindre n'est pas explicite. Il s'agit pour l'étudiant de mobiliser ses connaissances, capacités et compétences afin d'aborder une situation dans laquelle il doit atteindre un but bien précis, mais pour laquelle le chemin à suivre n'est pas indiqué. Ce n'est donc pas un « problème ouvert » pour lequel on soumet une situation en demandant « Que se passe-t-il ? ». L'objectif à atteindre doit être clairement donné et le travail porte sur la démarche à suivre, l'obtention du résultat et son regard critique.

La résolution de problèmes permet de se confronter à des situations où plusieurs approches sont possibles, qu'il s'agisse de la méthode mise en œuvre ou du degré de précision recherché. Ces situations se prêtent bien à une résolution progressive pour laquelle un premier modèle permettra d'obtenir rapidement un résultat, qui sera ensuite discuté et amélioré. Cette résolution étagée doit permettre à tous les élèves d'aborder le problème selon leur rythme en s'appuyant sur les compétences qu'ils maîtrisent.

C'est sur la façon d'appréhender une question scientifique, sur le choix raisonné de la méthode de résolution et sur les moyens de vérification qu'est centrée la formation de l'élève lors de la démarche de résolution de problèmes. La résolution de problèmes mobilise les compétences qui figurent dans le tableau ci-dessous. Des capacités associées sont explicitées afin de préciser les contours de chaque compétence, elles ne constituent donc pas une liste exhaustive et peuvent parfois relever de plusieurs domaines de compétences.

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier le problème.	Faire un schéma modèle. Identifier les grandeurs physiques pertinentes, leur attribuer un symbole. Évaluer quantitativement les grandeurs physiques inconnues et non précisées. Relier le problème à une situation modèle connue.
Établir une stratégie de résolution (analyser).	Décomposer le problème en des problèmes plus simples. Commencer par une version simplifiée. Expliciter la modélisation choisie (définition du système, ...). Déterminer et énoncer les lois physiques qui seront utilisées.
Mettre en œuvre la stratégie (réaliser).	Mener la démarche jusqu'au bout afin de répondre explicitement à la question posée. Savoir mener efficacement les calculs analytiques et la traduction numérique. Utiliser l'analyse dimensionnelle. ...
Avoir un regard critique sur les résultats obtenus (valider).	S'assurer que l'on a répondu à la question posée. Vérifier la pertinence du résultat trouvé, notamment en comparant avec des estimations ou ordres de grandeurs connus. Comparer le résultat obtenu avec le résultat d'une autre approche (mesure expérimentale donnée ou déduite d'un document joint, simulation numérique, ...).

	Étudier des cas limites plus simples dont la solution est plus facilement vérifiable ou bien déjà connue ...
Communiquer.	Présenter la solution ou la rédiger, en en expliquant le raisonnement et les résultats. ...

3. Approches documentaires

En seconde année, comme en première année, le programme de chimie prévoit un certain nombre **d'approches documentaires**, identifiées comme telles dans la colonne « capacités exigibles » de la partie « formation disciplinaire ».

L'objectif de ces activités reste le même puisqu'il s'agit :

- dans la perspective d'une formation tout au long de la vie, d'habituer les étudiants à se cultiver en utilisant des documents variés (texte, schéma, graphe, vidéo, photo,...), démarche dans laquelle ils sont acteurs de leur formation ;
- d'acquérir des éléments de culture (construction du savoir scientifique, histoire des sciences, étapes d'une démarche scientifique, raisonnements, ordres de grandeurs, avancée de la recherche sur des sujets contemporains, ouverture sur les problèmes sociétaux...) dans les domaines de la physique et de la chimie des XX^{ème} et XXI^{ème} siècles et de leurs applications ;
- de mobiliser et de développer des compétences liées à la recherche, à l'extraction, à l'organisation, à l'analyse et à la synthèse de l'information recueillie ou fournie, compétences essentielles pour les futurs ingénieurs et chercheurs scientifiques. Ces compétences et des exemples de capacités associées sont présentés dans le tableau ci-dessous. Elles peuvent servir de support pour la formation et l'évaluation des étudiants.

À l'issue de l'activité documentaire, une synthèse finale est indispensable pour bien identifier les nouvelles connaissances, les nouveaux modèles et les éléments de culture générale que les étudiants doivent s'approprier.

Compétence	Exemples de capacités associées
S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> - Dégager la problématique principale - Acquérir de nouvelles connaissances en autonomie - Identifier la complémentarité d'informations présentées sous des formes différentes (texte, graphe, tableau,...)
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier les idées essentielles et leurs articulations - Relier qualitativement ou quantitativement différents éléments du ou des documents - Identifier une tendance, une corrélation, une grandeur d'influence - Conduire un raisonnement scientifique qualitatif ou quantitatif. - S'appuyer sur ses connaissances et savoir-faire et sur les documents proposés pour enrichir l'analyse
Réaliser	<ul style="list-style-type: none"> - Extraire une information d'un texte, d'un graphe, d'un tableau - Trier et organiser des données, des informations - Tracer un graphe à partir de données - Schématiser un dispositif, une expérience, une méthode de mesure,... - Décrire un phénomène à travers la lecture d'un graphe, d'un tableau,... - Conduire une analyse dimensionnelle - Utiliser un modèle décrit
Valider	<ul style="list-style-type: none"> - Faire preuve d'esprit critique - Confronter le contenu du document avec ses connaissances et savoir-faire - Repérer les points faibles d'une argumentation (contradiction, partialité, incomplétude,...) - Estimer des ordres de grandeur et procéder à des tests de vraisemblance
Communiquer à l'écrit comme à	<ul style="list-style-type: none"> - Rédiger/présenter une synthèse, une analyse, une argumentation,... (clarté, justesse, pertinence, exhaustivité, logique)

l'oral	<ul style="list-style-type: none"> - Résumer un paragraphe sous la forme d'un texte, d'un schéma, d'une carte mentale - Illustrer son propos par des schémas, des graphes, des développements mathématiques
--------	---

Partie 2 - Formation expérimentale

Cette partie présente l'ensemble des capacités expérimentales nouvelles que les élèves doivent acquérir au cours de l'année de TPC2. Elle vient prolonger la partie « formation expérimentale » du programme de TPC1 ; les capacités décrites dans le programme de TPC1 doivent toutes être acquises à l'issue des deux années de préparation, elles restent donc au programme de seconde année de TPC2 et sont remobilisées si nécessaire.

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 de l'étude d'un problème concret.

