

Royaume du Maroc



Ministère de l'Éducation Nationale,  
du Préscolaire et des Sports

**Ministère de l'Éducation Nationale, du préscolaire et des sports**

**Classes Préparatoires aux Grandes Écoles**

**Filière : Mathématiques et physique (MP)**

**Programme de physique**

**Seconde année**

## Table des matières

### Préambule

|    |  |   |
|----|--|---|
| 1. | Objectifs de formation en physique ..... | 3 |
| 2. | Repères pour l'enseignant.....           | 4 |
| 3. | Communication à l'écrit et à l'oral..... | 4 |
| 4. | Évaluation des élèves.....               | 5 |
| 5. | Organisation des programmes.....         | 5 |

### A. Formation expérimentale

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.   | Objectifs de la formation expérimentale.....          | 6  |
| 2.   | Organisation de la formation expérimentale.....       | 7  |
| 2.1. | Mesures et incertitudes.....                          | 7  |
| 2.2. | Prévention du risque au laboratoire de physique ..... | 8  |
| 2.3. | Thèmes de travaux pratiques et objectifs.....         | 9  |
| 2.4. | Compte rendu.....                                     | 12 |

### B. Contenus thématiques

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.    | Électronique : éléments de traitement du signal.....  | 14 |
| 1.1   | Composition en fréquence d'un signal périodique.....  | 14 |
| 1.2   | Effet d'un filtre sur un signal périodique.....   | 14 |
| 1.3   | Électronique numérique.....   | 14 |
| 1.4   | Modulation et démodulation d'amplitude.....   | 15 |
| 2.    | Mécanique du solide.....  | 16 |
| 3.    | Électromagnétisme.....  | 18 |
| 3.1   | Formulation locale des lois de l'électromagnétisme en régime statique.....                        | 18 |
| 3.2   | Forces de LAPLACE.....  | 19 |
| 3.3   | Induction électromagnétique.....  | 19 |
| 3.4   | Équations de MAXWELL.....   | 20 |
| 3.5   | Énergie du champ électromagnétique.....   | 21 |
| 4.    | Physique des ondes.....   | 21 |
| 4.1   | Propagation du champ électromagnétique dans une région sans charges ni courants.....              | 21 |
| 4.2   | Réflexion sous incidence normale d'une onde électromagnétique sur un conducteur parfait.....      | 22 |
| 4.3   | Rayonnement dipolaire.....  | 22 |
| 5.    | Optique.....  | 23 |
| 5.1   | Modèle scalaire des ondes lumineuses .....  | 23 |
| 5.2   | Interférences des ondes lumineuses.....   | 24 |
| 5.2.1 | Superposition d'ondes lumineuses.....   | 24 |
| 5.2.2 | Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'YOUNG .....           | 24 |
| 5.2.3 | Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : Interféromètre de MICHELSON ..... | 25 |
| 5.3   | Étude du réseau plan .....  | 25 |
| 6.    | Thermodynamique.....  | 25 |
| 6.1   | Conduction thermique.....   | 25 |
| 6.2   | Éléments de thermodynamique statistique.....  | 27 |
| 6.2.1 | Facteur de Boltzmann.....   | 27 |
| 6.2.2 | Systèmes à spectre discret d'énergies.....  | 27 |
| 6.2.3 | Capacités thermiques classiques des gaz et des solides.....                                       | 28 |
| 7.    | Physique quantique.....   | 28 |
| 7.1   | Équation de Schrödinger.....  | 29 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 7.2 | Particule libre.....  | 29 |
| 7.3 | États stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux..... | 29 |
| 7.4 | États non stationnaires d'une particule.....  | 29 |

## Annexes

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | Liste de matériel de physique.....          | 30 |
| 2. | Outils mathématiques pour la physique ..... | 30 |
| 3. | Outils numériques pour la physique .....    | 33 |

# Préambule

## 1. Objectifs de formation en physique

La réforme du programme de physique de la classe de MP est rendue nécessaire par l'évolution des contextes, scientifique, technique et pédagogique, sur le plan international. Elle permettra de réduire le décalage croissant entre la physique enseignée et la physique pratiquée telle qu'elle se manifeste en permanence via ses applications technologiques et numériques. Elle s'appuie sur les acquis déjà travaillés au secondaire qualifiant et en classe de MPSI. Le programme de physique de la filière MP vise à préparer les élèves de la deuxième année de classe préparatoire aux différents concours et à apporter les connaissances fondamentales indispensables à la formation générale d'un futur, ingénieur, enseignant ou chercheur.

La physique est une science à la fois théorique et expérimentale. Elle permet de découvrir l'Univers de l'infiniment petit jusqu'à l'infiniment grand en passant par les échelles intermédiaires de la vie de tous les jours. Son enseignement s'appuie sur une approche théorique mathématisée de la discipline et vise à élaborer des modèles, des plus simples aux plus complexes, qui seront confrontés à l'expérience. Ces deux composantes de la démarche scientifique s'enrichissent mutuellement et de façon cohérente. La formation dispensée au cours des deux années de préparation doit ainsi, dans une approche équilibrée entre théorie et expérience, apporter à l'élève les outils conceptuels et méthodologiques pour lui permettre de comprendre le monde naturel et technique qui l'entoure et de faire l'analyse critique des phénomènes étudiés. Les méthodes utilisées doivent encourager l'élève à devenir graduellement acteur de sa formation pour qu'il comprenne mieux l'impact de la science et que, plus assuré dans ses connaissances, pour qu'il soit préparé à poursuivre son cursus d'études dans les grandes écoles.

La démarche de modélisation occupe également une place centrale dans le programme pour former les élèves à établir, de manière autonome, un lien fait d'allers - retours entre le « monde » des objets, des expériences, des faits, et celui des modèles et des théories. L'enseignant doit rechercher un point d'équilibre entre des approches complémentaires : conceptuelle et expérimentale, abstraite et concrète, théorique et appliquée, inductive et déductive, qualitative et quantitative. La construction d'un modèle passe aussi par l'utilisation maîtrisée des mathématiques dont un des fondateurs de la physique expérimentale, GALILEE, énonçait déjà qu'elles sont le langage dans lequel est écrit le monde.

L'enseignement de physique est renforcé par une réhabilitation de la formation expérimentale des élèves à travers les travaux pratiques (TP) et les expériences de cours.

L'enseignement de la physique est enrichi par l'introduction **d'activités numériques** qui permettront d'aborder de nombreux champs de la discipline. L'introduction **d'activités numériques** dans le programme prend en compte la place nouvelle des sciences numériques dans la formation des scientifiques notamment dans le domaine de la simulation. Ces activités offrent aux élèves la possibilité :

- d'effectuer une modélisation avancée du monde réel, par exemple par la prise en compte d'effets non linéaires ;
- de réaliser un programme complet structuré allant de la prise en compte de données expérimentales à la mise en forme des résultats permettant de résoudre un problème scientifique donné ;
- d'étudier l'effet d'une variation des paramètres sur le temps de calcul, sur la précision des résultats, sur la forme des solutions pour des programmes d'ingénierie numérique choisis ;
- d'utiliser les fonctions de l'environnement logiciel pour résoudre un problème scientifique mis en équation lors des enseignements de physique ;
- d'utiliser les fonctions de l'environnement logiciel pour afficher les résultats sous forme graphique ;
- de tenir compte des aspects pratiques comme l'impact des erreurs d'arrondi sur les résultats, le temps de calcul ou le stockage en mémoire.

Pour certains thèmes, les **activités numériques** à développer sont explicitement signalées en *caractères gras*

*italiques* dans la colonne des commentaires du tableau des contenus thématiques. Deux **activités numériques** sont associées au thème « **Mesures et incertitudes** ». Elles définissent des savoir-faire numériques exigibles. Une simulation informatique en langage Python est requise. Dans ce cas, le professeur mettra à la disposition de ces élèves, un exemple de programme informatique écrit dans ce langage de programmation familier à l'élève en cours d'informatique. Les outils numériques développés pourront être largement appliqués lors des différentes activités d'enseignement et particulièrement lors des évaluations écrites et orales réalisées en classe.

Avec un code préalablement écrit, le professeur et l'élève pourront mettre en œuvre les outils numériques :

- avant une activité pour la préparer : estimer une incertitude, ajuster des valeurs expérimentales, comparer des prévisions théoriques et des observations expérimentales, prolonger informatiquement l'expérience, préparer un exercice, réaliser une illustration (calcul, courbe, animation, ...);
- pendant l'activité : faire un exercice, présenter une illustration ...;
- après l'activité : rédiger un compte-rendu.

En plus des activités exigibles, on pourra utiliser l'outil informatique à chaque fois que celui-ci est susceptible d'apporter un gain de temps ou une meilleure illustration des enseignements. C'est ainsi qu'on pourra faire appel, selon les circonstances, à des logiciels de calcul formel et de représentation graphique, ou à des banques de données.

L'esprit de la démarche scientifique adoptée dans l'exécution du programme de physique, empreinte de rigueur et de sens critique permanent, doit permettre à l'élève, sur toute question du programme :

- de communiquer l'essentiel des résultats sous forme claire et concise, tant à l'oral qu'à l'écrit ;
- d'en analyser le caractère de pertinence : modèle utilisé, limites du modèle, influence des paramètres, homogénéité des formules, symétries, interprétation des cas limites, ordres de grandeur et précision ;
- d'en rechercher l'impact pratique ;
- de devenir graduellement acteur de sa formation afin de mieux comprendre l'impact de la science tout en étant plus assuré dans ses connaissances, et d'être prêt à poursuivre son cursus d'études dans les grandes écoles.

## 2. Repères pour l'enseignant

Lors de la mise en application du programme et dans le cadre de la liberté pédagogique, l'enseignant organise son enseignement en respectant les principes directeurs suivants :

- privilégier la mise en activité des élèves en évitant tout dogmatisme ;
- adopter une progressivité dans la difficulté des exercices de travaux dirigés permettant ainsi aux élèves l'assimilation, l'entraînement et l'approfondissement ;
- permettre et encadrer l'expression par les élèves de leurs conceptions initiales ;
- valoriser l'approche expérimentale ;
- contextualiser les apprentissages pour leur donner du sens ;
- procéder régulièrement à des synthèses pour expliciter et structurer les savoirs et savoir-faire et les appliquer dans des contextes différents ;
- tisser des liens aussi bien entre les notions du programme qu'avec les autres enseignements, notamment les mathématiques, les génies, électrique et mécanique, et l'informatique, communs à tous les élèves de la filière MP ;
- favoriser l'acquisition d'automatismes et développer l'autonomie et l'initiative des élèves en proposant des temps de travail personnel ou en groupe.

## 3. Communication à l'écrit et à l'oral

La phase de mise au point d'un raisonnement et de rédaction d'une solution permet à l'élève de développer les savoirs et les savoir-faire d'expression écrite. La qualité de la rédaction et de la présentation, ainsi que 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 élèves, entre les élèves eux-mêmes, doit également contribuer à développer des savoirs et des savoir-faire 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 élèves en dehors du temps d'enseignement, au lycée ou à la maison, (interrogations orales, devoirs libres, comptes rendus de travaux pratiques ou de travaux dirigés ou d'interrogations orales) contribuent fortement à développer la communication à l'écrit et à l'oral. La communication utilise des moyens diversifiés : les élèves 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.

## 4. Évaluation des élèves

L'évaluation des apprentissages en classes préparatoires se définit comme une démarche de collecte d'informations conduisant à un jugement sur la valeur du travail et du résultat d'un élève, par rapport aux objectifs d'une activité d'enseignement, en vue de prendre une décision quant au cheminement ultérieur de l'apprenant. C'est un acte pédagogique ; formatif et sommatif. Elle vise à mesurer le degré de maîtrise des savoirs et savoir-faire tels que définis par le programme et le niveau d'autonomie et d'initiative des élèves. L'élaboration d'une situation d'évaluation prévoit une progression dans les difficultés suffisamment large pour apprécier les différents niveaux des élèves. L'évaluation doit être établie en relation avec les objectifs de formation et les performances attendues des élèves.

Rappelons que la filière MP s'adresse aux élèves intéressés par une approche théorique des sciences fondamentales et qui désirent comprendre le fonctionnement des différents objets par l'approche expérimentale. Il va de soi que les spécificités de cette filière doivent se retrouver dans le contenu des deux approches, théorique et expérimentale, ainsi que dans l'évaluation et le contrôle des connaissances. Les pratiques d'évaluation doivent respecter l'esprit des objectifs : tester l'aptitude de l'élève moins à résoudre les équations qu'à les poser, puis à analyser les résultats, tant dans leur caractère théorique que pratique.

## 5. Organisation des programmes

Le programme de physique est organisé en deux parties « **Formation expérimentale** » et « **Contenus thématiques** ».

Dans la première partie, sont décrits l'organisation de la formation expérimentale et les objectifs de cette formation que les élèves doivent développer et acquérir à la fin de l'année scolaire. La mise en œuvre de la formation expérimentale doit s'appuyer sur des problématiques concrètes et clairement identifiées. Elles doivent être programmées par l'enseignant de façon à assurer un apprentissage progressif de l'ensemble des connaissances et des savoir-faire attendus.

La seconde partie, intitulée « **Contenus thématiques** », est structurée autour de sept thèmes. Elle met en valeur les éléments clefs constituant l'ensemble des savoirs et des savoir-faire dont l'assimilation par les élèves est requise. Il est recommandé d'aborder les items de cette partie qui se prêtent à l'exercice, par une approche expérimentale démonstrative ou par une simulation numérique. L'expérience de cours démonstrative menée par l'enseignant pendant le cours éveillerait la curiosité des élèves et susciterait un questionnement actif et collectif, ce qui permettrait de faire évoluer la réflexion théorique et la modélisation. Le choix des thèmes des expériences de cours relève de l'initiative pédagogique et de la responsabilité du professeur.

Pour faciliter la progressivité des acquisitions, pour tenir compte des contraintes liées à la formation expérimentale et afin d'avoir une vision globale à l'échelle nationale, il est impératif de suivre la progression des sept thèmes de cette partie dans l'ordre suivant :

1. **Électronique : éléments de traitement du signal ;**
2. **Mécanique du solide ;**
3. **Électromagnétisme ;**
4. **Physique des ondes ;**
5. **Optique ;**
6. **Thermodynamique ;**
7. **Physique quantique.**

L'ordre d'exposition, au sein de chaque thème, relève bien sûr de la liberté pédagogique du professeur, cependant, il devra faciliter la progressivité des acquisitions.

