

Royaume du Maroc



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

Classes Préparatoires aux Grandes Écoles

Programmes de la deuxième année PSI

Physique

1 Préambule

1.1 Objectifs de formation en physique

La réforme du programme de physique de la classe de PSI est rendue nécessaire par l'évolution des contextes scientifiques, 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 PCSI. Le programme de physique de la filière PSI 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, qu'il comprenne mieux l'impact de la science et que, plus assuré dans ses connaissances, 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, GALILÉE, énonçait déjà qu'elles sont le langage dans lequel est écrit le monde.

L'enseignement de la physique est renforcé par une réhabilitation de la formation expérimentale des élèves à travers les travaux pratiques (TP) et les expériences de cours. Chaque fois que c'est possible, l'enseignant est invité à présenter des expériences de cours pour illustrer ses propos.

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.

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 adopté 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, qu'il comprenne mieux l'impact de la science et que, plus assuré dans ses connaissances, il soit préparé à poursuivre son cursus d'études dans les grandes écoles.

1.2 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, commun à tous les élèves de la voie PSI ;

- ♦ favoriser l'acquisition d'automatismes et développer l'autonomie et l'initiative des élèves en proposant des temps de travail personnel ou en groupe.

1.3 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.

1.4 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 PSI 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.

1.5 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 oeuvre 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 *Contenu thématique*, 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 :

- I** mécanique des fluides ;
- II** électronique ;
- III** électromagnétisme ;
- IV** conversion de puissance ;
- V** physique des ondes ;
- VI** optique ;
- VII** thermodynamique

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 oeuvre 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 PSI.

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 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 oeuvre 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 savoir dans le domaine de la mesure et de l'évaluation de sa précision, d'autonomie dans la mise en oeuvre 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 oeuvre 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 évaluer rapidement le degré de réalisation et de maîtrise à la fin de chaque étape ou 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 dans le domaine de la mesure expérimentale et de l'évaluation des incertitudes des mesures. Elle aborde 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 aussi l'importance de l'évaluation régulière des acquis des élèves inscrits dans le volet de la formation expérimentale.

Une liste de matériel, 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 elle 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, et 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.

En fin, 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.

Variabilité de la mesure d'une grandeur physique.
Notion d'incertitude. Incertitude-type.
Erreur ; composante aléatoire et composante systématique de l'erreur.
Incertitude-type A. Incertitude-type B. Propagation des incertitudes. Écart normalisé.
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.
Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A).
Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de

Incertitude-type composée.
Incertitude élargie.

Écriture du résultat d'une mesure.
Chiffres significatifs.
Comparaison de deux valeurs ; écart normalisé.

Régression linéaire.

type B).

Associer un intervalle de confiance à l'écart-type dans l'hypothèse d'une distribution suivant la loi normale.

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. Comparer entre elles les différentes contributions lors de l'évaluation d'une incertitude-type composée.

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.

Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat d'une mesure.

Comparer deux valeurs dont les incertitudes-types sont connues à l'aide de leur écart normalisé.

Analyser les causes d'une éventuelle incompatibilité entre le résultat d'une mesure et le résultat attendu par une modélisation.

Utiliser un logiciel de régression linéaire afin d'obtenir les valeurs des paramètres du modèle.

Analyser les résultats obtenus à l'aide d'une procédure de validation : analyse graphique intégrant les barres d'incertitude ou analyse des écarts normalisés.

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

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.

La prévention des différents risques repose, d'une part, sur la mise en sécurité des installations électriques, mécaniques, thermodynamiques, ... et des matériels exploités et, d'autre part, sur le respect des règles de sécurité lors de leur utilisation ou lors d'opération sur ou à proximité des différentes installations.

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.

2.2.1. Prévention des risques au laboratoire

Adopter une attitude responsable et adaptée au travail en laboratoire.

Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.

Risque chimique

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.

Risque électrique

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.

Risque optique et électromagnétique

Les rayonnements optiques 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.

Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation des émetteurs d'ondes hyperfréquences.

Risque thermique

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.

Risque mécanique

Les risques mécaniques englobent la coupure, la lacération ou la piqûre, l'écrasement, le contact avec des machines.

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.

Risque sonore

Le bruit au 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.

Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation des émetteurs d'onde infrasonores, sonores ou ultrasonores.

2.2.2. Prévention de l'impact environnemental

Traitement et rejet des espèces chimiques.

Adapter le mode d'élimination d'une espèce chimique ou d'un mélange en fonction des informations recueillies sur la toxicité ou les risques. Sélectionner, parmi plusieurs modes opératoires, celui qui minimise les impacts environnementaux.

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.

2.4 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.

3 Électronique

TP1 Étude d'un filtre passe-bande accordable

TP2 Effet d'un filtre linéaire sur un signal périodique

TP3 Analyse spectrale d'un signal électronique

TP4 Traitement numérique d'un signal, échantillonnage, filtrage numérique...