Prévention des risques au laboratoire

Les élèves doivent prendre conscience du risque lié à la manipulation et au rejet des produits chimiques. L'apprentissage et le respect des règles de sécurité chimique, électrique et optique leur permettent de prévenir et de minimiser ces risques. Futurs ingénieurs, chercheurs, enseignants, ils doivent être sensibilisés au respect de la législation et à l'impact de leur activité sur l'environnement.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Prévention des risques - chimique Règles de sécurité au laboratoire. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Phrases H et P. - électrique	Adopter une attitude adaptée au travail en laboratoire. Relever les indications sur le risque associé au prélèvement et au mélange des produits chimiques. Développer une attitude autonome dans la prévention des risques. Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
2. Impact environnemental Traitement et rejet des espèces chimiques.	Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

Mesures de grandeurs physiques

Notions et contenus	Capacités exigibles
Mesures de : - Volume - Masse	Sélectionner et utiliser le matériel adapté à la précision requise. Préparer une solution aqueuse de concentration donnée à partir d'un solide, d'un liquide, d'une

- pH	solution de concentration molaire connue ou d'une solution de titre massique et de densité connus.
- Conductance et conductivité - Tension - Intensité du courant électrique - Température - Pouvoir rotatoire - Indice de réfraction - Absorbance - Temps de rétention en chromatographie en phase gaz	Utiliser les méthodes et le matériel adéquats pour transférer l'intégralité du solide ou du liquide pesé. Distinguer les instruments de verrerie In et Ex. Utiliser les appareils de mesure (masse, pH, conductance, tension, intensité, température, indice de réfraction, absorbance, pouvoir rotatoire) en s'aidant d'une notice. Mettre en œuvre des mesures calorimétriques à pression constante. Choisir les électrodes adaptées à une mesure électrochimique. Construire un dispositif électrochimique à partir de sa représentation symbolique. Étalonner une chaîne de mesure si nécessaire. Effectuer une injection dans des conditions optimales données. Lire, interpréter et justifier qualitativement un chromatogramme

Utilisation de l'outil informatique

L'outil informatique sera utilisé :

- dans le domaine de la simulation : pour interpréter et anticiper des résultats ou des phénomènes, chimiques, pour comparer des résultats obtenus expérimentalement à ceux fournis par un modèle et pour visualiser des modèles de description de la matière. Les domaines d'activité qui se prêtent particulièrement à la simulation sont : les titrages en solution aqueuse, la cinétique chimique, la cristallographie, la modélisation moléculaire, l'approche orbitale. Cette liste n'est bien entendu pas exhaustive et l'usage de toutes les animations numériques qui facilitent l'apprentissage est recommandé ;
- pour l'acquisition de données, en utilisant un appareil de mesure interfacé avec l'ordinateur ;
- pour la saisie et le traitement de données à l'aide d'un tableur ou d'un logiciel dédié.

Partie 3 - Formation disciplinaire

La formation disciplinaire de TPC2 complète celle effectuée en TPC1 à la fois en chimie sur l'architecture et la transformation de la matière et en physique sur la thermodynamique et la mécanique quantique. Cette formation aborde des domaines nouveaux que sont la thermodynamique des transformations des systèmes physico-chimiques, les aspects cinétiques des réactions électrochimiques, la modélisation quantique de la structure et de la réactivité des entités chimiques. Par ailleurs, elle complète l'apport de connaissances et le développement de compétences en stratégie de synthèse en chimie organique.

Tout au long des deux années, la formation disciplinaire en chimie s'inscrit dans une vision renouvelée de son enseignement, privilégiant la capacité de l'élève à raisonner, à prévoir et à transposer ses connaissances dans des situations nouvelles ou sur des composés proches de ceux étudiés, plutôt que sa capacité à réciter, à reproduire. Ainsi les programmes des deux années sont structurés autour des outils du raisonnement que sont les théories et les modèles de comportement macroscopique ou microscopique et non pas autour d'une présentation encyclopédique, systématique, des composés et des réactions associées (acides, bases, complexes, précipités, alcènes, alcools, ...). Il s'agit bien de changer l'image parfois véhiculée de la chimie, d'une discipline où l'apprentissage par cœur serait le moteur de la réussite, et de montrer qu'elle est une science où la dialectique entre savoirs et méthodes permet d'aborder des situations nouvelles, de construire de nouvelles connaissances. Ainsi formés en chimie, futurs ingénieurs ou chercheurs scientifiques pourront accompagner l'innovation, moteur de la croissance de demain, que ce soit dans le cadre de la recherche et du développement mais aussi de la production au stade industriel.

L'ordre de présentation des contenus n'est pas nécessairement celui qui doit être adopté par le professeur ; celui-ci dispose de toute liberté pour effectuer des choix et établir sa propre progression annuelle dont le seul objectif reste de permettre l'acquisition par tous les élèves de l'ensemble des capacités exigibles. Un travail en collaboration avec le professeur enseignant la physique est vivement recommandé afin de favoriser les apprentissages sur les domaines communs étudiés dans les deux disciplines.

1. Mélanges et transformations : aspects thermodynamiques
 - 1.1 Changements d'état isobare de mélanges binaires
 - 1.2 Transformations physico-chimiques
2. Energie chimique et énergie électrique : conversion et stockage
 - 2.1 Thermodynamique des réactions d'oxydoréduction
 - 2.2 Cinétique des réactions d'oxydoréduction
3. Atomes, molécules, complexes : modélisation quantique et réactivité
 - 3.1 Orbitales atomiques
 - 3.2 Orbitales moléculaires et réactivité
 - 3.3 Orbitales moléculaires et structure des complexes
 - 3.4 Activité catalytique des complexes ; cycles catalytiques
4. Molécules et matériaux organiques : stratégie de synthèse et applications
 - 4.1 Stratégie de synthèse : activation et protection de fonctions
 - 4.2 Conversion de groupes caractéristiques
 - 4.3 Création de liaison CC
 - 4.4 Matériaux organiques polymères

1. MELANGES ET TRANSFORMATIONS : ASPECTS THERMODYNAMIQUES

Au laboratoire, comme dans l'industrie, les chimistes sont amenés à élaborer des composés à partir de matières premières ou à séparer les espèces contenues dans un mélange réactionnel ou dans des substances naturelles. Dans les deux cas, l'innovation comme l'optimisation des techniques et des procédés s'appuient notamment sur des fondements thermodynamiques. Par exemple, le raffinage du pétrole brut consiste en une succession de distillations et de transformations nécessaires à l'élimination de constituants indésirables et à l'obtention en particulier de carburants plus performants et l'exploitation de la biomasse met aussi en œuvre des extractions et des transformations.

La thermodynamique permet en effet de prévoir si la transformation envisagée est possible ou non et

de trouver d'éventuelles pistes d'amélioration du rendement d'une synthèse. Elle permet aussi d'appréhender les propriétés physico-chimiques des mélanges et d'envisager une voie d'accès aux corps purs. Elle contribue ainsi à l'obtention de matériaux de plus en plus complexes et répondant à des cahiers des charges de plus en plus exigeants.

Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- l'exploitation des diagrammes isobares de mélanges binaires construits à partir des courbes d'analyse thermique ;
- l'application des deux principes de la thermodynamique aux transformations physico-chimiques.

La première partie s'intéresse aux changements d'état de mélanges binaires. Les diagrammes isobares sont construits à partir des courbes d'analyse thermique. Ils sont utilisés pour interpréter les techniques de séparation liquide-liquide que sont les distillations mises en œuvre dans l'approche expérimentale et pour comprendre le comportement de mélanges de solides, en particulier des alliages. Ces diagrammes sont l'occasion également de réinvestir les notions étudiées sur les changements d'état du corps pur et de se familiariser avec la notion de degrés de liberté d'un système ; le calcul de la variance par le théorème de Gibbs est hors programme.

La deuxième partie porte sur les transformations physico-chimiques. L'étude des transferts thermiques lors des transformations des corps purs, abordée en première année dans le cadre du cours de physique, est ici généralisée au cas des transformations physico-chimiques. Par ailleurs, le critère d'évolution d'un système, utilisé dès la première année, est ici démontré par application du second principe de la thermodynamique. Les concepts abordés sont illustrés par des exemples choisis en particulier dans le domaine industriel.

Les transformations physico-chimiques envisagées sont des transformations isobares. Pour le calcul des grandeurs standard de réaction, les enthalpies et entropies standard de réaction sont supposées indépendantes de la température.

On adopte pour les potentiels chimiques une expression générale : $\mu_i(T,p,composition) = \mu_i^{ref}(T,p) + RT \ln(a_i)$ qui fait référence aux activités a_i introduites en première année. L'établissement de cette expression est strictement hors programme. L'influence de la pression sur le potentiel chimique d'un constituant en phase condensée pure est uniquement étudiée dans le cadre d'une approche documentaire sur la pression osmotique.

L'étude de l'influence de la modification d'un paramètre (pression, température ou composition) sur un système physico-chimique permet d'aborder l'optimisation des conditions opératoires d'une synthèse. Il n'est pas attendu de discussions sur le déplacement de l'équilibre chimique, ce qui exclut de fait tout calcul différentiel de l'affinité ($d\mathcal{A}$).

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

- faire preuve de rigueur dans la définition et la description d'un système physico-chimique ;
- modéliser un système réel ;
- distinguer modélisation d'une transformation (réaction et écriture de l'équation de réaction) et description quantitative de l'évolution d'un système prenant en compte les conditions expérimentales choisies pour réaliser la transformation ;
- établir un bilan thermique ;
- confronter des grandeurs calculées ou tabulées à des mesures expérimentales.
- pratiquer un raisonnement qualitatif ou quantitatif à partir de représentations graphiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1.1 Changements d'état isobare de mélanges binaires	
Diagrammes isobares d'équilibre liquide-vapeur : - avec miscibilité totale à l'état liquide	Mettre en œuvre une distillation fractionnée à la pression atmosphérique et une

<ul style="list-style-type: none"> - avec miscibilité nulle à l'état liquide <p>Diagrammes isobares d'équilibre solide-liquide :</p> <ul style="list-style-type: none"> - avec miscibilité totale à l'état solide - avec miscibilité nulle à l'état solide, avec ou sans composé défini à fusion congruente. <p>Théorème des moments chimiques.</p> <p>Variance : nombre de degrés de liberté d'un système à l'équilibre.</p>	<p>hydrodistillation ou une distillation hétéroazéotropique.</p> <p>Construire un diagramme isobare d'équilibre entre deux phases d'un mélange binaire à partir d'informations relatives aux courbes d'analyses thermiques.</p> <p>Décrire les caractéristiques des mélanges homoazéotropes, hétéroazéotropes, indifférents, eutectiques et des composés définis.</p> <p>Dénombrer les degrés de liberté d'un système à l'équilibre et interpréter le résultat.</p> <p>Exploiter les diagrammes isobares d'équilibre entre deux phases pour, à composition en fraction molaire ou massique donnée :</p> <ul style="list-style-type: none"> - tracer l'allure de la courbe d'analyse thermique en indiquant les degrés de liberté du système sur chaque partie de la courbe ; - déterminer les températures de début et de fin de changement d'état ; - donner la composition des phases en présence à une température T fixée ainsi que les quantités de matière dans chaque phase. <p>Interpréter une distillation simple, une distillation fractionnée, une distillation hétéroazéotropique à l'aide des diagrammes isobares d'équilibres liquide-vapeur.</p>
<p>1.2 Transformations physico-chimiques</p>	
<p>Application du premier principe</p> <p>Énoncé du premier principe</p> <p>État standard</p> <p>Enthalpie standard de réaction</p> <p>Loi de Hess</p> <p>Enthalpie standard de formation, état standard de référence d'un élément</p> <p>Enthalpie standard de dissociation de liaison</p> <p>Effets thermiques en réacteur monobare :</p> <ul style="list-style-type: none"> - transfert thermique causé par la transformation chimique en réacteur isobare isotherme (relation $\Delta H = Q_p = \xi \Delta_r H^\ominus$) - variation de température en réacteur adiabatique monobare. 	<p>Déterminer une enthalpie standard de réaction à température ambiante.</p> <p>Relier qualitativement la notion d'énergie interne aux descriptions microscopiques des systèmes chimiques.</p> <p>Déterminer une enthalpie standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques ou de la loi de Hess.</p> <p>Prévoir le sens du transfert thermique entre un système en transformation chimique et le milieu extérieur à partir de données thermodynamiques.</p> <p>Évaluer la température atteinte par un réacteur monobare adiabatique siège d'une transformation chimique exothermique ou endothermique.</p>
<p>Application du deuxième principe</p> <p>Énoncé du deuxième principe</p> <p>Identités thermodynamiques ; potentiel chimique.</p>	<p>Relier qualitativement l'entropie à la notion d'ordre microscopique au sein d'un système</p> <p>Écrire les identités thermodynamiques pour les</p>