Trois annexes sont consacrées :

- au matériel de physique nécessaire à la mise en œuvre des programmes ;
- aux outils mathématiques et numériques que les élèves doivent savoir mobiliser de façon autonome dans le cadre des enseignements de physique à la fin de l'année de la classe de MP.

## A. Formation expérimentale

La physique, à l'instar de toutes les sciences, est un entrelacement subtil de modèles théoriques et de validations expérimentales. Les travaux dirigés permettent aux élèves de s'entraîner et de mieux s'approprier les concepts et techniques enseignés. Les travaux pratiques leur apportent quant à eux une compréhension plus concrète des

phénomènes naturels et technologiques étudiés et développent leurs savoirs et savoir-faire expérimentaux. Ils permettent ainsi de tisser un lien étroit entre le réel et sa représentation et constituent pour les élèves un moyen d'appropriation de techniques, de méthodes, mais aussi de notions et de concepts.

D'un autre côté, l'activité expérimentale part d'un questionnement inscrit dans un cadre de réflexion théorique et conduit l'élève à analyser la tâche qui lui est demandée, à s'approprier la problématique attachée, à envisager un protocole comportant des expériences, puis à le réaliser. L'élève est alors invité à porter un jugement critique sur la pertinence des résultats obtenus, ce qui permet de conclure quant à la validité des hypothèses formulées. Une séance de travaux pratiques doit comporter non seulement la manipulation proprement dite, mais aussi des temps de réflexion, de construction intellectuelle et d'échanges avec le professeur. C'est pourquoi ce dernier choisit les sujets d'étude plus en raison de leurs qualités formatrices que des phénomènes particuliers qui en constituent le support.

## 1. Objectifs de la formation expérimentale

Le programme de physique introduit les activités expérimentales avec deux principaux objectifs : un objectif d'éducation scientifique et d'apprentissage des principaux concepts qui permettent de comprendre le monde moderne en tant que citoyen éclairé et un objectif de préparation à l'évaluation des savoirs et savoir-faire expérimentaux acquis et par la suite au monde professionnel.

À ce propos, le programme de physique souligne l'importance :

- de la pratique expérimentale (travaux pratiques et expériences de cours) comme caractéristique des sciences physiques ;
- de l'acquisition des connaissances scientifiques et techniques de base (ordres de grandeur, schémas d'explication qualitative, modélisation, information sur le monde technique et les connaissances fondamentales en physique y compris les plus récentes) ;
- de l'entraînement à la manipulation, à l'observation, à la réalisation et à la représentation d'objets et de phénomènes ;
- de l'entraînement aux modes de raisonnement des sciences physiques, en essayant de présenter aux élèves l'interaction dialectique entre théorie et expériences.

Effectués en binôme ou trinôme, les TP apprennent aux élèves :

- à se familiariser avec le matériel et à s'adapter à ses contraintes ;
- à réaliser des mesures et des acquisitions, à les commenter, les interpréter et les confronter à un modèle théorique ;
- à concevoir progressivement leurs propres protocoles expérimentaux afin de mettre en œuvre une démarche leur permettant de réaliser les TP ; puis, plus tard, **s'approprier les concepts de la démarche scientifique durables et indispensables** à tous les futurs ingénieurs, chercheurs ou enseignants.

La formation expérimentale des élèves est réalisée à travers deux composantes : les expériences de cours et les travaux pratiques. Ces deux composantes, complémentaires, ne répondent pas tout à fait aux mêmes objectifs :

- les expériences de cours démonstratives menées par l'enseignant pendant le cours suscitent un questionnement actif et collectif autour d'une situation expérimentale 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, de montrer aux élèves que « la théorie et l'expérience sont indissociablement liées » et enfin de mieux se situer par rapport aux objectifs de la leçon. Le choix des thèmes des expériences de cours relève de l'initiative pédagogique et de la responsabilité du professeur.
- les travaux pratiques permettent, dans une approche contextualisée, suscitée par une problématique clairement identifiée, et chaque fois que cela est possible transversale, l'acquisition de savoirs et savoir-faire techniques, de savoirs 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.

Afin d'améliorer la pratique expérimentale et rendre les apprentissages plus efficaces, il convient :

- de questionner les élèves avant, pendant et après le TP sur ce qu'ils sont en train de faire et surtout sur le pourquoi ;

- de faire usage d'un matériel sophistiqué (carte d'acquisition, oscilloscope numérique, spectromètre à fibre optique ...) de façon consciente et réfléchie. La mesure effectuée avec l'ordinateur, par exemple, ne doit pas se réduire à un presse-bouton. Les enjeux doivent être clairs pour les élèves ;
- d'être attentif aux exigences des élèves et à l'attendu des différentes évaluations. Ces exigences doivent être clairement motivées et non pas seulement dictées par la volonté de minimiser l'effort à fournir ;
- de varier le plus possible la typologie des TP. Par exemple, en alternant le fait d'exposer la théorie avant le TP ou laisser les élèves découvrir la théorie, en alternant entre un texte protocolaire et un bref texte les invitant à développer la mise en œuvre expérimentale après une recherche documentaire.

Il est important de préciser par écrit, en préambule de l'énoncé de chaque TP, les objectifs et les savoir-faire visés et de ne pas manquer à en évaluer rapidement le degré de réalisation et de maîtrise à la fin de chaque étape ou à la fin de la séance.

## 2. Organisation de la formation expérimentale

Cette partie précise les connaissances et les savoir-faire associés à la formation expérimentale des élèves et que ces derniers doivent acquérir à travers les activités expérimentales. Elle aborde la thématique de l'évaluation des incertitudes des mesures et la question de la prévention du risque au laboratoire de physique-chimie. Elle précise aussi la liste des thèmes de travaux pratiques et fixe les objectifs de chaque thème. Elle souligne enfin l'importance de l'évaluation régulière des acquis des élèves inscrits dans le volet de la formation expérimentale.

Une liste de matériel de physique, que les élèves doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice succincte, figure dans l'annexe « **1. Liste de matériel de physique** » du présent programme. Son placement en annexe 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.

### 2.1. Mesures et incertitudes

La notion d'incertitude est indispensable dans la démarche expérimentale. En effet, elle est nécessaire pour juger de la qualité d'une mesure ou de sa pertinence. Sans elles on ne peut examiner la compatibilité d'une mesure avec une loi physique. Ce thème intitulé « **Mesures et incertitudes** » vise à fournir les outils nécessaires à l'analyse de résultats expérimentaux.

Les élèves doivent avoir conscience de la variabilité des résultats obtenus lors d'un processus de mesure d'une grandeur physique et sa caractérisation à l'aide de l'incertitude-type, en connaître les origines et les sources, estimer leur influence sur le résultat final, comprendre et s'approprier ainsi les objectifs visés par l'évaluation des incertitudes. Ils détermineront ensuite ce qu'il faudrait faire pour améliorer la précision d'un résultat.

Enfin, il est essentiel que les notions sur les mesures et incertitudes diffusent dans chacun des thèmes du programme, théoriques et expérimentaux, tout au long des deux années préparatoires et qu'elles soient régulièrement évaluées.

Le tableau ci-dessous explicite les savoir-faire exigibles sur le thème « **Mesures et incertitudes** ». Le recours à la simulation vise à illustrer, sur la base de mesures expérimentales, différents effets de la variabilité de la mesure d'une grandeur physique dans les cas des incertitudes-types composées et de la régression linéaire.

| Notions et contenus  | Savoir-faire exigibles   |
|--|--|
| Variabilité de la mesure d'une grandeur physique. Notion d'incertitude. Incertitude-type.<br>Erreur ; composante aléatoire et composante systématique de l'erreur.<br>Incertitude-type A. Incertitude-type B. Propagation des incertitudes. Écart normalisé.<br>Évaluation d'une incertitude-type. | Identifier les incertitudes liées, par exemple, à l'opérateur, à l'environnement, aux instruments ou à la méthode de mesure.<br>Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A).<br>Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de type B).<br>Associer un intervalle de confiance à l'écart-type dans l'hypothèse d'une distribution suivant la loi normale. |
| Incertitude-type composée.<br>Incertitude élargie.   | Évaluer l'incertitude-type d'une grandeur s'exprimant en fonction d'autres grandeurs, dont les incertitudes-types sont connues, à l'aide d'une somme, d'une différence, d'un produit ou d'un quotient.<br>Comparer entre elles les différentes contributions lors de l'évaluation d'une incertitude-type composée.   |

|   |  |
|---|--|
|   | <i>Activité numérique : simuler, à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur, un processus aléatoire permettant de caractériser la variabilité de la valeur d'une grandeur composée.</i>  |
| Écriture du résultat d'une mesure.<br>Chiffres significatifs. | Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat d'une mesure.   |
| Comparaison de deux valeurs ; écart normalisé.                | Comparer deux valeurs dont les incertitudes-types sont connues à l'aide de leur écart normalisé.<br>Analyser les causes d'une éventuelle incompatibilité entre le résultat d'une mesure et le résultat attendu par une modélisation.   |
| Régression linéaire.  | Utiliser un logiciel de régression linéaire afin d'obtenir les valeurs des paramètres du modèle.<br>Analyser les résultats obtenus à l'aide d'une procédure de validation : analyse graphique intégrant les barres d'incertitude ou analyse des écarts normalisés.<br><i>Activité numérique : simuler, à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur, un processus aléatoire de variation des valeurs expérimentales de l'une des grandeurs – simulation Monte-Carlo – pour évaluer l'incertitude sur les paramètres du modèle.</i> |

## 2.2. Prévention du risque au laboratoire de physique et de chimie

L'apprentissage et le respect des règles de sécurité dans les laboratoires et les salles de travaux pratiques visent d'une part à réduire les risques liés aux activités expérimentales et d'autre part à sensibiliser les élèves au respect de la législation ainsi qu'à l'impact de leur activité sur l'environnement. L'élève doit adopter une approche méthodique, prudente et soignée et se concentrer sur ce qu'il est en train de faire.

Des savoirs et des « savoir-faire » sont attachés au thème « **Prévention du risque au laboratoire de physique et de chimie** ». Ils sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

| Notions et contenus  | Savoir-faire exigibles   |
|--|--|
| <b>1. Prévention des risques au laboratoire</b>  | Adopter une attitude responsable et adaptée au travail en laboratoire.<br>Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.   |
| - <b>Risque chimique</b><br>Règles de sécurité au laboratoire. Classes et catégories de danger. Pictogrammes de sécurité pour les produits chimiques. Mentions de danger (H) et conseils de prudence (P). Fiches de sécurité.  | Relever les indications sur le risque associé au prélèvement, au mélange et au stockage des produits chimiques et adopter une attitude responsable lors de leur utilisation.       |
| - <b>Risque électrique</b><br>Le risque électrique comprend le risque de contact, direct ou non, avec une pièce nue sous tension, le risque de court-circuit, et le risque d'arc électrique. Ses conséquences sont l'électrisation, l'électrocution, l'incendie, l'explosion...          | Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.  |
| - <b>Risque optique et électromagnétique</b><br>Les rayonnements optique et électromagnétique auxquels peuvent être exposés les élèves sont parfois nocifs pour les yeux et pour la peau. Une démarche de prévention adaptée permet de réduire les risques pour la santé et la sécurité. | Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.<br>Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation des émetteurs d'ondes hyperfréquences. |
| - <b>Risque thermique</b><br>L'exposition à une ambiance thermique chaude ou la manipulation de corps chauds ou froids peut être à l'origine de brûlures ou de gelures localisées potentiellement graves.  | Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou froids.  |
| - <b>Risque mécanique</b><br>Le risque mécanique englobe la coupure, la lacération ou la piqûre, l'écrasement, ...   | Adopter une attitude responsable lors de manipulations de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions ou lors de la conjonction d'un                                  |



|   |  |
|---|--|
|   | élément d'un montage et l'énergie d'un mouvement.  |
| <p>- <b>Risque sonore</b></p> <p>Le bruit dans les salles de travail constitue une nuisance majeure et peut provoquer des surdités mais aussi stress et fatigue qui, à la longue, ont des conséquences sur la santé et la qualité du travail.</p> | Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation des émetteurs d'onde infrasonores, sonores ou ultrasonores.   |
| <b>2. Prévention de l'impact environnemental</b>  |  |
| Traitement et rejet des espèces chimiques.  | Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux. |

### 2.3. Thèmes de travaux pratiques et objectifs

La liste suivante est une proposition non exhaustive de thèmes des TP. **Le choix des sujets, des manipulations à réaliser et de la progression des TP (comme celui des expériences de cours) relève de l'initiative pédagogique et de la responsabilité du professeur :** les thèmes proposés par le programme sont purement indicatifs, ceux-ci peuvent être remplacés par tout thème à l'initiative du professeur et ne faisant appel qu'aux connaissances du programme de la classe. Cependant, leur contenu doit répondre aux objectifs fixés par le programme. Les connaissances et les savoir-faire expérimentaux développés à travers les objectifs des différents thèmes de travaux pratiques sont exigibles aux épreuves d'évaluation, écrites et expérimentales, en classe et éventuellement aux concours. Ils peuvent faire l'objet de questions aux épreuves écrites et orales. Rappelons qu'à travers les thèmes des travaux pratiques, il faudra procéder à l'évaluation des incertitudes types A et types B, à l'étude de leur propagation à l'aide d'un langage de programmation et à la présentation de la valeur numérique d'un résultat expérimental.