TP5 Modulation et démodulation d'amplitude

TP6 Oscillateur auto-entretenu quasi sinusoïdal

TP7 Oscillateur de relaxation

- ◆ connaître les 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 ;
- ◆ maîtriser l'utilisation des instruments électroniques usuels ;
- ◆ appréhender les conséquences des valeurs de la résistance d'entrée ou de sortie d'un appareil de mesure sur le fonctionnement d'un circuit ;

- ◆ comprendre et réaliser l'acquisition d'un signal périodique simple puis l'analyser par transformée de Fourier ;
- ◆ caractériser un signal à l'aide de son spectre ;
- ◆ mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'action d'un filtre sur un signal périodique ;
- ◆ choisir de façon cohérente les paramètres (durée, nombre d'échantillons, fréquence d'échantillonnage) d'une acquisition numérique afin de respecter la condition de NYQUIST-SHANNON ;
- ◆ confronter les résultats expérimentaux aux expressions théoriques ;
- ◆ déterminer rapidement le type de filtre étudié et de sa fréquence de coupure ;
- ◆ tracer le diagramme de BODE expérimental en gain et en phase ;
- ◆ obtenir la réponse d'un filtre à un signal créneau et à un signal triangulaire ;
- ◆ étudier le filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal à partir d'une analyse spectrale ;
- ◆ mettre en évidence le caractère intégrateur ou dérivateur d'un filtre dans son diagramme asymptotique ;
- ◆ identifier la présence de la rétroaction sur l'entrée inverseuse d'un amplificateur linéaire intégré comme un indice d'une possibilité de stabilité du régime linéaire ;
- ◆ produire un signal par multiplication de signaux ;
- ◆ mettre en œuvre la modulation d'amplitude ;
- ◆ décrire le spectre d'un signal modulé ;
- ◆ réaliser la démodulation d'amplitude par détection de crête ;
- ◆ réaliser la démodulation synchrone ;
- ◆ mettre en œuvre un convertisseur analogique/numérique et un traitement numérique afin de réaliser un filtre passe-bas ;
- ◆ utiliser un convertisseur numérique/analogique pour restituer un signal analogique ;
- ◆ 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 ;
- ◆ analyser un spectre calculé numériquement et repérer l'influence du repliement spectral et des fuites spectrales ;
- ◆ réaliser une mesure de résolution (nombre de bits) d'un CAN ;
- ◆ réaliser un filtrage numérique ;
- ◆ détecter le caractère non linéaire d'un système par l'apparition de nouvelles composantes spectrales ;
- ◆ réaliser un comparateur à hystérésis et analyser son fonctionnement ;
- ◆ valider la relation théorique donnant la période d'un oscillateur de relaxation ;
- ◆ mettre en œuvre un oscillateur quasi-sinusoïdal et un oscillateur de relaxation ;
- ◆ analyser les spectres des signaux générés lors de la mise en œuvre d'un oscillateur.

4 Électronique de puissance

TP8 Étude d'un transformateur : ferromagnétisme

TP9 Étude d'un transformateur : bilan de puissance

TP10 Étude de la machine à courant continu**TP11** Conversion électronique de puissance, étude d'un hacheur**TP12** Asservissement de vitesse d'une machine à courant continu**TP13** Oscillateurs électriques couplés**TP14** Redressement double alternance et détection

- ◆ mise en évidence du cycle d'hystérésis d'un milieu ferromagnétique ;
- ◆ mettre en œuvre un transformateur et étudier son rendement sur charge résistive ;
- ◆ savoir utiliser un transformateur d'isolement ;
- ◆ mesurer une puissance moyenne à l'aide d'un wattmètre numérique ;
- ◆ exploiter les résultats de mesures afin de déterminer les caractéristiques d'un transformateur réel ;
- ◆ mettre en œuvre une machine à courant continu ;
- ◆ déterminer les pertes mécaniques et les pertes fer du moteur à courant continu ;
- ◆ étudier la commande du transistor de puissance du hacheur ;
- ◆ étudier un hacheur chargé par une association d'une résistance et d'une bobine ;
- ◆ savoir estimer la résistance et la capacité convenables pour réaliser un détecteur de crête satisfaisant.

5 Physique des ondes**TP15** Ondes mécaniques, acoustiques, corde vibrante**TP16** Effet DOPPLER**TP17** Propagation dans un câble coaxial**TP18** Ondes électromagnétiques centimétriques en propagation libre

- ◆ analyser la phénoménologie associée à différents types d'ondes : planes, sphériques, progressives, stationnaires, harmoniques et comprendre les liens possibles entre ces qualificatifs ;
- ◆ décrire une onde stationnaire observée par stroboscopie sur la corde de MELDE ;
- ◆ mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant d'analyser le spectre du signal acoustique produit par une corde vibrante ;
- ◆ mettre en œuvre une détection synchrone pour mesurer une vitesse par décalage DOPPLER ;
- ◆ comprendre les origines de la dispersion : réponse du milieu ou conditions aux limites transverses ;
- ◆ déterminer la période, la fréquence et la longueur d'onde d'une onde ;
- ◆ mesurer la vitesse de phase et le déphasage dû à la propagation d'un phénomène ondulatoire ;
- ◆ déterminer la célérité de propagation des ultrasons.
- ◆ mesurer le retard d'une salve d'ultrasons ;
- ◆ étudier l'émission, la polarisation, la propagation et la réception d'une onde électromagnétique dans le domaine des ondes centimétriques (ou micro-ondes) ;