<p>Enthalpie libre.</p> <p>Expression du potentiel chimique dans des cas modèles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - gaz parfaits - constituants condensés en mélange idéal - solutés infiniment dilués <p>Affinité chimique.</p> <p>Entropie molaire standard absolue. Entropie de réaction, enthalpie libre de réaction, grandeurs standard associées.</p> <p>Relation entre l'affinité chimique, $\Delta_r G^\circ$ et Q_r.</p> <p>L'équilibre physico-chimique. Constante thermodynamique d'équilibre ; relation de Van't Hoff Relation entre l'affinité chimique, K° et Q_r.</p> <p>Variance : nombre de degrés de liberté d'un système à l'équilibre.</p> <p>Optimisation d'un procédé chimique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - par modification de la valeur de K° - par modification de la valeur du quotient réactionnel. 	<p>fonctions U, H et G.</p> <p>Distinguer et justifier les caractères intensif ou extensif des variables utilisées.</p> <p>Exprimer l'enthalpie libre d'un système chimique en fonction des potentiels chimiques. Déterminer une variation d'enthalpie libre, d'enthalpie et d'entropie entre deux états du système chimique.</p> <p>Approche documentaire : à partir de documents sur la pression osmotique, discuter de l'influence de la pression sur le potentiel chimique et d'applications au laboratoire, en industrie ou dans le vivant.</p> <p>Relier affinité chimique et création d'entropie lors d'une transformation d'un système physico-chimique. Prévoir le sens d'évolution d'un système chimique dans un état donné à l'aide de l'affinité chimique.</p> <p>Justifier ou prévoir le signe de l'entropie standard de réaction. Déterminer une grandeur standard de réaction à l'aide de données thermodynamiques ou de la loi de Hess. Déterminer la valeur de la constante thermodynamique d'équilibre à une température quelconque.</p> <p>Reconnaître si une variable intensive est ou non un facteur d'équilibre. Dénombrer les degrés de liberté d'un système à l'équilibre et interpréter le résultat.</p> <p>Déterminer la composition chimique du système dans l'état final, en distinguant les cas d'équilibre chimique et de transformation totale, pour une transformation modélisée par une ou plusieurs réactions chimiques.</p> <p>Identifier les paramètres d'influence et leur sens d'évolution pour optimiser une synthèse ou minimiser la formation d'un produit secondaire indésirable.</p>
--	--

2. ÉNERGIE CHIMIQUE ET ENERGIE ELECTRIQUE : CONVERSION ET STOCKAGE

Enjeux économiques et sociétaux de première importance, la maîtrise des énergies et la limitation des pollutions concernent tout particulièrement le chimiste et s'appuient, entre autres, sur des techniques et des technologies faisant appel à l'électrochimie. On peut citer la mise au point de capteurs électrochimiques (analyse d'eaux ou d'effluents industriels), de traitements dépolluants (procédés

d'oxydation avancée ou de réductions catalytiques), d'électrodéposition (traitements de surface améliorant la durée de vie), d'électrosynthèse (préparations ou purifications électrolytiques contrôlées), la conception ou l'amélioration des batteries (automobiles, appareils électriques portatifs ...), les recherches sur les biopiles (enzymatiques ou microbiennes), la lutte contre la corrosion.

Cette partie du programme vient en prolongement des acquis de première année concernant les réactions d'oxydoréduction et des acquis de deuxième année en thermodynamique des transformations physico-chimiques.

Les objectifs sont les suivants :

- compléter l'ensemble des outils de la thermodynamique de la réaction d'oxydoréduction en solution aqueuse ;
- aborder la cinétique des processus électrochimiques en solution aqueuse.

Les notions de thermodynamique sont appliquées au cas de systèmes physico-chimiques sièges de réactions d'oxydoréduction et au fonctionnement de piles électrochimiques. L'étude cinétique des réactions électrochimiques se démarque de la cinétique chimique étudiée en première année par la méthode expérimentale mise en œuvre et la modélisation des phénomènes.

L'utilisation des courbes courant-potentiel permet une description précise du fonctionnement des dispositifs électrochimiques mettant en jeu les conversions énergie chimique-énergie électrique, qu'ils soient sièges de réactions d'oxydoréduction spontanées (piles électrochimiques, piles à combustible) ou forcées (électrolyseurs, accumulateurs). L'approche, volontairement qualitative, ne requiert aucun formalisme physique ou mathématique. Les caractéristiques générales des courbes courant-potentiel sont présentées sur différents exemples afin que les étudiants soient capables de proposer l'allure qualitative de ces courbes à partir d'un ensemble de données cinétiques et thermodynamiques fournies.

Dans ce cadre, l'approche expérimentale peut aller du tracé de courbes courant-potentiel à l'exploitation de courbes fournies pour mettre en œuvre et analyser un protocole ou le fonctionnement d'un dispositif électrochimique.

Le réinvestissement de ces notions et capacités liées à la thermodynamique et la cinétique des phénomènes d'oxydo-réduction permet d'appréhender les phénomènes de corrosion humide par le biais d'une approche documentaire.

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

- faire preuve de rigueur dans la définition et la description du système physico-chimique étudié ;
- élaborer qualitativement des outils graphiques à partir d'un ensemble de données ;
- pratiquer un raisonnement par analogie pour décrire le fonctionnement d'un dispositif électrochimique ;
- pratiquer un raisonnement qualitatif ou quantitatif à partir de représentations graphiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
2.1 Thermodynamique des réactions d'oxydoréduction	
<p>Relation entre affinité chimique d'une réaction et potentiels de Nernst des couples mis en jeu.</p> <p>Relation entre enthalpie libre standard de réaction et potentiels standard des couples impliqués.</p>	<p>Déterminer des grandeurs standard de réaction par l'étude de piles.</p> <p>Énoncer la relation entre l'affinité chimique d'une réaction et les potentiels de Nernst des couples mis en jeu.</p> <p>Déterminer l'enthalpie libre standard d'une réaction d'oxydoréduction à partir des potentiels standard des couples.</p>

<p>Approche thermodynamique du fonctionnement d'une pile électrochimique.</p> <p>Irréversibilité et travail électrique maximum récupérable.</p>	<p>Déterminer la valeur du potentiel standard d'un couple d'oxydoréduction à partir de données thermodynamiques (constantes d'équilibre, potentiels standard).</p> <p>Relier tension à vide d'une pile et enthalpie libre de réaction.</p> <p>Établir l'inégalité reliant la variation d'enthalpie libre et le travail électrique.</p> <p>Décrire le fonctionnement d'une pile électrochimique.</p>
<p>2.2 Cinétique des réactions d'oxydoréduction</p>	
<p>Courbes courant-potentiel sur une électrode :</p> <ul style="list-style-type: none"> - systèmes rapides et systèmes lents - surtension - nature de l'électrode - courant limite de diffusion - vagues successives - domaine d'inertie électrochimique du solvant. <p>Utilisation des courbes courant-potentiel :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Transformations spontanées <ul style="list-style-type: none"> - notion de potentiel mixte - fonctionnement d'une pile électrochimique - Transformations forcées <ul style="list-style-type: none"> - électrolyseurs - accumulateurs 	<p>Mettre en œuvre un protocole expérimental de tracé ou d'utilisation de courbes courant-potentiel.</p> <p>Relier vitesse de réaction électrochimique et intensité du courant.</p> <p>Reconnaître le caractère lent ou rapide d'un système à partir de courbes courant-potentiel.</p> <p>Identifier les espèces électroactives pouvant donner lieu à une limitation en courant par diffusion.</p> <p>Relier qualitativement, ou quantitativement à partir des courbes courant-potentiel, l'intensité du courant limite de diffusion à la concentration du réactif, au nombre d'électrons échangés et à la surface immergée de l'électrode.</p> <p>Tracer l'allure de courbes courant-potentiel à partir de données de potentiels standard, concentrations et surtensions « seuil ».</p> <p>Identifier les paramètres d'influence du domaine d'inertie électrochimique du solvant.</p> <p>Positionner qualitativement un potentiel mixte sur un tracé de courbes courant-potentiel.</p> <p>Identifier piles, accumulateurs et électrolyseurs comme des dispositifs permettant les conversions entre énergie chimique et énergie électrique.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potentiel pour expliquer le fonctionnement d'une pile électrochimique et prévoir la valeur de la tension à vide.</p> <p>Utiliser les courbes courant-potentiel pour rendre compte du fonctionnement d'un dispositif siège d'une électrolyse et prévoir la valeur de la</p>

tension de seuil.