| N°                  | Thèmes des travaux pratiques   | Objectifs  |
|---------------------|--|--|
| <b>Électronique</b> |  |  |
| <b>1</b>            | Utilisation d'une station d'acquisition et de traitement automatique des données | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Connaître des caractéristiques essentielles d'un appareil à l'aide de sa notice ou directement de l'appareil : impédance d'entrée, impédance de sortie, bande passante selon le cas.</li> <li>- Maîtriser l'utilisation des instruments électroniques.</li> <li>- Appréhender les conséquences des valeurs de la résistance d'entrée ou de sortie d'un appareil de mesure sur le fonctionnement d'un circuit.</li> <li>- Comprendre et réaliser l'acquisition d'un signal périodique simple puis l'analyser par transformée de FOURIER.</li> <li>- Caractériser un signal à l'aide de son spectre.</li> <li>- Mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'action d'un filtre sur un signal périodique.</li> <li>- Choisir de façon cohérente les paramètres (durée totale d'acquisition, nombre d'échantillons, fréquence d'échantillonnage) d'une d'acquisition numérique afin de respecter la condition de NYQUIST-SHANNON.</li> <li>- Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire et analyser ses caractéristiques.</li> <li>- Confronter les résultats expérimentaux aux expressions théoriques.</li> <li>- Déterminer rapidement le type de filtre étudié et de sa fréquence de coupure.</li> <li>- Tracer le diagramme de BODE expérimental en gain et en phase.</li> <li>- Obtenir la réponse d'un filtre à un signal crête et à un signal triangulaire.</li> <li>- Mettre en évidence du caractère intégrateur ou dérivateur d'un filtre dans son diagramme asymptotique.</li> <li>- Observer les limitations dues aux imperfections de l'amplificateur</li> </ul> |
| <b>2</b>            | Effet d'un filtre linéaire sur un signal périodique                              |  |
| <b>3</b>            | Analyse spectrale d'un signal électronique                                       |  |
| <b>4</b>            | Traitement numérique d'un signal (1/2) : échantillonnage, numérisation           |  |
| <b>5</b>            | Traitement numérique d'un signal (2/2) : filtrage numérique                      |  |

|                |   |  |
|----------------|---|--|
| 6              | Modulation et démodulation d'amplitude (1/2)                    | <p>linéaire intégré : limitations en courant, en tension et en fréquence.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Détecter, dans un montage à ALI, les manifestations de la vitesse limite de balayage et de la saturation de l'intensité du courant de sortie.</li> <li>- Produire un signal par multiplication de signaux.</li> </ul>   |
| 7              | Modulation et démodulation d'amplitude (2/2)                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mettre en œuvre la modulation d'amplitude.</li> <li>- Décrire le spectre d'un signal modulé.</li> <li>- Réaliser la démodulation d'amplitude par détection de crête.</li> <li>- Réaliser la démodulation synchrone.</li> <li>- Mettre en évidence du caractère intégrateur du montage intégrateur et la condition sur la période du signal à intégrer.</li> </ul>   |
| 8              | Conversion alternatif-continu                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Illustrer l'utilité des fonctions de transfert pour un système linéaire à un ou plusieurs étages.</li> <li>- Détecter le caractère non linéaire d'un système par l'apparition de nouvelles fréquences.</li> <li>- Savoir échantillonneur par multiplication de deux signaux.</li> <li>- Connaître le principe d'un échantillonneur et d'un échantillonneur-bloqueur.</li> </ul>   |
| 9              | Oscillateurs auto-entretenus quasi sinusoïdaux                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mettre en œuvre un convertisseur analogique/numérique et un traitement numérique afin de réaliser un filtre passe-bas.</li> <li>- Utiliser un convertisseur numérique/analogique pour restituer un signal analogique.</li> </ul>  |
| 10             | Oscillateurs de relaxation                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mettre en évidence et étudier le phénomène de repliement de spectre dû à l'échantillonnage lors de l'utilisation d'un oscilloscope numérique ou d'une carte d'acquisition.</li> <li>- Mettre en œuvre un oscillateur quasi-sinusoïdal et un oscillateur de relaxation.</li> <li>- Analyser les spectres des signaux générés lors de la mise en œuvre d'un oscillateur.</li> </ul>   |
| <b>Optique</b> |   |  |
| 11             | Polarisation des ondes lumineuses                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Éclairer un objet de manière adaptée.</li> <li>- Optimiser la qualité d'une image.</li> <li>- Mesurer une longueur sur un banc d'optique.</li> </ul>  |
| 12             | Interférences et diffraction des ondes lumineuses               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Choisir une ou plusieurs lentilles en fonction des contraintes expérimentales.</li> <li>- Utiliser des polariseurs et étudier quantitativement la loi de MALUS.</li> <li>- Mettre à profit les réglages concernant la lunette et le collimateur afin d'utiliser un goniomètre.</li> </ul>   |
| 13             | Interféromètre de MICHELSON : réglage et mesures optiques (1/2) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Savoir mesurer un angle à l'aide du vernier d'un goniomètre.</li> <li>- Étudier la déviation de la lumière par un réseau.</li> <li>- Mettre en évidence le minimum de déviation.</li> </ul>   |
| 14             | Interféromètre de MICHELSON : réglage et mesures optiques (2/2) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesurer une longueur d'onde optique.</li> <li>- Procéder à l'évaluation des incertitudes-types B et leur propagation à l'aide d'un langage de programmation.</li> <li>- Visualiser les spectres d'émission atomique du sodium, du mercure et de l'hydrogène.</li> </ul>   |
| 15             | Réglage et utilisation d'un goniomètre, spectroscopie à réseau  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Déterminer un spectre à l'aide d'un spectromètre à fibre optique.</li> <li>- Obtenir, observer et analyser quantitativement des figures d'interférences.</li> <li>- Prendre conscience de la très forte sensibilité des méthodes interférométriques.</li> <li>- Savoir réaliser un protocole de réglage en contrôlant les étapes successives.</li> <li>- Régler l'interféromètre de MICHELSON compensé en lame d'air, au contact optique et coin d'air.</li> <li>- Obtenir, observer et analyser les franges de la lame d'air.</li> <li>- Obtenir, observer et analyser les franges du coin d'air.</li> <li>- Mesurer le déplacement du miroir mobile d'un interféromètre de MICHELSON.</li> <li>- Analyser une lame de phase introduite sur un des trajets d'un</li> </ul> |

|                           |  |  |
|---------------------------|--|--|
|                           |  | <p>interféromètre de MICHELSON</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obtenir une estimation de la longueur de cohérence d'une source à l'aide d'un interféromètre de MICHELSON réglé en lame d'air.</li> <li>- Mesurer l'écart de longueur d'onde entre les deux raies les plus lumineuses de la lampe à vapeur de sodium.</li> <li>- Comprendre la localisation des franges avec une source large.</li> <li>- Obtenir la teinte plate au contact optique</li> <li>- Obtenir, observer et analyser les interférences en lumière blanche</li> <li>- Observer le spectre cannelé.</li> <li>- Interpréter qualitativement les observations des interférences en lumière blanche.</li> <li>- Se servir de lumière blanche pour obtenir un contact optique de meilleure qualité.</li> <li>- Savoir utiliser une lame à retard.</li> <li>- Mettre en œuvre un photorécepteur.</li> <li>- Mettre en œuvre des expériences utilisant un capteur photographique numérique.</li> <li>- Réaliser un enregistrement à l'aide d'un capteur CCD.</li> </ul> |
| <b>Mécanique</b>          |  |  |
| 16                        | Étude d'oscillateurs mécaniques : pendule pesant, mesure d'un moment d'inertie | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Étudier le mouvement oscillatoire d'un pendule mécanique.</li> <li>- Mesurer la période d'oscillation d'un pendule.</li> <li>- Mettre en évidence le défaut d'isochronisme du pendule.</li> <li>- Mesure de la période d'oscillation en fonction de la longueur.</li> <li>- Mesurer le moment d'inertie d'un solide en rotation et étudier sa variation quand on déplace les masses qui le constituent.</li> <li>- Déterminer l'accélération de la pesanteur g.</li> <li>- Comparer les oscillations d'un pendule pesant au modèle du pendule simple.</li> <li>- Réaliser l'acquisition expérimentale du portrait de phase d'un pendule pesant.</li> <li>- Mesurer un couple de frottement.</li> <li>- Effectuer une mesure d'un coefficient de frottement.</li> <li>- Réaliser l'étude énergétique d'un pendule pesant et mettre en évidence la diminution de l'énergie mécanique.</li> </ul>  |
| <b>Thermodynamique</b>    |  |  |
| 17                        | Conduction thermique   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Comparer expérimentalement les conductivités thermiques de quelques matériaux.</li> <li>- Classer les matériaux selon leurs propriétés isolantes,</li> <li>- Étudier de la propagation de la chaleur dans des barres métalliques</li> <li>- Mesurer la conductivité thermique d'un matériau.</li> <li>- Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.</li> </ul>   |
| <b>Physique des ondes</b> |  |  |
| 18                        | Ondes électromagnétiques centimétriques en propagation libre                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyser la phénoménologie associée à différents types d'ondes : planes, sphériques, progressives, stationnaires, harmoniques et comprendre les liens possibles entre ces qualificatifs.</li> </ul>   |
| 19                        | Ondes électromagnétiques le long d'un câble coaxial                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Comprendre l'influence de l'extension limitée du milieu de propagation : apparition d'ondes stationnaires ou sélection d'ondes guidées mais toujours associée à une discrétisation.</li> <li>- Comprendre les origines de la dispersion : réponse du milieu ou conditions aux limites transverses.</li> <li>- Comprendre les caractéristiques de la propagation guidée : confinement, guidage, discrétisation des modes propagatifs, structure mixte stationnaire et progressive des ondes guidées, dispersion de mode.</li> <li>- Déterminer la période, la fréquence et la longueur d'onde d'une onde électromagnétique.</li> <li>- Étudier l'émission, la polarisation, la propagation et la réception</li> </ul>  |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  | <p>d'une onde électromagnétique dans le domaine des ondes centimétriques (ou micro-ondes).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques : mettre en œuvre un détecteur dans le domaine des ondes centimétriques.</li> <li>- Mettre en évidence une polarisation rectiligne : identifier, à l'aide d'un polariseur, une onde polarisée rectilignement et déterminer sa direction de polarisation.</li> <li>- Réaliser des expériences de goniométrie, de diffraction et d'interférences aux échelles de longueur d'onde des hyperfréquences.</li> <li>- Tracer un diagramme d'antenne.</li> <li>- Étudier la propagation d'un signal dans le câble coaxial.</li> </ul> |
|--|--|---|

## 2.4. Compte-rendu

La séance de travaux pratiques donne lieu à une synthèse écrite comportant, sous forme succincte, l'indication et l'exploitation des résultats. À cet égard on attache de l'importance à leur présentation graphique. L'utilisation d'un ordinateur, soit pour l'acquisition et le traitement de données expérimentales, soit pour comparer les résultats des mesures aux données théoriques, évite des calculs longs et répétitifs et favorise le tracé de courbes. Si les élèves sont appelés à utiliser d'autres appareils, toutes les indications nécessaires doivent leur être fournies.

Il est impératif d'exiger de l'élève la rédaction d'un compte-rendu pendant une séance de travaux pratiques. Cette aptitude constitue un des objectifs de la formation scientifique. 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 bien préparer les élèves de CPGE à la présentation des travaux et projets qu'ils auront à conduire et à exposer aux épreuves orales et au cours de leur formation en école d'ingénieur et, plus généralement, dans le cadre de leur métier de chercheur ou d'ingénieur.

L'élève doit rédiger dans son cahier, au fur et à mesure, un compte-rendu :

- définissant les objectifs du thème de travaux pratiques ;
- précisant la problématique préalablement définie ;
- expliquant les choix expérimentaux effectués et les techniques de mesure utilisées ;
- comprenant les mesures effectuées, et les courbes tracées et/ou visualisées, les photos des écrans d'appareil de mesure ou de visualisation et précisant bien les choix des paramètres de mesure (amplitudes, fréquences, calibres, etc.) ;
- interprétant les différentes courbes et mesures en relation avec les résultats théoriques fournis.

Si l'intérêt du compte-rendu est évident, en revanche il faut veiller à ce qu'il ne prenne pas une importance considérable, en temps, par rapport au travail expérimental proprement dit.

D'autre part, les différentes activités pratiques doivent être couronnées par l'évaluation **hebdomadaire et trimestrielle** des savoirs et savoir-faire expérimentaux. Lors de cette évaluation, il faudrait bien expliciter les distinctions entre savoir et savoir-faire, et entre savoir utiliser et savoir mettre en œuvre.

## B. Contenus thématiques

Chaque thème du programme de physique comporte une introduction spécifique indiquant les objectifs de formation et les domaines d'application. Elle est complétée par un tableau en deux colonnes qui identifient, d'une part, les notions et contenus à connaître, et donc exigibles, d'autre part, des commentaires ainsi que les activités numériques, supports de la formation. Les activités numériques sont identifiées en **caractères gras italiques** ; le langage de programmation conseillé est le **langage Python**. Les thèmes des **activités numériques** sont choisis de manière à représenter la diversité des applications possibles. Le professeur veillera à ce qu'une concertation régulière avec l'enseignant d'informatique soit développée autour de l'exécution de ces activités.

Le programme a été rédigé et abondamment commenté, avec le souci majeur de faciliter la transition entre l'enseignement secondaire et le système des classes préparatoires. Pour atteindre ce but, il a été jugé indispensable :

- d'introduire progressivement les outils et les méthodes de l'enseignement de physique post-baccalauréat sur des situations conceptuelles aussi proches que possible de celles qui ont été rencontrées au lycée ; en

évitant, quand c'est possible, l'emploi d'outils mathématiques non encore maîtrisés, liés à des concepts physiques nouveaux ;

- de coordonner entre les enseignements de mathématiques, sciences industrielles, informatique, physique et chimie utilisant des outils souvent communs, pour faciliter le travail d'assimilation des élèves. Ceci rejette tout cloisonnement des enseignements scientifiques et suppose au contraire une concertation étroite au sein de l'équipe pédagogique ;
- de valoriser l'approche expérimentale des phénomènes pour stimuler chez l'élève une attitude active et créatrice, favorisant l'appropriation des connaissances et le développement d'un certain savoir-faire manuel. Les travaux pratiques (TP) et les expériences de cours sont les temps forts de cette valorisation.
- de valoriser l'approche numérique afin de permettre aux élèves de mettre en œuvre leurs connaissances en informatique dans le cadre de l'étude d'une application en physique.