- ◆ mettre en oeuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques ;
- ◆ mettre en évidence une polarisation rectiligne ;
- ◆ réaliser des expériences de goniométrie, de diffraction et d'interférences aux échelles de longueur d'onde des hyperfréquences ;
- ◆ étudier la propagation d'un signal dans le câble coaxial ;
- ◆ déterminer une différence de fréquences à partir d'enregistrements de battements ou d'observation sensorielle directe ;
- ◆ mettre en oeuvre un dispositif expérimental pour visualiser et caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes.

6 Optique

TP19 Interférence et diffraction des ondes lumineuses

TP20 Polarisation des ondes lumineuses

TP21 Réglage et utilisation d'un spectrogoniomètre, spectroscopie à réseau

- ◆ éclairer un objet de manière adaptée ;
- ◆ optimiser la qualité d'une image ;
- ◆ choisir une ou plusieurs lentilles en fonction des contraintes expérimentales ;
- ◆ utiliser des polariseurs et étudier quantitativement la loi de MALUS ;
- ◆ mettre à profit les réglages concernant la lunette et le collimateur afin d'utiliser un goniomètre ;
- ◆ savoir mesurer un angle à l'aide du vernier d'un goniomètre ;
- ◆ étudier la déviation de la lumière par un réseau ;
- ◆ mettre en évidence le minimum de déviation ;
- ◆ mesurer la densité de traits d'un réseau à partir de raies de longueur d'onde connue ;
- ◆ mesurer une longueur d'onde optique ;
- ◆ procéder à l'évaluation des incertitudes-types B et leur propagation à l'aide d'un langage de programmation ;
- ◆ visualiser les spectres d'émission atomique du sodium, du mercure et de l'hydrogène ;
- ◆ déterminer un spectre à l'aide d'un spectromètre à fibre optique ;
- ◆ obtenir, observer et analyser quantitativement des figures d'interférences ;
- ◆ savoir réaliser un protocole de réglage en contrôlant les étapes successives ;
- ◆ savoir utiliser une lame à retard ;
- ◆ mettre en oeuvre un photorécepteur ;
- ◆ mettre en oeuvre des expériences utilisant un capteur photographique numérique ;
- ◆ réaliser un enregistrement à l'aide d'un capteur CCD.

7 Mécanique

TP22 Oscillateurs mécaniques couplés

- ◆ étudier le mouvement oscillatoire d'un pendule mécanique ;
- ◆ mesurer la période d'oscillation d'un pendule ;
- ◆ mettre en évidence le défaut d'isochronisme du pendule ;
- ◆ mesurer la période d'oscillation en fonction de la longueur ;
- ◆ mesurer le moment d'inertie d'un solide en rotation et étudier sa variation quand on déplace les masses qui le constituent ;
- ◆ déterminer l'accélération de la pesanteur g ;
- ◆ comparer les oscillations d'un pendule pesant au modèle du pendule simple ;
- ◆ réaliser l'acquisition expérimentale du portrait de phase d'un pendule pesant ;
- ◆ réaliser l'acquisition des oscillations de deux oscillateurs mécaniques couplés ;
- ◆ mettre en évidence les différents modes propres ;
- ◆ mettre en évidence le phénomène de battement ;
- ◆ mesurer un couple de frottement ;
- ◆ réaliser l'étude énergétique d'un pendule pesant et mettre en évidence la diminution de l'énergie mécanique.

8 Thermodynamique

TP23 Conduction thermique

- ◆ comparer expérimentalement les conductivités thermiques de quelques matériaux ;
- ◆ classer les matériaux selon leurs propriétés isolantes.
- ◆ étudier la propagation de la chaleur dans des barres métalliques ;
- ◆ mesurer la conductivité thermique d'un matériau ;
- ◆ mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.

9 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 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 savoir et savoir-faire expérimentaux. Lors de cette évaluation, il faudrait bien expliciter les distinctions entre savoirs et savoir-faire, et entre savoir-utiliser et savoir mettre en oeuvre.

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 exigible, d'autre part, des commentaires ainsi que les activités numériques et expérimentales 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 têtes de chapitre sont très classiques, de façon que les acquis des élèves soient clairement identifiés.