Utiliser les courbes courant-potentiel pour justifier les contraintes dans la recharge d'un accumulateur.

Citer les paramètres influençant la résistance interne du dispositif électrochimique.

Utiliser les courbes courant-potentiel pour justifier la nécessité :

- de purifier une solution électrolytique avant l'électrolyse
- de choisir les électrodes permettant de réaliser l'électrolyse voulue.

Déterminer un rendement faradique à partir d'informations fournies concernant le dispositif étudié.

Évaluer la masse de produit formé pour une durée et des conditions données d'électrolyse.

Approche documentaire : à partir de documents relatifs à la corrosion humide, identifier et analyser les facteurs d'influence et les méthodes de protection.

3. ATOMES, MOLECULES, COMPLEXES : MODELISATION QUANTIQUE ET REACTIVITE

La catalyse par les complexes des métaux de transition trouve de très nombreuses applications comme par exemple la réaction de Heck en chimie fine, la carbonylation du méthanol en chimie industrielle, les processus de respiration et de photosynthèse en chimie du vivant. Cette catalyse s'inscrit dans la démarche de la chimie verte et permet des synthèses dans des conditions douces. La compréhension de ces systèmes catalytiques nécessite l'analyse détaillée de la structure électronique des complexes par l'utilisation des orbitales atomiques et moléculaires.

Ces nouveaux modèles de description de la matière à l'échelle microscopique complètent l'étude de la classification périodique et de la description des entités moléculaires abordées en première année. Par ailleurs, ils permettent d'interpréter la réactivité en chimie organique dans le cadre de l'approximation des orbitales frontalières.

Les objectifs de cette partie sont les suivants :

- la construction de diagrammes d'orbitales moléculaires ou leur interprétation en vue de la prévision de la réactivité d'une entité chimique (molécule, ion ou radical) ;
- l'exploitation de diagrammes d'orbitales moléculaires de complexes de métaux de transition dans le but d'interpréter les propriétés des liaisons dans ce type d'édifices et l'utilisation de ces complexes comme catalyseurs ou éléments structurants.

Les approximations usuelles de la théorie des orbitales atomiques et moléculaires seront présentées afin de mettre l'accent sur les limitations des modèles adoptés. La notion de fonction d'onde sera abordée sans qu'aucune formulation mathématique ne soit exigible.

La construction des diagrammes d'orbitales moléculaires est limitée aux cas des molécules A_2 ou AB , sans mélange d'orbitales s et p. En revanche, des diagrammes d'orbitales moléculaires avec mélanges d'orbitales atomiques sur un même centre peuvent être fournis, l'étudiant devant alors les interpréter :

remplissage des niveaux, identification des orbitales frontalières HO et BV, analyse du caractère liant, antiliant ou non liant d'une orbitale moléculaire. De même, la construction des diagrammes d'orbitales moléculaires de systèmes plus complexes est hors programme ; l'étudiant interprète ces diagrammes à partir des propriétés de deux fragments en interaction dont les orbitales sont fournies.

Les orbitales moléculaires des complexes à symétrie octaédrique sont interprétées de la même manière.

Dans le but de disposer de modèles simples applicables en chimie organique, l'approximation des orbitales frontalières permet de prévoir la réactivité électrophile ou nucléophile des espèces mises en jeu : ces orbitales peuvent être obtenues grâce à des logiciels ou à partir de bases de données, les unités d'énergie utilisables étant l'eV ou le kJ.mol⁻¹.

Les complexes organométalliques (notion étendue aux complexes à ligands organiques sans présence de liaison métal-carbone) sont utilisés comme catalyseurs : aucun cycle catalytique n'est exigible, mais les étapes élémentaires d'un cycle fourni doivent être reconnues par l'étudiant, les notions de cinétique de première année pouvant être réinvesties à cette occasion. Le formalisme de Green est hors-programme.

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

- utiliser la classification périodique des éléments pour déterminer, justifier ou comparer des propriétés physico-chimiques ;
- utiliser différentes représentations schématiques ou symbolique d'une entité ;
- comparer les apports et limites des différents modèles de description des entités chimiques ;
- relier structure et propriétés microscopiques aux grandeurs et comportements macroscopiques à l'aide de différents modèles ;
- pratiquer un raisonnement qualitatif à partir de représentations graphiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
3.1 Orbitales atomiques	
<p>Fonctions d'onde électroniques de l'atome d'hydrogène.</p> <p>Énergie et rayon associés à une orbitale atomique.</p> <p>Représentation graphique conventionnelle d'une orbitale atomique : zones nodales, signe des fonctions d'ondes réelles</p> <p>Orbitales des atomes polyélectroniques.</p> <p>Notion qualitative de charge effective.</p>	<p>Interpréter $\psi ^2$ comme la densité de probabilité de présence d'un électron en un point et le relier à la densité de charge.</p> <p>Prévoir, pour l'atome d'hydrogène et les ions hydrogénoïdes, l'évolution du rayon et de l'énergie associés à une orbitale atomique en fonction du nombre quantique principal.</p> <p>Associer les orbitales atomiques aux niveaux d'énergie électroniques.</p> <p>Dessiner l'allure des orbitales atomiques s, p et d</p> <p>Établir la configuration électronique d'un atome ou d'un ion dans son état fondamental.</p> <p>Relier l'évolution du rayon associé à une orbitale atomique à la charge effective.</p> <p>Relier l'évolution de l'énergie associée à une orbitale atomique à l'électronégativité.</p> <p>Relier le rayon associé aux orbitales de valence d'un atome à sa polarisabilité.</p>
3.2 Orbitales moléculaires et réactivité	
Méthode de Combinaison Linéaire des Orbitales Atomiques.	Identifier les conditions d'interaction de deux orbitales atomiques : recouvrement et critère énergétique.