Les intitulés de chapitre sont très classiques, de façon que les acquis des élèves soient clairement identifiés.

| Thème   | Partie  | Volume horaire indicatif (heure) |
|---|---|----------------------------------|
| <b>1. Électronique : éléments de traitement du signal</b> | <b>1.1.</b> Composition en fréquence d'un signal périodique   | 6                                |
|   | <b>1.2.</b> Effet d'un filtre sur un signal périodique  | 6                                |
|   | <b>1.3.</b> Électronique numérique  | 4                                |
|   | <b>1.4.</b> Modulation et démodulation d'amplitude  | 4                                |
| <b>2. Mécanique</b>                                       | <b>2.</b> Mécanique du solide   | 14                               |
| <b>3. Électromagnétisme</b>                               | <b>3.1.</b> Formulation locale des lois de l'électromagnétisme en régime statique                   | 4                                |
|   | <b>3.2.</b> Forces de LAPLACE   | 4                                |
|   | <b>3.3.</b> Induction électromagnétique   | 8                                |
|   | <b>3.4.</b> Équations de MAXWELL  | 4                                |
|   | <b>3.5.</b> Énergie du champ électromagnétique  | 4                                |
| <b>4. Physique des ondes</b>                              | <b>4.1.</b> Propagation du champ électromagnétique  | 12                               |
|   | <b>4.2.</b> Réflexion sous incidence normale d'une onde électromagnétique sur un conducteur parfait | 4                                |
|   | <b>4.3.</b> Rayonnement dipolaire   | 4                                |
| <b>5. Optique</b>   | <b>5.1.</b> Modèle scalaire des ondes lumineuses  | 4                                |
|   | <b>5.2.</b> Interférences des ondes lumineuses  | 12                               |
|   | <b>5.3.</b> Étude du réseau plan  | 6                                |
| <b>6. Thermodynamique</b>                                 | <b>6.1.</b> Conduction thermique  | 8                                |
|   | <b>6.2.</b> Éléments de thermodynamique statistique   | 8                                |
| <b>7. Physique quantique</b>                              | <b>7.1.</b> Équation de SCHRÖDINGER   | 4                                |
|   | <b>7.2.</b> Particule libre   | 4                                |
|   | <b>7.3.</b> États stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux          | 10                               |
|   | <b>7.4.</b> États non stationnaires d'une particule   | 2                                |

## 1. Électronique : éléments de traitement du signal

Ce thème renforce et complète l'étude des circuits électriques menée en première année. Il permet d'aborder l'étude du traitement d'un signal périodique par un système linéaire. Les composants électroniques au programme de seconde année MP sont les mêmes que ceux du programme de première année MPSI. En particulier, aucune connaissance particulière sur les diodes et les diodes Zener ne peut être exigée.

La composante expérimentale est très forte dans cette partie et les savoir-faire expérimentaux exigibles ont vocation à être principalement développées au cours de séances de travaux pratiques.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- relier la décomposition spectrale et l'allure du signal dans le domaine temporel.
- relier les représentations, temporelle et fréquentielle, d'un signal ;
- exploiter un développement en série de FOURIER fourni par un formulaire pour prévoir son évolution à travers un système linéaire ;
- comprendre le rôle central de la linéarité des systèmes pour interpréter la forme du signal de sortie et relier linéarité et superposition ;
- effectuer quelques opérations de traitement du signal en électronique analogique et numérique ;
- illustrer expérimentalement la condition de NYQUIST-SHANNON ;
- expliquer et mettre en œuvre un filtrage numérique.

### 1.1 Composition en fréquence d'un signal périodique

| Programme  | Commentaires   |
|--|--|
| Composition en fréquence d'un signal périodique.<br>Théorème de FOURIER.<br><br>Spectre d'un signal périodique.<br><br><br><br><br><br>Caractéristiques d'un signal périodique : valeur moyenne, valeur efficace, valeur efficace vraie, fondamental et harmoniques. | On admet le théorème de FOURIER.<br>On fait remarquer qu'un signal possède une représentation dans l'espace des temps et dans l'espace des fréquences.<br>On attribue aux différentes harmoniques le rôle qu'elles jouent dans la forme du signal analysé.<br>On donne la décomposition en série de FOURIER des signaux : sinusoïdal, carré et triangulaire.<br><br>On détermine ces caractéristiques pour des signaux usuels : signal sinusoïdal avec composante continue, rectangulaire et triangulaire. |

### 1.2 Effet d'un filtre sur un signal périodique

Dans la cette partie, on met l'accent sur l'action d'un filtre linéaire sur un signal périodique, l'objectif étant de comprendre le rôle central de la linéarité des systèmes pour interpréter ou prévoir la forme du signal résultant d'un filtrage.

| Programme   | Commentaires   |
|---|--|
| Effet d'un filtre du premier ou du second ordre sur la composition spectrale d'un signal périodique ; utilisation de la fonction de transfert ; filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande. | On insiste sur l'intérêt de l'étude de la réponse d'un système linéaire à un signal sinusoïdal entamée en première année et on dégage l'importance du critère de linéarité du système.<br>L'utilisation en travaux pratiques des moyens numériques d'analyse harmonique permet des comparaisons immédiates entre fonction de transfert et représentation spectrale d'une réponse du système. |
| Caractères moyennneur, intégrateur ou dérivateur dans un domaine limité de fréquences.  | On illustre quantitativement ces différents comportements.<br>On fait remarquer, à travers un exemple choisi, que le caractère non linéaire d'un système se manifeste par l'apparition de nouvelles fréquences en sortie pour une entrée sinusoïdale.  |

### 1.3 Électronique numérique

L'avènement et les performances toujours croissantes des calculateurs électroniques ont conduit à vouloir

manipuler les signaux issus de capteurs, non plus sous forme analogique mais sous une forme dite numérique ou numérisée, manipulable par ces calculateurs.

Cette partie, à vocation expérimentale, aborde la question du traitement numérique du signal dans le prolongement du programme de première année. Elle est principalement étudiée de manière expérimentale et constitue une initiation au traitement numérique des signaux à travers les points suivants : l'échantillonnage et le repliement de spectre, les conversions analogique/numérique et numérique/analogique et le filtrage numérique. Le phénomène de repliement de spectre est expliqué qualitativement au moyen d'illustrations démonstratives, l'objectif étant de mettre en place la condition de NYQUIST-SHANNON afin de réaliser convenablement une acquisition numérique en vue d'une analyse spectrale. Un filtrage numérique, du type passe-bas, est réalisé à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique (CAN) et d'un traitement numérique, un convertisseur numérique/analogique (CNA) restitue ensuite un signal de sortie analogique.

Afin de mettre en évidence d'autres effets associés à l'échantillonnage, on réalise de manière comparative un filtre analogique passe-bas et un filtre numérique remplissant la même fonction. Ce dernier est réalisé à l'aide d'une chaîne de traitement : CAN, algorithme numérique, CNA. On étudie expérimentalement l'influence de la fréquence d'échantillonnage.

| Programme   | Commentaires   |
|---|--|
| Signal analogique et signal numérique. Schéma synoptique de traitement d'un signal analogique.<br><br>Échantillonnage.<br>Analyse spectrale numérique : choix des paramètres (durée, nombre d'échantillons, fréquence d'échantillonnage) d'une acquisition numérique afin de respecter la condition de NYQUIST-SHANNON. Théorème de NYQUIST-SHANNON.<br>Structure du spectre du signal obtenu après échantillonnage. Repliement du spectre. | On explique de façon qualitative les diverses transformations que l'on fait subir à un signal analogique pour le rendre manipulable par un ordinateur : échantillonnage, quantification et codage.<br><br>On réalise en travaux pratiques, l'échantillonnage d'un signal. On commente la structure du spectre du signal obtenu après échantillonnage et on montre l'influence de la fréquence d'échantillonnage.<br><br>On met en évidence le phénomène de repliement de spectre provoqué par l'échantillonnage lors de l'utilisation d'un oscilloscope numérique ou d'une carte d'acquisition.  |
| Filtrage numérique.<br><br><br><br><br><br>Restitution d'un signal analogique.  | On présente une étude comparative d'un filtre analogique passe-bas et d'un filtre numérique remplissant la même fonction.<br>On met en œuvre, en travaux pratiques, un convertisseur analogique/numérique et un traitement numérique afin de réaliser un filtre passe-bas.<br>On explique comment restituer le signal analogique à l'aide d'un filtre passe-bas. On met en œuvre, en travaux pratiques, un convertisseur numérique/analogique pour restituer un signal analogique.<br><b>Activité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, simuler un filtrage numérique et visualiser son action sur un signal périodique.</b> |

#### 1.4 Modulation et démodulation d'amplitude

La problématique de la transmission d'un signal temporel codant une information est abordée dans l'étude et la réalisation d'une modulation, en relation avec la partie du programme consacrée à la propagation des ondes électromagnétiques et le traitement du signal. Dans un premier temps, on fait une présentation sommaire du multiplieur analogique puis on aborde l'aspect théorique de la modulation et de la démodulation. Les aspects expérimentaux du sujet sont traités en travaux pratiques.

| Programme  | Commentaires  |
|--|---|
| Fonction multiplication analogique : schéma et relation de fonctionnement.                       | La fonction multiplication analogique concerne un multiplieur analogique réalisant la fonction $v_s(t) = k_v \cdot v_{e1}(t) \cdot v_{e2}(t)$ . |
| Transmission d'un signal codant une information variant dans le temps. Intérêt de la modulation. | On définit un signal modulé en amplitude, en fréquence, en phase.   |

|  |  |
|--|--|
|  | On explique l'intérêt de la modulation dans la transmission des signaux.<br>On donne des ordres de grandeur des fréquences utilisées pour les signaux radio AM, FM, la téléphonie mobile.  |
| Modulation d'amplitude à l'aide d'un multiplieur analogique, taux de modulation.                             | On interprète le signal modulé comme le produit d'une porteuse par une modulante et on décrit le spectre d'un signal modulé.   |
| Démodulation d'amplitude :<br><br>- Démodulation par détection d'enveloppe.<br><br>- Démodulation synchrone. | On justifie la nécessité d'utiliser une opération non linéaire.<br>On fait constater l'influence du taux de modulation sur la démodulation d'amplitude.<br>On explique le principe de la détection synchrone.<br>On réalise en travaux pratiques une démodulation synchrone. |

## 2. Mécanique du solide

Le programme de mécanique de MP vise à compléter les acquis de mécanique du cours de MPSI. Il est consacré à la mécanique du solide.

Les notions relatives à un système fermé de points matériels sont introduites sans formalisme excessif et constituent une introduction à l'étude du solide.

Les lois de la mécanique des systèmes sont formulées pour les systèmes fermés. Aucune connaissance ne peut être exigée sur la mise en œuvre de ces lois pour un système ouvert. Les théorèmes généraux sont déduits des lois de NEWTON.

Dans cette partie, on étudie le mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe. Il s'agit de définir ce mouvement en remarquant que tout point du solide décrit un cercle autour de l'axe avec une même vitesse angulaire et de déterminer la vitesse de chaque point en fonction de celle-ci et de la distance à l'axe de rotation.

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

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.

L'étude des lois de COULOMB, limitée au seul cas de la translation, permet de mettre en œuvre un mode de raisonnement spécifique et particulièrement formateur, sans pour autant omettre les conséquences expérimentales.

L'étude générale d'un mouvement composé d'une translation dans un référentiel galiléen et d'une rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel barycentrique ne figure pas au programme.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- conduire de manière autonome l'étude d'un problème avec ou sans frottement solide : définir un système, choisir un référentiel d'étude éventuellement non galiléen en évaluant les avantages et les inconvénients de ce choix, choisir un système de repérage, procéder à un bilan complet des forces appliquées, choisir une méthode de mise en équations lorsque plusieurs méthodes sont possibles ;
- effectuer un bilan énergétique en mécanique ;
- identifier et utiliser des grandeurs conservatives ;
- utiliser divers outils (discussions graphiques, résolution analytique, résolution numérique) pour discuter les solutions de la ou des équations différentielles modélisant l'évolution temporelle d'un système ;
- faire apparaître et exploiter des analogies : circuit RLC en électrocinétique, pendule pesant aux « petits » angles.

| Programme  | Commentaires |
|--|--------------|
| <b>Cinématique du solide et des solides en contact</b> |              |
| Masse d'un système de points matériels. Conservation   |              |



|  |  |
|--|--|
| de la masse pour un système fermé.   |  |
| Barycentre d'un système de points.<br>Référentiel barycentrique.   | On utilise indifféremment, centre de masse, barycentre ou centre d'inertie.<br>On exploite les symétries pour prévoir la position du barycentre d'un système homogène.   |
| Définition d'un solide.<br>Champ des vitesses d'un solide.   | On différencie un solide d'un système déformable.  |
| <b>Description du mouvement d'un solide dans deux cas particuliers :</b><br>- mouvement de translation ;<br><br>- mouvement de rotation autour d'un axe fixe.  | On décrit une translation rectiligne ainsi qu'une translation circulaire.<br>On décrit la trajectoire d'un point quelconque du solide et on exprime sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.  |
| Contact entre deux solides.<br>Vitesse de glissement.<br>Mouvements de glissement, de roulement et de pivotement.  | On suppose le contact ponctuel.  |
| <b>Cinétique d'un solide</b>   |  |
| Quantité de mouvement (ou résultante cinétique) d'un système de points. Lien avec la vitesse du centre de masse d'un système fermé.<br><br>Moment cinétique en un point et par rapport à un axe orienté.<br><br>Moment cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe, moment d'inertie.<br><br>Énergie cinétique.<br>Énergie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.   | On établit l'expression de la quantité de mouvement pour un système de points matériel sous la forme :<br>$\vec{p} = m\vec{v}(G / R)$<br><br>On se limite à la définition et à l'utilisation du moment d'inertie. Tout calcul de moment d'inertie est hors programme.  |
| <b>Dynamique du solide</b>   |  |
| Forces intérieures, forces extérieures.<br><br><br><br><br><br>Moment d'une force par rapport à un axe orienté.<br>Couple.<br><br><b>Modélisation des efforts entre solides en contact</b><br>Aspects microscopiques du contact entre deux solides.<br>Lois phénoménologiques de COULOMB relatives au frottement de glissement dans le seul cas d'un solide en translation.<br><br><br><br><br><br>Liaisons pivot. Modèle de liaison parfaite. Moment d'une liaison pivot. | On peut utiliser indifféremment les termes "forces", "actions" ou "efforts".<br>On rappelle les forces d'inertie dans le cas d'un référentiel non galiléen.<br>Les frottements de roulement et de pivotement sont hors programme.<br><br>On définit un couple de forces et le moment d'un couple.<br>On calcule le moment d'une force par rapport à un axe orienté en utilisant le bras de levier.<br><br>On signale qu'à l'échelle mésoscopique, la surface de contact apparaît irrégulière et rugueuse avec des contacts ponctuels au niveau des rugosités et responsables du frottement sec. Des interactions microscopiques de nature électromagnétique et difficilement modélisables, se font au niveau des points de contact des rugosités ou points d'adhérence. Elles s'opposent à l'interpénétrabilité des deux solides ainsi qu'au glissement relatif de l'un par rapport à l'autre.<br>On justifie le moment que la liaison pivot peut produire. On précise dans le cas d'une liaison pivot, même parfaite, que les actions de liaison ne peuvent pas en général être représentées par une seule force rencontrant l'axe. |
| Théorème de la résultante cinétique.   | On souligne le lien avec la deuxième loi de NEWTON.  |

|  |   |
|--|---|
| Loi de conservation de la quantité de mouvement pour un système isolé.   | On exploite les lois de COULOMB dans les trois situations : équilibre, mise en mouvement, freinage. On formule une hypothèse (quant au glissement ou non) et on la valide.<br>On traite un exemple du mouvement d'un solide dans un référentiel non galiléen.<br><i>Activité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, simuler une situation mécanique dans laquelle intervient au moins un changement de mode de glissement.</i> |
| Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe.<br>Pendule pesant : équation du mouvement, intégrale première du mouvement, analogie avec l'équation de l'oscillateur harmonique.       | À l'aide d'une acquisition expérimentale du portrait de phase d'un pendule pesant, on précise la bifurcation entre un mouvement pendulaire et un mouvement révolutif, on met en évidence le non-isochronisme des oscillations et une diminution de l'énergie mécanique.<br><i>Activité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, mettre en évidence le non-isochronisme des oscillations.</i>                                     |
| Puissance d'une force s'exerçant sur un solide en rotation.<br>Aspect énergétique des forces de frottement.<br>Théorème de l'énergie cinétique/Théorème de la puissance cinétique pour un solide en rotation autour d'un axe fixe. | On affirme la nullité du travail des forces intérieure dans le cas d'un solide.   |