Table des matières avec horaires indicatifs

Mécanique des fluides	(26h) 59
Étude phénoménologique des fluides en écoulement	(6h) 60
Cinématique des fluides	(4h) 61
Dynamique des fluides	(8h) 62
Bilans dynamiques et thermodynamiques	(8h) 63
Électronique	(17h) 63
Stabilité et réponse d'un système linéaire	(8h) 64
Oscillateurs	(4h) 65
Électronique numérique	(3h) 66
Modulation et démodulation d'amplitude	(2h) 67
Électromagnétisme	(26h) 67
Transport de charge	(2h) 68
Condensateur	(3h) 69
Équations de MAXWELL	(6h) 69
Forces de LAPLACE	(2h) 70
Induction électromagnétique	(8h) 71
Milieux ferromagnétiques	(5h) 72
Conversion de puissance	(21h) 73
Conversion électromagnétique statique	(5h) 74
Conversion électromécanique	(11h) 74
Conversion électronique	(5h) 75
Physique des ondes	(26h) 76
Phénomènes de propagation unidimensionnels non dispersifs	(7h) 76
Ondes sonores dans les fluides	(8h) 77
Ondes électromagnétiques dans le vide	(5h) 78
Phénomènes linéaires de propagation unidimensionnels dispersifs	(6h) 78
Optique	(11h) 79
Interférences de deux ondes cohérentes	(7h) 79
Étude du réseau plan	(4h) 80
Thermodynamique	(8h) 81
Conduction thermique	(5h) 81
Diffusion de particules	(3h) 82

1 Mécanique des fluides

L'objectif de cette partie est de présenter les grandeurs essentielles caractérisant un écoulement. On considère l'accélération comme la dérivée particulaire de la vitesse. L'étude du mouvement de la particule de fluide est déterminée par l'application du principe fondamental de la dynamique sans faire référence aux équations d'EULER ou de NAVIER-STOKES.

Le professeur pourra aborder les différentes notions de cette partie dans l'ordre qu'il souhaite en fonction du besoin pédagogique.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- ◆ utiliser les trois échelles macroscopique, microscopique, mésoscopique ;
- ◆ définir avec rigueur un système approprié ;
- ◆ réaliser des bilans sous forme globale et locale ;
- ◆ utiliser des modèles et analyser leurs limites ;
- ◆ appliquer les lois générales de la mécanique des fluides et de la thermodynamique ;
- ◆ étudier des systèmes d'intérêt industriel.

RELECTURE

1.1 Étude phénoménologique des fluides en écoulement

On introduit la notion de viscosité sur un exemple d'écoulement de cisaillement simple. Cette notion permet de classer les écoulements et évoquer la résolution des paradoxes auxquels peut conduire le modèle de l'écoulement parfait. Les expressions des forces surfaciques de viscosité n'est pas exigible.

Le nombre de REYNOLDS est défini à partir du rapport de deux temps caractéristiques construits par analyse dimensionnelle. Le temps caractéristique de la convection est simplement le rapport entre la distance parcourue par la particule fluide et la vitesse caractéristique. Le temps caractéristique de la diffusion est obtenu à partir de l'équation du mouvement où les termes associés à la diffusion sont prépondérants. Le nombre de REYNOLDS permet d'aborder la notion de similitude entre des systèmes réalisés à des échelles différentes et caractérisés par les mêmes nombres sans dimension.

Définition d'un fluide.

Modèle du fluide continu.

Particule de fluide.

Masse volumique.

Pression.

Viscosité dynamique.

Équivalents volumiques des forces de pression et des forces de viscosité.

On utilise la notion du libre parcours moyen de manière purement descriptive ; la notion de section efficace et le modèle des sphères dures sont hors-programme.

On mentionne les trois échelles spatiales : échelle microscopique (moléculaire), échelle mésoscopique (de la particule fluide), échelle macroscopique. On définit la particule de fluide comme un système mésoscopique de masse constante.

On donne l'ordre de grandeur des masses volumiques de l'eau et de l'air dans les conditions usuelles.

On définit la viscosité via les expressions phénoménologiques des forces surfaciques de viscosité dans la situation simplifiée d'un champ de vitesses $\vec{V} = V_x(y)\vec{u}_x$; on en déduit l'expression de la force volumique de viscosité, dont on admet le caractère général pour un fluide newtonien en écoulement incompressible.

On donne l'ordre de grandeur de la viscosité de fluides courants.

On signale la condition d'adhérence à l'interface fluide-solide.

Toute modélisation microscopique de la viscosité est exclue.

La deuxième viscosité (de compressibilité) est hors-programme.

1.2 Cinématique des fluides

La cinématique des fluides est considérée exclusivement comme un outil : elle ne peut être l'objet principal d'un problème écrit ou d'un exercice d'oral. On peut s'appuyer sur la lecture de cartes d'écoulements. La distribution locale des vitesses dans un milieu continu et la matrice des taux de déformation sont hors-programme : on se limite à illustrer sur quelques exemples pertinents la signification physique de $\text{div}(\vec{v})$ et de $\text{rot}(\vec{v})$.