<p>Interaction de deux orbitales atomiques sur deux centres :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Recouvrement • Orbitales liante, antiliante, non liante • Énergie d'une orbitale moléculaire • Orbitale σ, orbitale π • Représentation conventionnelle d'une orbitale moléculaire par schématisation graphique de la combinaison linéaire des orbitales atomiques. 	<p>Construire des orbitales moléculaires de molécules diatomiques par interaction d'orbitales atomiques du même type (s-s, p-p).</p> <p>Reconnaître le caractère liant, antiliant, non liant d'une orbitale moléculaire à partir de sa représentation conventionnelle ou d'une surface d'iso-densité.</p> <p>Identifier la symétrie σ ou π d'une orbitale moléculaire à partir de sa représentation conventionnelle ou d'une surface d'iso-densité.</p> <p>Proposer une représentation conventionnelle d'une orbitale moléculaire tenant compte d'une éventuelle dissymétrie du système. Justifier la dissymétrie d'une orbitale moléculaire obtenue par interaction d'orbitales atomiques centrées sur des atomes d'éléments différents.</p> <p>Prévoir l'ordre énergétique des orbitales moléculaires et établir qualitativement un diagramme énergétique d'orbitales d'une molécule diatomique.</p>
<p>Interaction d'orbitales de fragments</p>	<p>Justifier l'existence d'interactions entre orbitales de fragment en termes de recouvrement ou d'écart d'énergie.</p>
<p>Diagramme d'orbitales moléculaires : occupation, orbitales frontalières haute occupée et basse vacante, cas des entités radicalaires.</p>	<p>Décrire l'occupation des niveaux d'un diagramme d'orbitales moléculaires. Identifier les orbitales frontalières à partir d'un diagramme d'orbitales moléculaires de valence fourni. Interpréter un diagramme d'orbitales moléculaires obtenu par interaction de deux fragments donnés.</p>
<p>Ordre de liaison des molécules diatomiques</p>	<p>Relier dans une molécule diatomique l'évolution de la longueur et de la constante de force de la liaison à l'évolution de l'ordre de liaison.</p>
<p>Prévision de la réactivité : approximation des orbitales frontalières</p>	<p>Utiliser les orbitales frontalières pour prévoir la réactivité nucléophile ou électrophile d'une molécule. Interpréter l'addition nucléophile sur le groupe carbonyle et la substitution nucléophile en termes d'interactions frontalières. Comparer la réactivité de deux entités à l'aide des orbitales frontalières.</p> <p>Approche numérique : utiliser un logiciel de modélisation pour l'obtention d'orbitales moléculaires en vue d'une interprétation de la réactivité.</p>

	<p>Approche documentaire : à partir de documents illustrant l'existence de bandes d'énergie dans les solides, analyser les propriétés de conduction électrique de matériaux.</p>
<p>3.3 Application de la théorie des orbitales moléculaires aux complexes</p>	
<p>Orbitales moléculaires de valence des complexes métalliques octaédriques : interactions entre fragments pour des ligands σ-donneurs intervenant par une seule orbitale.</p> <p>Ligands π-donneurs et π-accepteurs Coordination des systèmes π non délocalisés</p>	<p>Pratiquer une démarche expérimentale mettant en jeu la synthèse, l'analyse, la réactivité ou la caractérisation d'un complexe d'un métal de transition.</p> <p>Identifier parmi les orbitales de fragment fournies celles qui interagissent.</p> <p>Expliquer la levée partielle de dégénérescence des orbitales d. Établir la configuration électronique de valence d'un complexe dont le diagramme d'orbitales est donné.</p> <p>Reconnaître un ligand ayant des effets π à partir de la donnée de ses orbitales de valence. Identifier les interactions orbitales possibles entre orbitales atomiques d d'un métal et le système π d'un alcène ou d'un ligand carbonyle. Expliquer par une approche orbitale la coordination des systèmes π sur un fragment métallique donné.</p>
<p>3.4 Activité catalytique des complexes</p>	
<p>Cycles catalytiques.</p> <p>Processus élémentaires : addition oxydante, insertion et processus inverses.</p>	<p>Établir l'équation de réaction à partir d'un cycle catalytique donné. Distinguer catalyseur et précurseur de catalyseur.</p> <p>Déterminer une variation de nombre d'oxydation d'un métal au sein d'un complexe au cours d'une étape élémentaire d'un cycle donné. Reconnaître les étapes élémentaires d'un mécanisme donné. Donner le produit d'un acte élémentaire dont les réactifs sont précisés.</p> <p>Interpréter la modification de réactivité d'un alcène par les phénomènes électroniques mis en jeu lors de sa coordination.</p> <p>Approche documentaire : à partir de documents impliquant des transformations en chimie bio-inorganique, analyser le rôle catalytique ou structurant des complexes métalliques.</p>

4. MOLÉCULES ET MATÉRIAUX ORGANIQUES : STRATÉGIES DE SYNTHÈSE ET APPLICATIONS

Médicaments, produits phytosanitaires, matériaux polymères de synthèse aussi différents que les latex de peinture ou les boucliers thermiques des véhicules spatiaux, synthèses en chimie fine ou productions de fort tonnage découlent d'une démarche d'ingénierie moléculaire s'appuyant entre autres sur les apports de la chimie organique. L'élaboration, l'identification des structures et la prévision de la réactivité des molécules obéissent à des règles fondamentales dont les principes sont abordés dans les programmes de chimie des deux années de TPC.

Le programme de TPC2 s'inscrit dans la continuité de celui de TPC1 et poursuit les objectifs suivants :

- s'approprier la logique de la synthèse organique grâce aux compléments de formation relatifs aux conversions de groupes caractéristiques et à la création de liaison carbone-carbone ;
- consolider et compléter les connaissances des mécanismes fondamentaux et les capacités relatives à leur écriture à l'aide du formalisme des flèches courbes et des orbitales moléculaires.

L'approche retenue privilégie donc l'aspect mécanistique et la stratégie de synthèse à une présentation monographique, mais l'enseignant dispose de sa liberté pédagogique pour construire la progression de son choix.

L'enseignement de la chimie organique s'appuie sur les connaissances et capacités acquises en thermodynamique et cinétique chimiques et exploite les modèles orbitaux de description des structures et de la réactivité, introduits dans la partie « modélisation quantique et réactivité ». D'une part, l'utilisation des orbitales frontalières permet la prévision des géométries d'approche des réactifs et, dans le cas où l'évolution du système est sous contrôle frontalier, la prévision de la structure du produit majoritaire dans la transformation. D'autre part, l'étude de quelques cycles catalytiques permet de construire ou de réinvestir les compétences relatives aux complexes de métaux de transition. Aucune étude des propriétés intrinsèques des ligands carbène impliqués dans les réactions de métathèse n'est à envisager. Lors des épreuves d'évaluation, les orbitales frontalières comme les différentes étapes des cycles catalytiques sont systématiquement fournies aux étudiants.