### 3. Électromagnétisme

L'enseignement de l'électromagnétisme de la classe de MP s'inscrit dans la continuité du thème « Électromagnétisme » du programme de MPSI. Il aborde trois régimes :

1. le régime statique : l'électrostatique et la magnétostatique, abordées en première année et complétées par une approche locale en deuxième année.
2. le régime lentement variable : l'induction électromagnétique dans le cadre de l'ARQP.
3. le régime variable quelconque : propagation des ondes électromagnétiques intégrée dans la partie physique des ondes.

L'étude de l'électrostatique et de la magnétostatique n'est pas centrée sur les calculs mais sur les propriétés des champs. Aucune technicité mathématique n'est recherchée dans les calculs ; ces derniers ne concernent que des situations proches du cours et d'intérêt pratique évident ; en revanche, on insiste sur la comparaison des propriétés respectives de  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{B}$ .

Le formalisme quadridimensionnel, la transformation relativiste des champs, le vecteur excitation électrique  $\mathbf{D}$  et le vecteur excitation magnétique  $\mathbf{H}$  sont exclus.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- maîtriser le concept de champ scalaire et de champ de vecteurs et manipuler les opérateurs vectoriels relatifs aux champs scalaires et vectoriels ;
- établir le lien entre des lois locales et des propriétés intégrales ;
- évaluer les actions d'un champ magnétique extérieur sur un circuit parcouru par un courant ou par analogie sur un aimant ;
- analyser qualitativement les systèmes où les phénomènes d'induction sont à prendre en compte
- effectuer des bilans énergétiques ;
- connaître des applications relevant du domaine de l'industrie ou de la vie courante où les phénomènes d'induction sont présents et déterminants dans le fonctionnement des dispositifs.

#### 3.1 Formulation locale des lois de l'électromagnétisme en régime statique

Les lois locales de l'électrostatique relatives au potentiel constituent un support pertinent pour procéder à une

approche numérique de la résolution d'une équation aux dérivées partielles.

| Programme   | Commentaires   |
|---|--|
| Densité de charge et vecteur densité volumique de courant électrique.<br>Formulations, intégrale et locale, du principe de la conservation de la charge électrique. | On établit l'équation locale de la conservation de la charge en coordonnées cartésiennes dans le cas à une dimension et on la généralise à trois dimensions.   |
| Forme locale de la conservation de la circulation du champ électrostatique.<br>Forme locale du théorème de GAUSS.<br>Équation de POISSON, équation de LAPLACE.      | On traite des exemples simples de calcul du champ et du potentiel par les équations locales.<br>On admet la forme de la solution de l'équation de POISSON en précisant les conditions de validité.<br>On fait remarquer la non-unicité du potentiel électrostatique.<br>On met en œuvre une méthode de résolution numérique fournie pour déterminer une solution à l'équation de LAPLACE, les conditions aux limites étant fixées.<br>On exprime par analogie l'équation de POISSON dans le cas de la gravitation. |
| Forme locale de la conservation du flux du champ magnétostatique.<br>Forme locale du théorème d'AMPERE.   |  |

### 3.2 Forces de LAPLACE

Les forces de LAPLACE dans un circuit mobile sont introduites dans le cas d'un champ uniforme et stationnaire, soit dans le modèle des rails de LAPLACE, soit dans celui d'un cadre rectangulaire en rotation. L'objectif de cette partie est d'évaluer les actions d'un champ magnétique extérieur sur un circuit parcouru par un courant ou par analogie sur un aimant représenté par un moment magnétique.

| Programme   | Commentaires   |
|---|--|
| Force de LORENTZ.   |  |
| Action d'un champ magnétique extérieur sur un circuit filiforme fermé : densité linéique de la force de LAPLACE, résultante et moment résultant des forces de LAPLACE.<br>Puissance des forces de LAPLACE.  | On différencie le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.<br>La densité volumique de la force de LAPLACE $\vec{j} \wedge \vec{B}$ est simplement affirmée. |
| Rails de LAPLACE dans un champ magnétique extérieur uniforme, stationnaire et orthogonal aux rails.   | On établit l'expression de la résultante et on évalue la puissance des forces de LAPLACE s'exerçant sur la barre conductrice en translation rectiligne sur les deux rails parallèles.                        |
| Couple et puissance des actions mécaniques de LAPLACE dans le cas d'une spire rectangulaire en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe. |  |
| Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.  | On associe à un aimant un moment magnétique.   |
| Effet moteur d'un champ magnétique tournant.  | On étudie l'effet d'un champ magnétique tournant sur un dipôle magnétique permanent.   |

### 3.3 Induction électromagnétique

Dans cette partie, on cherche à mettre l'accent sur les applications relevant du domaine de l'industrie ou de la vie courante où les phénomènes d'induction, reposant sur la loi de FARADAY, sont présents et déterminants dans le fonctionnement des dispositifs. Elle s'appuie sur les nombreuses applications présentes dans notre environnement immédiat : boussole, moteur électrique, alternateur, transformateur, haut-parleur, plaques à induction, frein électromagnétique, carte RFID (Radio Frequency Identification) ...

Cette partie se prête parfaitement à une introduction expérimentale et constitue un bel exemple d'illustration de l'histoire des sciences. On évoque, à ce sujet, les différents points de vue possibles sur le même phénomène selon le référentiel dans lequel on se place. L'étude d'un circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps aborde le

phénomène d'auto-induction puis le couplage par mutuelle inductance entre deux circuits fixes. Elle traite du modèle du transformateur de tensions. L'étude d'un circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire est centrée sur la conversion de puissance. Des situations géométriques simples permettent de dégager les paramètres physiques pertinents afin de modéliser, par exemple, un dispositif de freinage.

| Programme  | Commentaires  |
|--|---|
| <b>Flux d'un champ magnétique :</b> Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour orienté.  |   |
| <b>Lois d'induction électromagnétique :</b><br><b>Conservation du flux magnétique</b><br><b>Loi de Faraday</b><br>Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.<br>Force électromotrice induite, loi de Faraday : $e = - \frac{d\Phi}{dt}$ . | On réalise des expériences de cours pour illustrer les lois de l'induction.<br>On présente les causes de la variation de flux magnétique.<br>On précise les conventions d'algébrisation du flux magnétique, de la f.é.m. induite et du courant induit.<br>On évite les situations où la loi de FARADAY n'est pas applicable.  |
| <b>Loi de modération de LENZ.</b>  | On réalise des expériences de cours pour illustrer la loi de LENZ.<br>On utilise la loi de LENZ pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.<br>On précise la signification physique du signe (-) dans la loi de FARADAY.   |
| Auto-induction : flux propre et inductance propre.<br>Inductance mutuelle entre deux bobines.<br>Circuits électriques à une maille, couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.   | On donne l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.<br>Le théorème de NEWMANN ( $M_{12} = M_{21}$ ) est simplement affirmé.<br>On détermine l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en "influence totale".   |
| <b>Étude énergétique.</b><br>Cas d'un circuit siège d'un phénomène d'auto-induction.<br><br>Cas de deux circuits électriques couplés par le phénomène de mutuelle induction.   | On réalise un bilan de puissance et d'énergie dans chaque cas en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.  |
| <b>Conversion de puissance mécanique en puissance électrique :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rails de LAPLACE.</li> <li>- Spire rectangulaire en rotation autour d'un axe fixe, et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.</li> <li>- Freinage par induction.</li> </ul>     | On interprète qualitativement les phénomènes observés.<br>On établit les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe.<br>On effectue un bilan énergétique.<br>On cite des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.<br><br>On explique l'origine des courants de FOUCAULT et on en donne des exemples d'utilisation. |
| <b>Conversion de puissance électrique en puissance mécanique :</b> haut-parleur électrodynamique.  | On explique le principe de fonctionnement d'un haut-parleur électrodynamique dans la configuration simplifiée des rails de LAPLACE.   |

### 3.4 Équations de MAXWELL

On présente dans cette la partie une vision unifiée des lois de l'électromagnétisme. Les équations de MAXWELL sont introduites comme des postulats de l'électromagnétisme. Elles permettent une première approche quantitative du phénomène de propagation et, également, d'établir le lien avec le cours sur l'induction étudiée précédemment. Les relations de passage relatives au champ électromagnétique peuvent être exploitées mais doivent être systématiquement rappelées.

| Programme  | Commentaires   |
|--|--|
| Équations de MAXWELL dans le vide : formulations, intégrale et locale. | On évoque le problème de la nature du référentiel par rapport auquel les équations de MAXWELL sont postulées et on insiste sur le contenu physique de ces équations. |
| Cas de l'approximation des régimes quasi-permanents                    | On exploite le caractère conservatif du flux du vecteur  |

|   |  |
|---|--|
| (ARQP) ou quasi-stationnaires (ARQS).<br>Limite de validité.<br>Équations de MAXWELL dans le cadre de l'ARQP. | densité volumique de courant électrique dans l'ARQS, pour interpréter la loi des nœuds et l'uniformité de l'intensité du courant électrique dans une branche d'un circuit. |
| Équations locales des champs statiques.   | On vérifie que l'on retrouve les lois locales des champs statiques à partir des équations de MAXWELL.  |
| Relations entre les composantes du champ électromagnétique de part et d'autre d'une interface.                | On indique que les relations de passage (admisses) relatives au champ électromagnétique se substituent aux équations de MAXWELL dans le cas d'une modélisation surfacique. |

### 3.5 Énergie du champ électromagnétique

Cette partie s'intéresse à l'aspect énergétique de l'électromagnétisme. Aucun modèle relatif à la loi d'OHM locale n'est exigible. On met l'accent sur les échanges d'énergie entre la matière et le champ électromagnétique, sur la signification physique du vecteur de POYNTING, sur l'utilisation du flux du vecteur de POYNTING pour évaluer une puissance rayonnée à travers une surface et sur les bilans d'énergie et de puissance.

| Programme   | Commentaires   |
|---|--|
| Force électromagnétique volumique.<br>Puissance volumique cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge.<br>Cas particulier d'un conducteur ohmique. Loi d'OHM locale, densité volumique de puissance dissipée par effet JOULE. | On présente la forme locale de la loi d'OHM comme une loi phénoménologique. La justification microscopique n'est pas exigible.   |
| Expression de la densité volumique d'énergie électromagnétique.<br>Vecteur de POYNTING.   | On peut affirmer l'expression de la densité d'énergie électromagnétique sur les exemples du condensateur plan et du solénoïde infini.<br>On affirme la signification physique du vecteur de POYNTING.<br>On donne des ordres de grandeur de flux énergétiques moyens (flux solaire, laser...). |
| Bilan d'énergie électromagnétique : équations intégrale et locale de conservation de l'énergie électromagnétique (identité de POYNTING)   | On interprète chaque terme de l'équation locale de POYNTING.   |

## 4. Physique des ondes

Cette partie est l'occasion d'illustrer l'efficacité du formalisme local des équations de MAXWELL en insistant sur les aspects qualitatifs et sur la variété des applications qui en découlent. Si le modèle de l'onde plane est présenté dans le cadre de l'espace vide, les études des ondes électromagnétiques dans un plasma ainsi que dans un milieu ohmique permettent d'illustrer l'importance des couplages entre les champs, les charges et les courants. Elles sont également l'occasion d'enrichir les compétences des étudiants sur les phénomènes de propagation en abordant, par exemple, l'effet de peau, le phénomène de dispersion, les notions de vitesse de groupe et de phase, de fréquence de coupure ou encore d'onde évanescence. La réflexion d'une onde électromagnétique sur un métal parfait permet d'aborder la notion d'onde stationnaire. L'importance des conditions aux limites imposées sur la quantification des solutions est soulignée. L'étude du rayonnement dipolaire repose sur l'analyse et l'exploitation des expressions des champs, qui sont admises. Elle est l'occasion d'étudier une modélisation du phénomène de diffusion d'une onde électromagnétique par un atome et d'en analyser les conséquences.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- comprendre le rôle joué par une équation différentielle dans l'étude de l'évolution temporelle d'un système physique ;
- relier linéarité et superposition ;
- interpréter physiquement et savoir reconnaître la forme analytique d'un signal qui se propage ;
- relier conditions aux limites et quantification, conditions aux limites et décomposition en ondes stationnaires ;
- interpréter l'expression à grande distance du champ électromagnétique d'un dipôle électrique oscillant.

### 4.1 Propagation du champ électromagnétique

Dans cette partie, on s'appuie sur une approche expérimentale ou sur des logiciels de simulation pour permettre aux élèves de faire le lien entre l'observation de signaux (acoustiques, électriques, électromagnétiques) qui se propagent et la traduction mathématique de cette propagation.