Description de LAGRANGE, description d'EULER.	On mentionne l'intérêt et l'inconvénient de chaque description.
Champ eulerien des vitesses : vitesse de la particule de fluide (vitesse microscopique et vitesse mésoscopique), ligne de courant, tube de courant.	On distingue vitesse microscopique et vitesse mésoscopique.
Dérivée particulaire d'un champ : <u>terme local</u> ; terme mathématique convectif ($\vec{v} \cdot \text{grad}$) $\vec{v}$	On définit la dérivée particulaire d'une grandeur eulerienne comme étant la dérivée totale de cette grandeur en suivant le mouvement de la particule fluide. On se limite au champ de masse volumique et au champ des vitesses.
Densité de courant de masse.	On signale que le vocabulaire de l'analyse vectorielle (circulation, flux...) est issu de la mécanique des fluides.
Débit massique.	On déduit la condition imposée au champ des vitesses à la limite d'un obstacle imperméable.
Bilans de masse : équations globale et locale de conservation de la masse.	On signale l'analogie entre les lois de conservation de la masse et de la charge électrique dans le cours l'électromagnétisme. Il s'agit simplement d'introduire les définitions en dégageant le contenu physique des notions introduites
Écoulement stationnaire.	Un écoulement est stationnaire si tous les champs euleriens sont indépendants du temps.
Ligne et tube de courant de masse.	À partir d'une carte de champ des vitesses en régime stationnaire, on décrit qualitativement le champ des accélérations.
Écoulement incompressible et homogène.	On définit un écoulement incompressible et homogène par la propriété d'une masse volumique constante et uniforme ($D\rho/Dt = 0$, $\text{div}(\vec{v}) = 0$ en tout point). On relie cette propriété à la conservation du volume pour un système fermé.
Débit volumique.	On signale la conservation du débit volumique le long d'un tube de courant indéformable et on définit la notion de vitesse débitante également appelée vitesse moyenne.
Écoulement irrotationnel. Potentiel des vitesses.	Les notions de fonction de courant et de potentiel complexe des vitesses sont hors-programme.

1.3 Dynamique des fluides

L'expression de l'accélération comme la dérivée particulière de la vitesse est abordée mais les équations d'EULER ou de NAVIER-STOKES ne sont pas au programme.

Fluide parfait. Fluide visqueux.
Nombre de REYNOLDS.

Chute de pression dans une conduite horizontale.
Loi de HAGEN-POISEUILLE.
Résistance hydraulique.
Notion de similitude et adimensionnement des équations en mécanique des fluides.

Force de traînée d'une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme dans un fluide.
Loi de STOKES.
Coefficient de traînée C_x ; graphe de C_x en fonction du nombre de REYNOLDS.
Notion d'écoulement laminaire et d'écoulement turbulent.

Notion d'écoulement parfait et de couche limite.
Forces de traînée et de portance d'une aile d'avion à nombre de REYNOLDS élevé.

L'étude du mouvement de la particule de fluide est déterminée par application du principe fondamental de la dynamique.

On interprète le nombre de REYNOLDS comme le rapport d'un temps caractéristique de diffusion de quantité de mouvement sur un temps caractéristique de convection.

On signale que la viscosité est un transport diffusif de quantité de mouvement.

On évalue le nombre de REYNOLDS et on l'utilise pour caractériser le régime d'écoulement.

L'étude est limitée aux écoulements visqueux incompressibles.

Dans le cas d'un écoulement à bas nombre de REYNOLDS, on établit la loi de HAGEN-POISEUILLE pour un écoulement laminaire incompressible homogène se produisant dans une conduite cylindrique. On signale que pour un écoulement quelconque, on utilise des abaques donnant la chute de pression en fonction du nombre de REYNOLDS.

On illustre l'adimensionnement des équations sur un exemple simple. On indique l'utilité de la similitude pour le passage des résultats expérimentaux ou numériques concernant un prototype vers le système réel correspondant.

Toute étude générale de la similitude est hors programme.

L'approche est purement descriptive. On s'intéresse à l'écoulement engendré par le mouvement rectiligne et uniforme d'une sphère.

En exploitant d'une part les graphes expérimentaux donnant la traînée en fonction du nombre de REYNOLDS et d'autre part des cartes de lignes de champ, des photos ou des films de cet écoulement, on fait apparaître les modèles limites de l'écoulement laminaire et de l'écoulement turbulent, ainsi que les expressions correspondantes de la traînée. On associe une gamme de nombre de REYNOLDS à un modèle de traînée linéaire ou à un modèle quadratique.

Les écoulements turbulents en tant que tels ne sont pas au programme.

Un écoulement parfait est un écoulement où tous les phénomènes diffusifs, notamment la viscosité, sont négligeables : les particules de fluide évoluent de manière adiabatique et réversible.

On introduit qualitativement la notion de couche

limite afin de préciser le domaine de validité du modèle de l'écoulement parfait.

On reformule la condition à la limite d'un obstacle, imposée au champ des vitesses.

On donne et on exploite les allures des graphiques de C_x et C_z et on les utilise pour préciser l'influence de l'angle d'incidence sur les forces de traînée et de portance.

1.4 Bilans dynamiques et thermodynamiques

Cette partie prolonge l'étude des machines thermiques réalisée en première année. Elle a pour objectif d'effectuer des bilans de grandeurs extensives thermodynamiques et mécaniques. Ces bilans sont illustrés sur des situations d'intérêt industriel (réacteur, éolienne, turbine, machines thermiques...).