Le cours et les activités s'appuient sur des exemples issus aussi bien des domaines de la chimie fine, de la chimie du vivant et de la chimie industrielle et permettent une sensibilisation aux principes de la chimie verte. Ils permettent aussi d'illustrer la richesse des applications des matériaux polymères.

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

- choisir le ou les modèle(s) pertinent(s) de description géométrique, électronique ou orbitale d'une espèce chimique pour rendre compte de sa réactivité ;
- identifier dans une entité complexe la partie utile au raisonnement ;
- utiliser des modèles de prédiction de l'évolution du système dans le cadre des transformations proposées ;
- pratiquer un raisonnement par analogie (analyse de réactivités et écriture de mécanismes) ;
- proposer une stratégie de synthèse dans le cadre d'un problème ouvert.

Notions et contenus	Capacités exigibles
	Identifier et nommer les groupes caractéristiques présents dans une entité donnée. Discuter des aspects thermodynamiques et cinétiques des transformations effectuées à l'aide de données tabulées et de résultats expérimentaux.

	<p>Identifier les sites électrophiles et nucléophiles des réactifs à l'aide de leurs structures de Lewis ou de leurs orbitales frontalières. Expliciter à l'aide des orbitales frontalières la géométrie d'approche entre réactifs conduisant aux produits primaires.</p> <p>Proposer et mettre en œuvre un protocole expérimental permettant de réaliser une transformation en chimie organique. Analyser et justifier les choix expérimentaux dans une synthèse organique.</p>
<p>4.1 Stratégie de synthèse : activation et protection de fonctions</p>	
<p>- Synthèse et utilisation d'esters d'acides minéraux pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> la formation d'alcène par élimination basique sur un ester de sulfonyle (conditions opératoires) la formation d'halogénoalcanes par substitution sur un ester de sulfonyle (conditions opératoires) la formation d'époxyde par substitution intramoléculaire <p>- Activation électrophile du groupe carbonyle : acétalisation des aldéhydes et cétones : conditions expérimentales (APTS, appareil de Dean-Stark) ; mécanisme limite de l'acétalisation en milieu acide</p> <p>- Protection et déprotection des alcools par les étheroxydes et les éthers silylés</p>	<p>Reconnaître une étape d'activation au sein d'une synthèse.</p> <p>Proposer des modes d'activation de fonction.</p> <p>Expliquer les modifications de réactivité impliquées par l'activation.</p> <p>Reconnaître une séquence de protection/déprotection dans une synthèse.</p> <p>Identifier l'étape de synthèse qui requiert une séquence protection/déprotection.</p> <p>Proposer des modes de protection de fonction in situ pour la conversion sélective de fonctions.</p>
<p>4.2 Conversion de groupes caractéristiques Additions sur les hydrocarbures insaturés</p>	
<p>- De l'alcène à l'alcool :</p> <p>hydratation acide : problématique des transpositions, mécanisme schématique.</p> <p>hydroboration d'un alcène terminal par le borane : régiosélectivité, mécanisme limite de l'addition du borane sur l'alcène ; hydrolyse oxydante.</p> <p>- De l'alcène au diol époxydation directe par un peroxyacide ; réactivité comparée des alcènes. Ouverture des époxydes en milieu basique : mécanisme, élaboration de diols anti.</p>	<p>Discuter de la stabilité des ions carbénium intermédiaires. Expliquer la formation de certains produits par des transpositions.</p> <p>Interpréter la régiosélectivité de l'hydroboration à l'aide des effets stériques.</p> <p>Justifier l'usage d'une base comme l'hydrogénocarbonate de sodium dans l'élaboration de l'époxyde. Discuter de la régiosélectivité de l'époxydation sur un polyène.</p>

<p>utilisation catalytique de métaux de transitions pour l'obtention de diols syn</p> <p>- De l'alcène à l'alcane et de l'alcyne à l'alcène : hydrogénation catalytique en catalyse hétérogène : aspects stéréochimiques, mécanisme de la catalyse hétérogène.</p> <p>hydrogénation en catalyse homogène.</p>	<p>Justifier la régiosélectivité et la stéréosélectivité de l'ouverture nucléophile d'un époxyde, en l'absence d'activation par un acide de Lewis ou de Bronsted.</p> <p>Choisir des conditions expérimentales adaptées à l'obtention d'une stéréochimie déterminée pour un diol.</p> <p>Identifier les différents types d'interactions entre le catalyseur hétérogène et les réactifs. Interpréter la stéréospécificité syn de l'addition du dihydrogène à l'aide du mécanisme en catalyse hétérogène.</p> <p>Identifier les processus élémentaires intervenant lors de l'hydrogénation en catalyse homogène.</p>
<p>Additions nucléophiles suivies d'élimination</p> <p>- De l'acide carboxylique aux amides et aux esters :</p> <p>Activation du groupe carboxyle : ex situ sous forme d'un chlorure d'acyle ou d'un anhydride ; in situ par protonation, par formation d'un anhydride mixte.</p> <p>Synthèse des esters à partir des acides carboxyliques, des chlorures d'acyle et des anhydrides : aspects cinétiques et thermodynamiques, mécanismes limites.</p> <p>Synthèse des amides à partir des acides carboxyliques, des chlorures d'acyle et des anhydrides : aspects cinétiques et thermodynamiques, mécanismes limites.</p> <p>- Des amides ou esters à l'acide carboxylique : Hydrolyses acide et basique des esters et des amides : conditions opératoires. Mécanisme limite de la saponification.</p>	<p>Comparer les réactivités électrophiles des acides carboxyliques, chlorures d'acyle, anhydrides, esters, amides, les aptitudes nucléofuges des groupes partants dans les molécules correspondantes et en déduire l'importance de l'activation du groupe carboxyle.</p> <p>Proposer et/ou analyser différents moyens d'activation d'un groupe carboxyle.</p> <p>Expliquer comment obtenir un bon rendement de synthèse d'ester à partir d'un alcool primaire ou secondaire et d'un acide carboxylique, selon la méthode d'activation choisie et les conditions expérimentales.</p> <p>Justifier le choix des conditions opératoires retenues pour la synthèse des amides.</p> <p>Utiliser la formation des esters et des amides dans le cadre d'une stratégie de synthèse nécessitant la protection d'un groupe hydroxyle ou d'un groupe amino. Déduire de la structure d'un polyester ou d'un polyamide la formule du ou des monomères correspondants et réciproquement.</p> <p>Justifier le choix des conditions opératoires d'hydrolyse.</p>