L'étude de la propagation des ondes électromagnétiques est limitée au vide, au plasma et à un conducteur métallique (effet de peau, absorption).

| Programme  | Commentaires   |
|--|--|
| <p>Équations de propagation des champs dans une région sans charges ni courants.</p> <p>Onde plane dans l'espace vide de charge et de courant. Solutions de l'équation de d'ALEMBERT à une dimension cartésienne. Structure de l'onde plane progressive. Aspects énergétiques.</p> <p>Cas particulier de l'onde plane monochromatique (harmonique ou sinusoïdale). Déphasage, double périodicité spatiale et temporelle. Vecteur d'onde. Relation de dispersion.</p> <p>Domaines spectraux et applications des ondes électromagnétiques.</p> | <p>On explique le caractère idéal du modèle de l'onde plane.</p> <p>On souligne le caractère idéal du modèle de l'onde plane harmonique et on montre simplement (grâce à l'analyse de FOURIER) qu'une telle onde constitue une composante élémentaire d'un paquet d'ondes.</p> <p>On fait apparaître le rôle simplificateur de la notation complexe pour les ondes progressives harmoniques.</p> <p>On associe à chaque domaine du spectre des ondes électromagnétiques des applications.</p>                |
| <p>États de polarisation d'une onde plane progressive monochromatique. Onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement ou circulairement.</p>  | <p>Les polariseurs et les lames à retard sont introduits de façon simple en TP.</p>  |
| <p>Propagation d'une onde plane transverse progressive monochromatique dans un plasma dilué.</p> <p>Conductivité complexe du milieu. Fréquence de coupure. Dispersion, relation de dispersion. Ondes évanescentes</p> <p>Cas de l'ionosphère.</p> <p>Vitesse de phase et vitesse de groupe. Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu linéaire faiblement dispersif.</p>  | <p>Le plasma est considéré comme un milieu dilué localement neutre et dont les charges sont sans interaction entre elles et où les ions sont immobiles.</p> <p>On donne l'ordre de grandeur de la fréquence de coupure dans le cas de l'ionosphère.</p> <p>L'objectif de cette étude est d'introduire la notion de dispersion.</p> <p>On associe la vitesse de groupe à la propagation de l'enveloppe du paquet d'ondes.</p> <p>L'étude de la propagation dans les milieux matériels est hors programme.</p> |
| <p>Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu ohmique en régime lentement variable.</p> <p>Effet de peau.</p>   | <p>On établit et on interprète l'expression de la longueur caractéristique d'atténuation de l'onde électromagnétique dans un milieu ohmique.</p>   |

#### 4.2 Réflexion sous incidence normale d'une onde électromagnétique sur un conducteur parfait

| Programme  | Commentaires   |
|--|--|
| <p>Conducteur parfait. Relation de passage du champ électromagnétique à l'interface vide-conducteur parfait.</p>   | <p>Les relations de passage relatives au champ électromagnétique peuvent être exploitées mais doivent être systématiquement rappelées.</p> |
| <p>Réflexion sous incidence normale d'une onde électromagnétique plane, progressive et monochromatique polarisée rectilignement sur un plan conducteur parfait. Onde stationnaire.</p> | <p>On limite l'étude à celle des champs de l'onde réfléchie et de l'onde stationnaire.</p>   |
| <p>Applications aux cavités à une dimension. Mode d'onde stationnaire.</p>   | <p>On utilise la méthode de séparation des variables.</p>  |

#### 4.3 Rayonnement dipolaire

| Programme  | Commentaires   |
|--|--|
| <p>Modèle du dipôle oscillant.</p> <p>Champ électromagnétique rayonné par un dipôle oscillant dans la zone de rayonnement.</p> <p>Structure du champ électromagnétique rayonné.</p> <p>Puissance rayonnée. Indicatrice de rayonnement.</p> | <p>On se limite à présenter les expressions de <math>\vec{E}</math> et <math>\vec{B}</math> uniquement dans la zone de rayonnement définie par <math>r \gg \lambda</math>.</p> <p>La mémorisation des résultats n'est pas exigible. Cependant, l'élève doit connaître les étapes qui conduisent à ces résultats, justifier le choix du modèle du dipôle oscillant, formuler et commenter les approximations reliant les trois échelles de longueur</p> |

|  |  |
|--|--|
|  | pertinentes et citer des exemples dans différents domaines.  |
| Diffusion d'une onde électromagnétique polarisée rectilignement par une molécule dans le cadre du modèle de la charge élastiquement liée.<br>Structure de l'onde diffusée. Puissance diffusée en fonction de la fréquence. Résonance. Domaine de RAYLEIGH. | On détermine les caractéristiques du dipôle induit en régime établi, par l'action de l'onde incidente sur la molécule.<br>On explique certaines propriétés optiques de l'atmosphère (couleur du ciel, du Soleil couchant, polarisation, ...) en lien avec le thème du rayonnement dipolaire. |

## 5. Optique

On se restreint au domaine d'approximation où une description de la lumière par des ondes scalaires est suffisante.

Le formalisme utilisé en optique a son importance dans la modélisation des phénomènes décrits. On veillera donc à privilégier les aspects expérimentaux et à utiliser tous les supports de visualisation (expériences de cours, simulations, animations, ...) pour aider les élèves dans la construction de leurs représentations.

On signale le caractère très général des phénomènes d'interférences et de diffraction étudiés en optique en insistant notamment sur le rôle des ordres de grandeur des longueurs d'onde rencontrées dans les différents domaines de la physique ondulatoire.

Le théorème de MALUS-DUPIN (orthogonalité des rayons de lumière et des surfaces d'ondes), outil nécessaire à l'étude de l'optique ondulatoire, est admis.

Toute étude générale de la cohérence est exclue.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- maîtriser la notion de phase d'une vibration harmonique et de sa variation au cours d'une propagation ;
- associer les caractéristiques géométriques d'un phénomène d'interférences (position et forme des franges, interfrange) à celles du dispositif interférentiel et du milieu de propagation ;
- connaître certains ordres de grandeur propres aux phénomènes lumineux dans le domaine du visible (longueur d'onde, temps de cohérence, temps de réponse d'un récepteur) ; faire le lien avec les problèmes de cohérence ;
- maîtriser les outils de l'optique géométrique (rayon lumineux, loi du retour inverse, relations de conjugaison) et de l'optique ondulatoire (chemin optique, surface d'onde, théorème de Malus-Dupin) afin de conduire un calcul de différence de marche entre deux rayons lumineux dans des situations simples.

### 5.1 Modèle scalaire des ondes lumineuses

Cette partie introduit les outils nécessaires pour décrire les phénomènes d'interférences et de diffraction. Le programme utilise le mot « intensité » pour décrire la grandeur détectée mais on peut utiliser indifféremment les mots « intensité » ou « éclaircissement » sans chercher à les distinguer à ce niveau.

| Programme  | Commentaires  |
|--|---|
| Modèle scalaire des ondes lumineuses.<br>Chemin optique le long d'un rayon lumineux. Déphasage dû à la propagation.  | On admet qu'une onde lumineuse monochromatique peut être décrite par une onde scalaire progressive, composante du champ électrique, qui se propage le long du rayon lumineux.<br>On exprime le retard de phase en un point (par rapport à un autre) en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique.  |
| Théorème de MALUS-DUPIN.<br>Surfaces d'onde (ou équiphases). Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince sur une onde dans l'approximation de GAUSS. | On définit les surfaces d'ondes relatives à une source ponctuelle S par l'ensemble des points M tels que $(SM) = \text{constante}$ .<br>On associe une description de la formation des images en termes de rayon lumineux et en termes de surfaces d'onde.<br>On précise la propriété énonçant que le chemin optique séparant deux points conjugués est indépendant du rayon lumineux choisi. |

|   |   |
|---|---|
|   | Le théorème de MALUS-DUPIN est admis.   |
| Modèle d'émission. Relation (admise) entre le temps de cohérence et la largeur spectrale. | On donne l'ordre de grandeur du temps de cohérence $\Delta t$ de quelques radiations visibles.<br>On utilise la relation $\Delta f \cdot \Delta t \approx 1$ pour relier le temps de cohérence à la largeur spectrale $\Delta \lambda$ de la radiation. |
| Récepteurs. Éclairement ou intensité lumineuse. Densité spectrale.                        | On donne l'ordre de grandeur du temps de réponse de quelques récepteurs de lumière et on évoque leurs conséquences sur la détection des signaux lumineux.   |

## 5.2 Interférences des ondes lumineuses

### 5.2.1 Superposition d'ondes lumineuses

Dans cette partie, on s'appuie sur des situations concrètes, des illustrations expérimentales et des simulations afin de donner du sens aux différentes notions présentées.

| Programme   | Commentaires   |
|---|--|
| Superposition de deux ondes lumineuses.<br><br>Cohérence mutuelle. Notions de trains d'ondes.<br>Conditions d'interférences.<br><br>Formule de FRESNEL : $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi)$ .  | On justifie l'additivité des intensités lors de la superposition de deux ondes incohérentes entre elles.<br>On compare les prévisions théoriques et les réalités expérimentales et on affirme une méthode opérationnelle de cohérence mutuelle mettant en œuvre les notions de trains d'ondes, de sources synchrones, de diviseur d'ondes et de longueur de cohérence. Cependant, l'étude générale de la cohérence (cohérence partielle, cohérence spatiale ...) est hors programme. |
| Diviseurs d'ondes. Champ d'interférence, surfaces d'égale intensité, frange d'interférence, différence de marche, ordre d'interférence, facteur de contraste (ou visibilité) de la figure d'interférences.<br>Systèmes interférentiels : dispositif interférentiel par division du front d'onde de front d'ondes et dispositif interférentiel par division du front d'onde d'amplitude. |  |

### 5.2.2 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'YOUNG

Le dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'YOUNG, permet de confronter théorie et expérience.

| Programme   | Commentaires  |
|---|---|
| Trous d'YOUNG ponctuels dans un milieu non dispersif : source ponctuelle à distance finie et observation à grande distance. Champ d'interférences. Ordre d'interférences. Interfrange.<br><br>Variations de l'ordre d'interférences avec la position du point d'observation ; franges d'interférences.  | On justifie que les franges ne sont pas localisées.<br>On compare expérimentalement les deux dispositifs, trous d'YOUNG et fentes d'YOUNG, en mettant en évidence les analogies et les différences.<br>L'étude de tout dispositif utilisant des lentilles et/ou des prismes (miroirs de FRESNEL, bilentilles de BILLET, de MESLIN, biprisme de FRESNEL ...) peut être faite en travaux dirigés. On montre alors l'équivalence, du point de vue chemin optique, de ces dispositifs avec celui des trous d'YOUNG. Cependant, aucune connaissance sur un autre diviseur du front d'onde, autre que les trous d'YOUNG n'est exigible. |
| Variations de l'ordre d'interférences avec la position d'un point source. Perte de contraste par élargissement angulaire de la source.<br>Variations de l'ordre d'interférences avec la longueur d'onde.<br>Interférences en lumière polychromatique : cas d'un doublet, cas d'une source à profil rectangulaire. Notion élémentaire de cohérence temporelle. Perte de contraste. | On utilise le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $\Delta p \geq \frac{1}{2}$ (où $ \Delta p $ est évalué sur la moitié de l'étendue de la source) pour interpréter des observations expérimentales.<br>Le calcul de l'intensité lumineuse n'est pas exigible.<br>On relie la largeur spectrale de la source à la longueur de cohérence temporelle.<br>La théorie générale de la cohérence temporelle est hors programme.  |
| Interférence en lumière blanche.  |   |



|  |  |
|--|--|
|  | On interprète qualitativement la figure d'interférence en lumière blanche. |
|--|--|

### 5.2.3 Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : Interféromètre de MICHELSON éclairé par une source spatialement étendue

Dans cette partie, l'interféromètre de MICHELSON est supposé être éclairé par une source spatialement étendue. On explique les trois configurations possibles, lame d'air à faces parallèles, lame coin d'air et contact optique. L'étude de l'interféromètre de MICHELSON dans une configuration donnée permet de confronter théorie et expérience. Pour la modélisation d'un interféromètre de MICHELSON, on suppose la séparatrice infiniment mince.

| Programme   | Commentaires   |
|---|--|
| Interféromètre de MICHELSON éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (admise et constatée expérimentalement) des franges.<br><br>Lame d'air à faces parallèles : franges d'égale inclinaison.<br>Lame coin d'air : franges d'égale épaisseur.<br>Défilement des franges d'interférences.<br>Contact optique. | On se limite au seul cas où le dispositif interférentiel est l'interféromètre de MICHELSON.<br>On fait remarquer expérimentalement que la localisation des franges est liée à l'étendue spatiale de la source. Toute étude générale de la localisation est exclue.<br>On montre l'équivalence de l'interféromètre de MICHELSON à une lame d'air à faces parallèles ou à un coin d'air. |

### 5.3 Étude du réseau plan

L'étude de la superposition de N ondes cohérentes ne doit pas donner lieu à des développements calculatoires. On présente expérimentalement le phénomène de diffraction et on montre son influence sur le pouvoir de résolution.

| Programme  | Commentaires   |
|--|--|
| Superposition de N ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique.<br>Relation fondamentale des réseaux. | On établit l'expression de la différence de marche entre deux motifs consécutifs.<br><br>On établit la relation fondamentale des réseaux liant la condition d'interférences constructives à la valeur de la différence de marche entre deux motifs consécutifs.<br>On établit, à l'aide du diagramme de FRESNEL, la demi-largeur $2\pi/N$ des pics principaux de la courbe d'intensité en fonction du déphasage.<br>Le calcul de l'intensité lumineuse est hors programme. |
| Diffraction à l'infini   | On décrit qualitativement l'influence de la diffraction (On utilise la relation $\theta \approx \lambda/d$ entre l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture).   |
| Minimum de déviation dans un ordre donné.  | On souligne qualitativement l'intérêt expérimental du minimum de déviation.  |
| Dispersion par le réseau dans un ordre donné : spectre d'ordre p.<br><br>Pouvoir dispersif d'un réseau.  | On interprète les positions des raies observées comme résultant d'une condition d'interférences constructives.<br>On définit le pouvoir dispersif d'un réseau en comparant différents réseaux.   |
| Pouvoir de résolution. Critère de Rayleigh.  | On définit le pouvoir de résolution et on indique les facteurs qui le limitent :<br>- pouvoir séparateur du détecteur ;<br>- influence de la diffraction.  |

## 6. Thermodynamique

Le cours de thermodynamique en deuxième année MP est consacré à la conduction (ou diffusion) thermique et à des éléments de thermodynamique statistique en relation avec le cours de thermodynamique de première année. Il est souhaitable, à l'occasion d'exercices ou de problèmes, de reprendre certains acquis de thermodynamique (en particulier les premier et second principes) enseignés en première année.