On définit également le modèle de l'écoulement parfait qui permet d'introduire la relation de BERNOULLI. Si un bilan mécanique nécessite un changement de référentiel, on peut utiliser la loi de composition des vitesses fournie.

Toute formulation générale, notamment le théorème d'EULER et le théorème de REYNOLDS, sont hors-programme.

Système ouvert, système fermé.

Théorèmes de BERNOULLI pour les écoulements parfaits incompressibles et homogènes.

Applications : effet VENTURI, débitmètre, tube de PITOT.

Exemples de bilans de quantité de mouvement, de moment cinétique, d'énergie cinétique, d'énergie mécanique, d'énergie interne et d'entropie pour un écoulement unidimensionnel en régime permanent.

À partir d'une surface de contrôle ouverte vis-à-vis des échanges, on se ramène à un système fermé approprié.

La forme généralisée du théorème de BERNOULLI pour les écoulements compressibles est hors-programme.

On effectue un bilan d'énergie sur une installation industrielle.

On affirme que la puissance des actions intérieures est nulle pour un écoulement parfait et incompressible.

Toute formulation générale, notamment le théorème d'EULER et le théorème de REYNOLDS, est hors-programme.

2 Électronique

Cette partie a pour objectif, en révisant les savoir et les savoir-faire sur les circuits électroniques acquis en première année en cours, en expériences de cours et en travaux pratiques, de les reprendre dans l'esprit du traitement du signal et de l'étude des systèmes (stabilité, oscillateur, réalisation de filtres actifs à forte impédance d'entrée pour une association en cascade). Ces différentes thématiques sont illustrées à l'aide de l'amplificateur linéaire intégré, (également appelé amplificateur opérationnel) dont l'étude n'est pas une fin en soi mais un outil permettant des réalisations expérimentales variées.

On complète l'approche analogique des circuits électriques par un chapitre à vocation expérimentale consacré au traitement numérique des signaux à travers les sujets suivants :

- ◆ l'échantillonnage et le repliement de spectre ;
- ◆ le filtrage numérique ;
- ◆ les conversions analogique/numérique et numérique/analogique.

Enfin, la problématique de la transmission d'un signal temporel codant une information est abordée dans l'étude et la réalisation d'une modulation, en relation avec la partie du programme consacrée à la propagation des ondes électromagnétiques.

Tout calcul théorique, notamment de transformée (de FOURIER, de LAPLACE ou autre), est exclu du programme. Néanmoins, dans le but de faciliter le lien avec le cours de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur, la notation symbolique de la fonction de transfert sera utilisée.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- ◆ passer d'une représentation temporelle à une représentation fréquentielle et réciproquement ;
- ◆ analyser la stabilité d'un système linéaire du premier et du second ordre ;
- ◆ étudier des manifestations des non linéarités ;
- ◆ effectuer une analyse spectrale de signaux ;
- ◆ effectuer quelques opérations de traitement du signal en électronique analogique et numérique.
- ◆ illustrer expérimentalement la condition de NYQUIST-SHANNON ;
- ◆ expliquer et mettre en oeuvre un filtrage numérique.

2.1 Stabilité et réponse d'un système linéaire

On s'intéresse dans cette partie aux propriétés des systèmes linéaires déjà abordés en première année. Les outils introduits en première année (loi des mailles, loi des nœuds, diviseur de tension) et savoirs et savoir-faire relatifs au filtrage et à la décomposition harmonique d'un signal périodique sont révisés sans ajout de nouveaux acquis. Dans le but de faciliter le lien avec le cours de sciences industrielles pour l'ingénieur, la notation symbolique de la fonction de transfert $H(p)$ est utilisée sans faire référence à la transformée de LAPLACE. L'étude est complétée par une analyse de la stabilité des systèmes du premier et du second ordre en examinant le régime transitoire associé à l'équation différentielle.

Réponse d'un système linéaire à un signal sinusoïdal en régime établi (réponse harmonique).

Fonction de transfert entrée-sortie d'un système linéaire continu et invariant.

Représentation de BODE. Tracés asymptotiques.

L'utilisation en travaux pratiques de moyens numériques d'analyse harmonique permettra des comparaisons immédiates entre fonction de transfert et représentation spectrale d'une réponse du système.

Stabilité.

Modèle de l'ALI défini par une résistance d'entrée infinie, une résistance de sortie nulle, une fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire, une saturation de la tension de sortie. Limites du modèle : vitesse limite de balayage, saturation de l'intensité du courant de sortie.

Un système est linéaire quand il est régi par une équation différentielle linéaire.

On fait remarquer qu'un signal possède une représentation dans l'espace des temps et une représentation dans l'espace des fréquences.

On étudie la stabilité d'un système d'ordre 1 ou 2 d'après les signes des coefficients de l'équation différentielle homogène ou de la fonction de transfert.