<p>- Protection des fonctions acide carboxylique et amine</p>	<p>Justifier et proposer les séquences estérification-hydrolyse ou synthèse-hydrolyse d'amide dans une stratégie de protection-déprotection</p> <p>Approche documentaire : à partir de documents relatifs à la synthèse peptidique, analyser les stratégies de synthèse in vitro et in vivo.</p>
<p>Conversion par oxydoréduction</p> <p>- Réduction des composés carbonyles en alcools par action du tétrahydruroborate de sodium (conditions opératoires, mécanisme réactionnel).</p> <p>- Oxydation des alcools selon leur classe ; principe de l'oxydation contrôlée des alcools primaires.</p> <p>- De l'acide ou de l'ester à l'aldéhyde ou à l'alcool et inversement ; mécanisme schématisé de la réduction des esters.</p>	<p>Identifier les produits de la réduction d'un composé carbonyle. Proposer des conditions expérimentales adaptées à l'utilisation de réducteurs à base d'hydrures.</p> <p>Identifier le produit d'oxydation d'un alcool à l'aide de données expérimentales ou spectroscopiques.</p> <p>Interpréter la réduction d'un ester en alcool primaire en assimilant le réactif à un ion hydrure nucléophile. Identifier le produit de réduction d'un ester par un hydrure complexe, à l'aide de données fournies (chimiques et/ou spectroscopiques). Reconnaître ou proposer dans une stratégie de synthèse le principe de la conversion entre un ester et un aldéhyde ou un alcool primaire.</p>
<p>4.3 Création de liaisons CC</p>	
<p>Réactions de Diels-Alder</p> <p>Diastéréosélectivité, stéréospécificité, régiosélectivité, influence de la structure des réactifs sur la vitesse de la transformation (règle d'Alder). Réactions de rétro-Diels-Alder.</p>	<p>Interpréter les résultats cinétiques, stéréochimiques et la régiosélectivité d'une réaction de Diels-Alder sous contrôle cinétique.</p> <p>Identifier les interactions orbitales principales et, le cas échéant, secondaires. Interpréter la préférence d'une approche de type endo, le cas échéant.</p>
<p>Réactivité nucléophile des énolates</p> <p>Acidité d'un composé carbonyle. Généralisation aux composés analogues (esters, β-dicétones, β-cétosters). Ordres de grandeur des pK_A des couples correspondants.</p> <p>C-alkylation en position alpha d'un groupe carbonyle de cétone : mécanisme limite, régiosélectivité.</p> <p>Aldolisation non dirigée : mécanisme en milieu basique aqueux ou alcoolique. Aldolisation (cétolisation) croisée dirigée avec déprotonation totale préalable : mécanisme, intérêt synthétique.</p>	<p>Écrire la base conjuguée d'un composé carbonyle énolisable dans le formalisme de la mésomérie. Proposer et justifier le choix d'une base permettant de déprotoner un composé carbonyle ou un analogue.</p> <p>Justifier la réactivité nucléophile ambivalente de l'énolate dans le formalisme de la mésomérie ou par l'analyse de ses orbitales frontalières.</p> <p>Décrire les interactions entre orbitales frontalières des réactifs Interpréter la régiosélectivité de l'alkylation des composés carbonyles.</p> <p>Choisir dans le cadre d'une stratégie de synthèse les meilleures conditions de préparation d'un aldol (cétol) issu d'une aldolisation (cétolisation) croisée.</p>

<p>Réaction de Michael sur une α-énone ; mécanisme.</p>	<p>Justifier par la compétition avec l'aldolisation l'impossibilité d'alkyler un aldéhyde.</p> <p>Interpréter la régiosélectivité de l'addition sur une α-énone à l'aide du modèle des orbitales frontalières.</p> <p>Identifier dans une analyse rétrosynthétique les réactifs permettant de réaliser une addition de Michael sur une α-énone.</p>
<p>Utilisation des organométalliques en synthèse</p> <p>Synthèse des alcools par action des organomagnésiens sur les époxydes: bilan, mécanisme schématique.</p> <p>Addition régiosélective d'organolithiens ou d'organocuprates lithiés sur les α-énones</p>	<p>Proposer une synthèse magnésienne d'un alcool.</p> <p>Proposer des synthèses régiosélectives d'une molécule cible à l'aide d'un organométallique.</p>
<p>Création de liaisons C=C</p> <p>Réaction de Wittig</p> <p>Métathèse des alcènes</p>	<p>Identifier le dérivé carbonyle et le dérivé halogéné, précurseur de l'ylure, mis en œuvre dans la création d'une liaison C=C par une réaction de Wittig.</p> <p>Identifier des précurseurs possibles pour synthétiser un alcène par métathèse. Reconnaître catalyseur et précurseur de catalyseur dans le ou les cycles décrivant le mécanisme d'une métathèse. Identifier dans un cycle catalytique de métathèse les réactifs et produits.</p>
<p>4.4 Matériaux organiques polymères</p>	
<p>Architecture moléculaire Macromolécules linéaires et réseaux Masses molaires moyennes en nombre et en masse d'un polymère non réticulé Indice de polymolécularité</p> <p>Les différents états physiques Interactions entre macromolécules. Transition vitreuse. Polymère amorphe, semi-cristallin.</p> <p>Propriétés mécaniques Matériaux thermoplastiques Élastomères</p>	<p>Repérer l'unité de répétition au sein d'une macromolécule naturelle ou artificielle. Relier l'allure de la courbe de distribution de masses molaires à l'indice de polymolécularité.</p> <p>Distinguer interactions faibles et réticulation chimique. Déterminer l'état physique d'un polymère à la température d'étude.</p> <p>Associer un diagramme de traction à un type de matériau à température fixée. Analyser une courbe d'évolution du module d'Young avec la température.</p>

Appendice 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en annexe 1 du programme de chimie de la classe de TPC1. Elle regroupe avec celle-ci 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 ces listes lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une introduction guidée suffisamment détaillée.

- Multimètre, millivoltmètre et électrodes
- Calorimètre
- Chromatographie en phase gazeuse

Appendice 2 : outils mathématiques

Les outils mathématiques dont la maîtrise est nécessaire à la mise en œuvre du programme de chimie TPC2 sont d'une part ceux qui figurent dans l'appendice 2 du programme de TPC1 et d'autre part ceux qui figurent dans la liste ci-dessous.

Les capacités relatives à la notion de différentielle d'une fonction de plusieurs variables sont limitées à l'essentiel, elles seront mobilisées principalement dans le cours de chimie sur la thermodynamique de la transformation chimique ; les fondements feront l'objet d'une étude dans le cadre du chapitre « calcul différentiel » du cours de mathématique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Calcul différentiel	
Fonctions de plusieurs variables à valeurs réelles. Dérivées partielles. Différentielle. Théorème de Schwarz.	Relier la différentielle et les dérivées partielles premières. Utiliser le théorème de Schwarz (admis).
Intégration de l'expression d'une dérivée partielle.	Intégrer une expression de la forme $\partial f/\partial x = g(x,y)$ à y fixé en introduisant une fonction $\phi(y)$ inconnue comme « constante d'intégration ».