### 6.1 Conduction thermique

Le cours de conduction thermique permet un réinvestissement du cours de thermodynamique de MPSI et contribue à asseoir les compétences correspondantes. L'étude de la conduction thermique contribue aussi à consolider la maîtrise d'outils mathématiques puissants (divergence, laplacien) dans un contexte concret.

L'étude du rayonnement thermique se limite à l'introduction du vocabulaire relatif à ce mode de transfert et à l'affirmation de la loi de WIEN et celle de STEFAN. Toute étude théorique du rayonnement thermique est hors programme.

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

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

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- identifier la nature des transferts thermiques sous forme globale et locale ;
- effectuer un bilan local et global d'énergie interne pour un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique ;
- analyser et résoudre des équations aux dérivées partielles (analyse en ordre de grandeur, conditions initiales, conditions aux limites).

| Programme   | Commentaires  |
|---|---|
| Les modes de transfert thermique d'énergie : conduction, convection et rayonnement.   | On présente les modes de transfert thermique d'énergie et on donne des exemples.  |
| Flux thermique.<br>Vecteur densité de flux thermique $\vec{j}_Q$ .<br>Conductivité thermique.<br>Premier principe de la thermodynamique. Bilan d'énergie thermique.           | On effectue un bilan local d'énergie interne pour un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace.  |
| Loi phénoménologique de FOURIER relative à la conduction thermique.   | On souligne l'analogie entre les lois phénoménologiques d'OHM et de FOURIER.<br>Toute modélisation microscopique de la loi de FOURIER est hors programme.<br>On donne des ordres de grandeur de la conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, verre, acier...  |
| Équation de la diffusion thermique sans terme de source.<br><br>Analyse dimensionnelle.<br><br>Généralisation de l'équation de la diffusion en présence d'un terme de source. | On établit, à l'aide du premier principe de la thermodynamique appliqué à un volume élémentaire, l'équation de la diffusion thermique sans terme de source.<br>On se limite à des problèmes unidimensionnels en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique.<br>On signale la relation de l'équation de diffusion avec l'irréversibilité temporelle du phénomène.<br>On analyse l'équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.<br>On admet une généralisation en géométrie quelconque en utilisant les opérateurs divergence et laplacien et leurs expressions fournies.<br>On donne le terme source local et intégral correspondant à l'effet JOULE.<br><i>Activité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion thermique à une dimension par une méthode des différences finies dérivée de la méthode d'EULER explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.</i> |
| Conduction thermique en régime stationnaire, conductance et résistance thermiques. Associations de résistances thermiques en série ou en parallèle.                           | On signale les analogies avec le calcul des conductances électriques.<br>Seule la mémorisation de l'expression de la résistance   |

|   |   |
|---|---|
|   | thermique d'un barreau cylindrique calorifugé latéralement est exigible.  |
| Conditions aux limites : continuité du flux thermique, continuité de la température pour un contact thermique parfait, loi de NEWTON. Coefficient de transfert thermique de surface h.  | Les transferts thermiques à l'interface entre un fluide et une paroi solide sont décrits par l'expression phénoménologique $\varphi = h(T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}})$ , appelée loi de NEWTON.   |
| Rayonnement thermique.<br>Flux surfacique émis par un matériau absorbeur intégral (dit "corps noir") isotherme.<br>Spectre du rayonnement du corps noir.<br>Bilan radiatif à la paroi d'un corps noir isotherme convexe recevant un flux connu ou un rayonnement d'équilibre.<br>Loi de STEFAN-BOLTZMANN.<br>Loi de WIEN. | On familiarise les élèves avec le vocabulaire relatif au rayonnement thermique : milieux transparents et milieux opaques, notions qualitatives d'absorption, de réflexion, de transmission et d'émission de rayonnement. Flux hémisphérique. Flux partant et flux radiatif. Équilibre radiatif.<br>On ne considère la propagation de rayonnement que dans un milieu non absorbant.<br>On se limite à des corps totalement transparents ou totalement absorbants quelles que soient la longueur d'onde et la direction.<br>On admet les lois de WIEN et STEFAN.<br>La linéarisation du flux radiatif à la paroi d'un corps noir en fonction de la différence des températures permet de revenir sur le coefficient de transfert de surface h et d'évaluer un ordre de grandeur de la contribution radiative.<br>La loi de PLANCK est hors programme. |

## 6.2 Éléments de thermodynamique statistique

Il s'agit dans cette partie de relier certaines propriétés macroscopiques d'un système constitué d'un grand nombre de particules avec celles des constituants microscopiques.

Le facteur de BOLTZMANN est introduit de manière inductive à partir du modèle d'atmosphère isotherme. L'étude des systèmes à spectre discret d'énergies est l'occasion de montrer, qu'à température donnée, l'énergie fluctue et que les fluctuations relatives diminuent avec la taille du système. L'étude des systèmes à deux niveaux, conduite de manière plus exhaustive, permet une analyse plus fine des phénomènes. Le théorème d'équipartition de l'énergie est l'occasion de procéder à une évaluation des capacités thermiques des gaz et des solides. Soulignons que le calcul de la pression cinétique et la théorie cinétique des gaz ne relèvent pas du programme.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- évaluer certaines grandeurs macroscopiques en fonction de paramètres microscopiques ;
- mettre en œuvre des modes de raisonnement relevant du domaine de l'analyse statistique et probabiliste ;
- relier l'étude des systèmes à spectre discret d'énergies avec le phénomène de quantification de l'énergie vu dans le cours d'introduction à la physique quantique (MPSI) ;
- affiner la compréhension de certaines grandeurs de la thermodynamique classique comme l'énergie, la température, la capacité thermique.

### 6.2.1 Facteur de BOLTZMANN

| Programme   | Commentaires   |
|---|--|
| Modèle de l'atmosphère isotherme.   | On rappelle la variation de la pression avec l'altitude dans l'hypothèse d'une atmosphère isotherme déjà vue en première année.  |
| Poids de BOLTZMANN d'une particule indépendante à l'équilibre avec un thermostat. | On interprète la loi du nivellement barométrique avec le poids de BOLTZMANN.<br>On compare le terme $k_B T$ à des écarts d'énergie et on estime les conséquences d'une variation de température. |

### 6.2.2 Systèmes à spectre discret d'énergies

| Programme   | Commentaires   |
|---|--|
| Probabilité d'occupation d'un état d'énergie non dégénéré par une particule indépendante. | On exprime la probabilité d'occupation d'un état d'énergie en utilisant la condition de normalisation. |

|   |   |
|---|---|
| Énergie moyenne et écart quadratique moyen.   | On exploite un rapport de probabilités entre deux états. On exprime sous forme d'une somme sur ses états l'énergie moyenne et l'écart-quadratique énergétique d'un système.   |
| Cas d'un système à N particules indépendantes.  | On explique pourquoi les fluctuations relatives d'énergie régressent quand la taille du système augmente et on associe cette régression au caractère quasi-certain des grandeurs thermodynamiques.  |
| Système à deux niveaux non dégénérés d'énergies $\pm \varepsilon$ .   | On donne des exemples de systèmes modélisables par un système à deux niveaux et on détermine l'énergie moyenne et la capacité thermique de ce système. On interprète l'évolution de l'énergie moyenne avec la température, notamment les limites, basse et haute température. On relie les fluctuations d'énergies à la capacité thermique. |
| Énergie moyenne d'équilibre à la température T d'un ensemble de N particules dans un puits de potentiel infini. | On détermine l'énergie moyenne d'un ensemble de particules à une température donnée, dans la limite où l'énergie de confinement est faible devant l'énergie d'agitation thermique. On relie l'expression de l'énergie moyenne en fonction de la température au théorème de l'équipartition de l'énergie.                                    |

### 6.2.3 Capacités thermiques classiques des gaz et des solides

| Programme  | Commentaires  |
|--|---|
| Théorème d'équipartition pour un degré de liberté énergétique indépendant quadratique.   | On exploite la contribution $kT/2$ par degré quadratique à l'énergie moyenne.   |
| Capacité thermique molaire des gaz classiques dilués monoatomiques et diatomiques.<br>Capacité thermique molaire des solides dans le modèle d'EINSTEIN classique : loi de DULONG et PETIT. | On dénombre les degrés de libertés énergétiques quadratiques indépendants et en on déduit la capacité thermique molaire d'un système. |

## 7. Physique quantique

Cette partie est une introduction au monde quantique. Elle s'inscrit dans la continuité du programme de la classe de terminale scientifique et de la classe de MPSI.

Dans une approche descriptive et qualitative, on aborde les concepts de la dualité onde-corpuscule, de la fonction d'onde et de son interprétation probabiliste. Les ondes stationnaires étudiées dans la partie (**Physique des ondes**) permettent d'illustrer le rôle des conditions aux limites dans l'apparition de modes propres et de préparer à la quantification de l'énergie en mécanique quantique.

Dans un deuxième temps, on donne aux étudiants leurs premiers outils quantitatifs d'analyse. Le cœur de cet enseignement est construit sur la mécanique ondulatoire de SCHRÖDINGER et propose des résolutions complètes d'exemples simples mais fondamentaux pour la bonne compréhension de problèmes plus complexes : particule dans une marche de potentiel et effet tunnel, particule dans un puits de potentiel infini et quantification de l'énergie d'une particule confinée.

On se limitera à l'introduction heuristique de la dualité onde/particule et de la densité de courant de probabilité pour une particule libre sans développer la notion de paquet d'ondes. L'accent doit être mis sur l'interprétation et l'exploitation des résultats et non pas sur les calculs, non exigibles pour l'exemple plus délicat de la barrière de potentiel. Le professeur pourra au contraire, s'il le souhaite, proposer des analyses de graphes, des exploitations de formules analytiques fournies, des estimations numériques, des simulations... afin d'aborder des modélisations plus réalistes.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- mettre en relation les effets quantiques avec les prédictions classiques ;
- mobiliser les savoir-faire sur les ondes pour interpréter les phénomènes quantiques ;
- être en mesure de prévoir des effets quantiques grâce à des estimations numériques ;
- passer de la description corpusculaire à une description ondulatoire d'une particule ;

- utiliser le principe de superposition.

### 7.1 Équation de SCHRÖDINGER

| Programme   | Commentaire  |
|---|--|
| Fonction d'onde $\Psi$ d'une particule sans spin et densité de probabilité de présence. | On interprète en termes de probabilité l'amplitude d'une onde associée à une particule.  |
| Équation de SCHRÖDINGER à une dimension dans un potentiel $V(x)$ .                      | On utilise le caractère linéaire de l'équation (principe de superposition).  |
| États stationnaires de l'équation de SCHRÖDINGER.                                       | On procède à la séparation des variables temps et espace.<br>On distingue l'onde associée à un état stationnaire en mécanique quantique d'une onde stationnaire au sens usuel de la physique des ondes.<br>On relie l'énergie de la particule à l'évolution temporelle de sa fonction d'onde et on fait le lien avec la relation de PLANCK-EINSTEIN.<br>On identifie le terme associé à l'énergie cinétique. |

### 7.2 Particule libre

| Programme   | Commentaire  |
|---|--|
| Fonction d'onde d'une particule libre non localisée.  | On interprète la difficulté de normalisation de cette fonction d'onde.   |
| Relation de DE BROGLIE.   | On relie l'énergie de la particule et le vecteur d'onde de l'onde plane associée.  |
| Inégalité d'HEISENBERG spatiale et paquet d'ondes.  | On explique, en s'appuyant sur l'inégalité d'HEISENBERG spatiale, que la localisation de la particule peut s'obtenir par superposition d'ondes planes. |
| Densité de courant de probabilité associée à une particule libre $\vec{J} =  \Psi ^2 \frac{\hbar}{m} \vec{k}$ . | On interprète et on exploite l'expression fournie de la densité de courant de probabilité par analogie avec la densité de courant électrique.          |

### 7.3 États stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux

| Programme  | Commentaire  |
|--|--|
| États stationnaires d'une particule dans le cas d'une marche de potentiel.               | On cite des exemples physiques illustrant cette problématique.<br>On exploite les conditions de continuité (admisses) relatives à la fonction d'onde.<br>On établit la solution dans le cas d'une particule incidente sur une marche de potentiel.<br>On explique les différences de comportement par rapport à une particule classique. |
| Cas $E > V$ : probabilité de transmission et de réflexion.<br>Cas $E < V$ : évanescence. | On détermine les coefficients de transmission et de réflexion en utilisant les courants de probabilités.<br>On reconnaît l'existence d'une onde évanescence et on la caractérise.  |
| Barrière de potentiel et effet tunnel.   | On décrit qualitativement l'influence de la hauteur ou de la largeur de la barrière de potentiel sur le coefficient de transmission.<br>On explique le rôle de l'effet tunnel dans la radioactivité $\alpha$ ou la microscopie à effet tunnel en utilisant le coefficient de transmission fourni.  |
| États stationnaires d'une particule dans un puits de potentiel infini.                   | On établit les solutions et les niveaux d'énergie de la particule confinée.<br>On identifie les analogies avec la corde vibrante.  |
| Énergie de confinement.  | On estime l'énergie d'une particule confinée dans son  |

|  |   |
|--|---|
|  | état fondamental pour un puits non rectangulaire.<br>On associe l'analyse à l'inégalité d'HEISENBERG. |
|--|---|

## 7.4 États non stationnaires d'une particule

| Programme   | Commentaire  |
|---|--|
| Combinaison linéaire d'états stationnaires. Expression de la densité de probabilité de présence de la particule dans le cas d'une superposition de deux états stationnaires ; interprétation du résultat. | On explique qu'une superposition de deux états stationnaires engendre une évolution au cours du temps de l'état de la particule.<br>En utilisant un logiciel dédié, on décrit l'évolution temporelle d'une particule confinée (puits infini, oscillateur harmonique, ...). |

## Annexes

### 1. Liste de matériel de physique

Le standard national du matériel des CPGE donne la liste globale et détaillée du matériel nécessaire à la mise en œuvre du programme de physique et chimie en ces classes.