On montre sur l'exemple de l'amplificateur inverseur, les conséquences de la bande passante des ALI sur les limitations linéaires des fonctions réalisées au moyen de ce composant.

La vitesse limite de balayage de l'ALI est évoquée en travaux pratiques afin d'identifier les distorsions harmoniques traduisant un comportement non linéaire. Les limitations associées aux courants de polarisation et la tension de décalage ne sont pas étudiées.

Modèle de l'ALI idéal en régime linéaire et en régime saturé.

On donne les hypothèses du modèle de l'ALI idéal en régime linéaire, en particulier, une résistance d'entrée infinie, une résistance de sortie nulle, une bande passante infinie.

Rétroaction.

Toute étude générale de la rétroaction est hors programme. On se limite à l'étude de la rétroaction sur quelques exemples simples (amplificateur inverseur ou non inverseur, suiveur, intégrateur).

La rétroaction et le bouclage des systèmes linéaires sont introduits dans le but d'aborder la stabilité.

On souligne en particulier que la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse de l'ALI est un indice d'une probable stabilité du régime linéaire d'un montage.

Mise en cascade de montages simples.

On détermine les impédances d'entrées de quelques montages simples (amplificateur inverseur ou non inverseur, suiveur, intégrateur) et on explique l'intérêt de réaliser des filtres de grande impédance d'entrée et de faible résistance de sortie pour leur mise en cascade.

Comparateur simple.

On affirme que l'absence de rétroaction ou la présence d'une unique rétroaction sur la borne non inverseuse est un indice d'un probable comportement en saturation.

Comparateur à hystérésis.

On établit le cycle d'un comparateur à hystérésis. On utilise le phénomène d'hystérésis pour illustrer la notion de la fonction mémoire.

On affirme que pour un signal d'entrée sinusoïdal, le caractère non-linéaire engendre la génération d'harmoniques en sortie.

2.2 Oscillateurs

Cette partie s'intéresse à une étude non exhaustive des oscillateurs en électronique. Les exemples sont choisis à l'initiative du professeur et les calculs des fonctions de transfert des filtres ne constituent pas un objectif de formation. En travaux pratiques, on complète l'étude par une analyse spectrale des signaux.

Oscillateur quasi-sinusoïdal réalisé en bouclant un filtre passe-bande du deuxième ordre avec un amplificateur.

On exprime les conditions théoriques (gain et fréquence) d'auto-oscillation sinusoïdale d'un système linéaire bouclé.

On analyse sur l'équation différentielle l'inégalité que doit vérifier le gain de l'amplificateur afin d'assurer le démarrage des oscillations.

On interprète le rôle des non-linéarités dans la stabilisation de l'amplitude des oscillations.

On définit le taux de distorsion harmonique des signaux.

Oscillateur de relaxation associant un intégrateur et un comparateur à hystérésis.

On décrit les différentes séquences de fonctionnement d'un oscillateur de relaxation, on exprime les conditions de basculement et on détermine la période d'oscillation.

Générateur de signaux non sinusoïdaux.

2.3 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. Les notions de base sont introduites d'un point de vue expérimental et constituent 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.

Signal analogique et signal numérique. Schéma synoptique de traitement d'un signal analogique. Échantillonnage.

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.

Structure du spectre du signal obtenu après échantillonnage. Repliement du spectre.

Filtrage numérique.

Restitution d'un signal analogique.

On explique de façon qualitative les diverses transformations que l'on fait subir à un signal analogique pour le rendre manipulable par un calculateur : échantillonnage, quantification et codage.

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.

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.

Activité numérique : calculer, à l'aide d'un langage de programmation, la transformée de FOURIER discrète d'un signal numérique.

On présente une étude comparative d'un filtre analogique passe-bas et d'un filtre numérique remplissant la même fonction.

On met en oeuvre, en travaux pratiques, un convertisseur analogique/numérique et un traitement numérique afin de réaliser un filtre passe-bas.

On explique comment restituer le signal analogique à l'aide d'un filtre passe-bas. On met en oeuvre, en travaux pratiques, un convertisseur numérique/analogique pour restituer un signal analogique.

Activité numérique : réaliser, à l'aide d'un langage de programmation, un filtrage numérique d'un signal issu d'une acquisition, et mettre en évidence la limitation introduite par l'échantillonnage.

2.4 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.

Fonction multiplication analogique : schéma et relation de fonctionnement.

La fonction multiplication analogique concerne un multiplieur analogique réalisant la fonction :

$$v_s(t) = k.v_{e1}(t) \times v_{e2}(t)$$

Multiplication d'un signal par une constante.
Multiplication d'un signal sinusoïdal par lui-même.
Multiplication de deux signaux sinusoïdaux différents.

On précise les caractéristiques du signal de sortie : amplitude, fréquence et valeur moyenne.

Dans le cas de la multiplication de deux signaux sinusoïdaux différents, on distingue les deux cas : fréquences voisines et fréquences très différentes. En travaux pratiques, on fait l'analyse spectrale du signal de sortie et on fait remarquer la non-linéarité du composant multiplieur.