Le tableau ci-dessous donne le matériel nécessaire à la mise en œuvre des programmes et que les élèves doivent savoir utiliser lors d'une évaluation pratique avec l'aide d'une notice simplifiée. Une utilisation de matériel hors de cette liste lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'instructions appropriées et d'une introduction guidée suffisamment détaillée.

|   | Domaine           | Matériel  |
|---|-------------------|---|
| 1 | Optique           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Goniomètre</li> <li>Viseur à frontale fixe</li> <li>Lunette auto-collimatrice</li> <li>Spectromètre à fibre optique</li> <li>Laser à gaz et diode laser</li> <li>Sources de lumière spectrales</li> <li>Source de lumière blanche à condenseur</li> <li>Interféromètre de MICHELSON</li> </ul>   |
| 2 | Électronique      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Oscilloscope numérique</li> <li>Carte d'acquisition et logiciel dédié</li> <li>Générateur de signaux électriques Basse Fréquence avec modulation interne en fréquence et sortie d'une tension image de la fréquence</li> <li>Alimentation stabilisée en tension</li> <li>Multimètre numérique</li> <li>Multiplieur analogique</li> </ul> |
| 3 | Ondes             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Émetteur et récepteur d'ondes électromagnétiques</li> <li>Câble coaxial</li> </ul>   |
| 4 | Mécanique         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Capteur de force</li> <li>Appareil photo numérique</li> <li>Pendule simple et pendule pesant</li> </ul>  |
| 5 | Thermodynamique   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Capteur de pression</li> <li>Webcam avec logiciel dédié</li> <li>Caméra thermique</li> <li>Thermomètre</li> <li>Thermocouple</li> <li>Thermistance</li> <li>Capteur infra-rouge</li> </ul>   |
| 6 | Électromagnétisme | <ul style="list-style-type: none"> <li>Teslamètre</li> </ul>  |

### 2. Outils mathématiques pour la physique

L'utilisation d'outils mathématiques est indispensable en sciences physiques. La capacité à mettre en œuvre de

manière autonome certains de ces outils mathématiques dans le cadre des activités relevant de la physique fait partie des compétences exigibles à la fin de la première année. Le tableau ci-dessous explicite ces outils ainsi que le niveau de maîtrise attendu en fin de première année. Il est complété dans le programme de seconde année. Cependant les situations dont la gestion manuelle ne relèverait que de la technicité sont traitées à l'aide d'outils numériques (calculatrices, logiciels de calcul numérique).

| Programme  | Savoir-faire mathématiques exigibles   |
|--|--|
| <b>Équations algébriques :</b><br>Systèmes linéaires de $n$ équations à $p$ inconnues.<br><br>Équations non linéaires.   | Identifier les variables (inconnues) nécessaires à la modélisation du problème sous forme d'un système d'équations linéaires. On donne l'expression formelle des solutions dans le seul cas $n = p = 2$ .<br><br>Représenter graphiquement une équation de la forme $f(x) = g(x)$ et on interprète graphiquement la ou les solutions.  |
| <b>Équations différentielles linéaires et non linéaires :</b><br>Équations différentielles linéaires à coefficients constants. Forme canonique.<br>Équations différentielles linéaires du premier ordre à coefficients constants : $y' + ay = f(x)$ .<br><br>Équations différentielles linéaires du deuxième ordre à coefficients constants : $y'' + ay' + by = f(x)$ .<br><br>Autres équations différentielles d'ordre 1 ou 2.<br><br>Exemples d'équations différentielles non linéaires. | Identifier l'ordre d'une équation différentielle.<br>Mettre l'équation sous forme canonique.<br>Trouver la solution générale de l'équation sans second membre (équation homogène).<br>Trouver l'expression des solutions lorsque $f(x)$ est constante ou de la forme $A \cos(\omega x + \varphi)$ (en utilisant la notation complexe).<br>Utiliser l'équation caractéristique pour trouver la solution générale de l'équation sans second membre.<br>Prévoir le caractère borné ou non de ses solutions (critère de stabilité).<br>Trouver l'expression des solutions lorsque $f(x)$ est constante ou de la forme $A \exp(\lambda x)$ avec $\lambda$ complexe.<br>Trouver la solution de l'équation complète correspondant à des conditions initiales données.<br>Représenter graphiquement cette solution.<br>Obtenir une intégrale première d'une équation de NEWTON $x'' = f(x)$ et l'exploiter graphiquement.<br>Séparer les variables d'une équation du premier ordre à variables séparables.<br>Faire le lien entre les conditions initiales et le graphe de la solution correspondante. |
| <b>Fonctions :</b><br>Fonctions usuelles.<br>Dérivée. Dérivée d'une fonction composée. Dérivée temporelle d'une fonction, notation $\frac{dx}{dt}$ .<br>Développement limité d'une fonction d'une variable au voisinage d'une valeur de la variable. Formule de TAYLOR à l'ordre un ou deux ; interprétation graphiquement.<br>Primitive et intégrale.<br>Valeur moyenne.<br>Représentation graphique d'une fonction.  | Exponentielle, logarithme népérien et décimal, cosinus, sinus, tangente, puissance réelle ( $x \rightarrow x^a$ ).<br>Utiliser la formule de TAYLOR à l'ordre un ou deux ; interpréter graphiquement.<br>Connaître et utiliser les développements limités à l'ordre 1 des fonctions $(1+x)^a$ et $\ln(1+x)$ , $\exp(x)$ et à l'ordre 2 des fonctions $\cos(x)$ et $\sin(x)$ .<br>Interpréter l'intégrale comme une somme de contributions infinitésimales, en lien avec la méthode des rectangles en mathématiques.<br>Exprimer la valeur moyenne sous forme d'une intégrale.<br>Connaître la valeur moyenne sur une période des fonctions $\cos$ , $\sin$ , $\cos^2$ et $\sin^2$ .<br>Déterminer un comportement asymptotique ; rechercher un extremum local.   |

|  |   |
|--|---|
|  | Utiliser des échelles logarithmiques ; identifier une loi de puissance à une droite en échelle log-log.   |
| <b>Géométrie dans <math>\mathbf{R}^2</math> et dans <math>\mathbf{R}^3</math> :</b><br>Vecteurs et système de coordonnées.<br>Projection d'un vecteur et produit scalaire, interprétation géométrique.<br>Produit vectoriel, interprétation géométrique.<br>Produit mixte.<br>Notions de dérivée temporelle d'un vecteur dans un référentiel donné.<br>Transformations géométriques, symétries par rapport à un plan, translations et rotations de l'espace.<br>Courbes planes.<br>Courbes planes paramétrées.<br>Longueurs, aires et volumes classiques.<br>Barycentre d'un système de points.                  | Exprimer les coordonnées d'un vecteur dans une base orthonormée. Utiliser les systèmes de coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques.<br>Interpréter géométriquement le produit scalaire et connaître son expression en fonction des coordonnées dans une base orthonormée.<br>Utiliser la bilinéarité et le caractère symétrique du produit scalaire.<br>Interpréter géométriquement le produit vectoriel et connaître son expression en fonction des coordonnées dans une base orthonormée directe.<br>Utiliser la bilinéarité et le caractère antisymétrique du produit vectoriel.<br>Faire le lien avec l'orientation des trièdres.<br>Utiliser les symétries par rapport à un plan, les translations et les rotations de l'espace.<br>Utiliser leur effet sur l'orientation de l'espace.<br>Reconnaître l'équation cartésienne d'une droite, d'un cercle.<br>Utiliser la représentation polaire d'une courbe plane ; utiliser un grapheur pour obtenir son tracé.<br>Identifier une ellipse à l'aide de sa représentation paramétrique ( $x = a \cos(\omega t)$ , $y = a \cos(\omega t - \varphi)$ ) et la tracer dans les cas particuliers $\varphi = 0$ , $\varphi = \frac{\pi}{2}$ et $\varphi = \pi$ .<br>Citer les expressions du périmètre d'un cercle, de l'aire d'un disque, de l'aire d'une sphère, du volume d'une boule, du volume d'un cylindre.<br>Énoncer la définition du barycentre.<br>Utiliser son associativité.<br>Exploiter les symétries pour prévoir la position du barycentre d'un système homogène. |
| <b>Trigonométrie :</b><br>Angle orienté, convention d'orientation des angles d'un plan (euclidien). Lecture des lignes trigonométriques dans un triangle rectangle, cas des petits angles.<br>Fonctions cosinus, sinus et tangente.<br>Nombres complexes et représentation dans le plan, partie réelle, la partie imaginaire, le module et l'argument d'un nombre complexe. Somme et produit de nombres complexes.<br>Notation complexe, utilisée pour la résolution de l'équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients constants dont le second membre est une fonction sinusoïdale du temps. | Définir une convention d'orientation des angles d'un plan (euclidien) et lire des angles orientés.<br>Relier l'orientation d'un axe de rotation à l'orientation positive des angles d'un plan perpendiculaire à cet axe.<br>Utiliser le cercle trigonométrique et l'interprétation géométrique des fonctions cosinus, sinus et tangente comme aide-mémoire : relation $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$ , relations entre fonctions trigonométriques et toutes relations du type $\cos(\pi \pm x)$ et $\cos(\frac{\pi}{2} \pm x)$ , parités, périodicité, valeurs des fonctions pour les angles usuels.<br>Citer les formules d'addition et de duplication des cosinus et sinus ; utiliser un formulaire dans les autres cas.<br>Calculer et interpréter géométriquement la partie réelle, la partie imaginaire, le module et l'argument d'un nombre complexe.  |
| <b>Analyse vectorielle :</b><br>Gradient d'un champ scalaire, lien entre le gradient et la différentielle.   | On fait le lien entre le gradient et la différentielle.<br>Citer l'expression de la différentielle en fonction des dérivées partielles.<br>Citer l'expression du gradient en coordonnées cartésiennes ; utiliser un formulaire fourni en coordonnées cylindriques ou sphériques.<br>Utiliser le fait que le gradient d'une fonction $f$ est   |



|  |  |
|--|--|
|  | perpendiculaire aux surfaces iso-f et orienté dans le sens des valeurs de f croissantes. |
|--|--|

### 3. Outils numériques pour la physique

La prise en compte de l'enseignement de l'informatique en sciences physiques est un défi important pour notre système éducatif. L'introduction d'activités numériques dans le programme des classes préparatoires prend en compte l'importance des sciences numériques dans la formation des scientifiques notamment dans le domaine de la simulation et de la modélisation.

En sciences physiques, l'utilisation des outils numériques de codage en langage Python est centrée sur la découverte de cet outil de programmation et l'exploitation de fonctions extraites de ses diverses bibliothèques. Python - muni de ses nombreuses bibliothèques - est devenu le langage de référence dans les classes préparatoires scientifiques. Il peut être utilisé comme : simple calculatrice, outil de résolution, visualisation graphique (avec Matplotlib), simulation numérique (NumPy/SciPy), calcul formel (SymPy), réalisation d'interface graphique (TKinter, PyQt ...), production de sites, ....

Les activités numériques de codage fixées dans ce programme permettent aux élèves de développer des connaissances et des savoir-faire utiles à la physique comme le raisonnement, la logique ou la décomposition d'un problème complexe en étapes plus simples.

Le tableau ci-dessous explicite les outils relatifs aux activités numériques ainsi que les savoir-faire exigibles en fin de première année. Il sera complété dans le programme de physique de seconde année.

| Programme   | Savoir-faire exigibles   |
|---|--|
| <b>1. Outils numériques</b>   |  |
| Représentation graphique d'un nuage de points.<br><br>Représentation graphique d'une fonction.<br><br>Courbes planes paramétrées.                 | Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque <b>matplotlib</b> pour représenter un nuage de points.<br>Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque <b>matplotlib</b> pour tracer la courbe représentative d'une fonction.<br>Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque <b>matplotlib</b> pour tracer une courbe plane paramétrée.                       |
| <b>2. Équations algébriques</b>   |  |
| Résolution d'une équation algébrique ou d'une équation transcendante : méthode dichotomique.  | Déterminer, en s'appuyant sur une représentation graphique, un intervalle adapté à la recherche numérique d'une racine par une méthode dichotomique.<br>Mettre en œuvre une méthode dichotomique afin de résoudre une équation avec une précision donnée.<br>Utiliser la fonction <b>bisect</b> de la bibliothèque <b>scipy.optimize</b> (sa spécification étant fournie). |
| <b>3. Intégration – Dérivation</b>  |  |
| Calcul approché d'une intégrale sur un segment par la méthode des rectangles.<br><br>Calcul approché du nombre dérivé d'une fonction en un point. | Mettre en œuvre la méthode des rectangles pour calculer une valeur approchée d'une intégrale sur un segment.<br><br>Utiliser un schéma numérique pour déterminer une valeur approchée du nombre dérivé d'une fonction en un point.   |
| <b>4. Équations différentielles</b>   |  |
| Équations différentielles d'ordre 1.<br><br>Équations différentielles d'ordre supérieur ou égal à 2.  | Mettre en œuvre la méthode d'EULER explicite afin de résoudre une équation différentielle d'ordre 1.<br><br>Transformer une équation différentielle d'ordre n en un système différentiel de n équations d'ordre 1.<br>Utiliser la fonction <b>odeint</b> de la bibliothèque <b>scipy.integrate</b> (sa spécification étant fournie).                                       |
| <b>5. Probabilités – statistiques</b>   |  |
| Variable aléatoire.   | Utiliser les fonctions de base des bibliothèques <b>random</b> et/ou <b>numpy</b> (leurs spécifications étant fournies) pour réaliser des tirages d'une variable aléatoire.<br>Utiliser la fonction <b>hist</b> de la bibliothèque <b>matplotlib.pyplot</b> (sa spécification étant fournie) pour représenter les résultats d'un ensemble de tirages d'une                 |

|                      |   |
|----------------------|---|
|                      | variable aléatoire.<br>Déterminer la moyenne et l'écart-type d'un ensemble de tirages d'une variable aléatoire.   |
| Régression linéaire. | Utiliser la fonction <b>polyfit</b> de la bibliothèque <b>numpy</b> (sa spécification étant fournie) pour exploiter des données.<br>Utiliser la fonction <b>random.normal</b> de la bibliothèque <b>numpy</b> (sa spécification étant fournie) pour simuler un processus aléatoire. |