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.

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 :

- Démodulation par détection d'enveloppe.
- Démodulation synchrone.

On justifie la nécessité d'utiliser une opération non linéaire.

On fait constater l'influence du taux de modulation sur la démodulation d'amplitude.

On explique le principe de la détection synchrone.

On réalise en travaux pratiques une démodulation synchrone.

3 Électromagnétisme

L'enseignement de l'électromagnétisme est centré d'une part sur l'étude des phénomènes d'induction électromagnétique et de leurs applications dont certaines sont développées dans la partie " Conversion de puissance ", et d'autre part, sur l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques (intégrée dans la partie " Physique des ondes "). Cet enseignement s'appuie sur l'enseignement d'électromagnétisme de PCSI.

En ce qui concerne les forces de LAPLACE, on traite des modèles simples pour lesquels le calcul des forces de LAPLACE ne requiert aucune technicité et on se limite aux expressions des forces volumiques et linéiques. Le flux coupé et le théorème de MAXWELL sont hors-programme. Tout calcul de forces de LAPLACE à partir de l'énergie magnétique est hors-programme.

L'enseignement d'électrostatique et de magnétostatique de la classe PCSI est complété par une approche locale (équations de MAXWELL et relations de passage). Aucune technicité supplémentaire

ne doit être recherchée dans les calculs de champs électrique ou magnétique dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) ou quasi-permanents; en particulier le calcul de champs magnétiques créés par une distribution volumique ou surfacique de courants par la loi de BIOT et SAVART reste hors-programme.

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;
- ◆ conduire des bilans énergétiques mettant en jeu matière et champ électromagnétique;
- ◆ 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;
- ◆ mettre en oeuvre des expériences illustrant la manifestation des phénomènes d'induction.

3.1 Transport de charge

L'étude du transport de charge repose essentiellement sur la notion de bilan de charge électrique, ce qui conduit à la loi locale de conservation charge. Dans le cas d'un milieu conducteur, l'étude s'appuie sur un modèle microscopique. Pour sensibiliser les élèves à l'aspect complexe de la matière, l'enseignant est invité à conduire une critique du modèle historique de DRUDE en comparant le libre parcours moyen d'un électron libre avec la distance interatomique du réseau. La conductivité électrique est réutilisée lors de l'étude des ondes électromagnétiques dans les conducteurs (effet de peau et réflexion sur un métal).

Densité volumique de charge électrique ρ , vecteur densité volumique de courant électrique $\vec{j}$.

Intensité du courant électrique.

Bilan de charge électrique.

Équation locale de la conservation de la charge électrique.

Ligne de courant et tube de courant.

Caractère conservatif du vecteur densité volumique de courant électrique en régime stationnaire.

Loi d'OHM locale.

Modèle de DRUDE.

On décrit les différents types de porteurs de charge et on fait la distinction entre charges mobiles et charges fixes. On part d'une description microscopique faisant intervenir les porteurs de charges pour aboutir aux grandeurs mésoscopiques ρ et $\vec{j}$.

On précise que l'intensité du courant électrique est le flux du vecteur densité volumique de courant électrique à travers une surface orientée.

On établit, en coordonnées cartésiennes, l'équation locale traduisant la conservation de la charge électrique.

On énonce l'équation locale et on en interprète chacun des termes.

On relie le caractère conservatif du vecteur densité volumique de courant électrique en régime stationnaire à la loi des nœuds en électrocinétique dans le cadre de l'ARQS.

On donne la relation entre le vecteur densité volumique de courant et le champ électrique dans un conducteur ohmique.

On donne des ordres de grandeur de la conductivité électrique.

On établit une expression de la conductivité élec-

Résistance d'un conducteur cylindrique.

trique, en régime stationnaire, dans le cadre d'un modèle microscopique.

On établit l'expression de la résistance d'un conducteur cylindrique en supposant qu'il est parcouru uniformément par un courant parallèle à son axe.

3.2 Condensateur

L'étude du condensateur dans la géométrie plane permet d'introduire l'expression de l'énergie volumique du champ électrique. La généralité de cette expression est admise. Aucune notion sur les conducteurs en équilibre électrostatique n'est exigible. La modification de la permittivité introduite par la présence d'un isolant est affirmée sans relation avec une description microscopique de la polarisation.

Approche expérimentale de l'influence électrostatique.

On décrit qualitativement le phénomène d'influence électrostatique.

Condensateur plan. Capacité d'un condensateur plan idéal.

On établit l'expression du champ d'un condensateur plan en négligeant les effets de bord et on déduit l'expression de la capacité.

Rôle des isolants.

On affirme la modification de la permittivité par la présence d'un isolant sans relation avec une description microscopique de la polarisation.

Énergie d'un condensateur. Densité volumique d'énergie électrique.

On établit l'expression de la densité volumique d'énergie électrique dans le cas du condensateur plan à partir de celle de l'énergie du condensateur $E = \frac{1}{2}CU^2$.

3.3 Équations de MAXWELL

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'évoquer le lien avec l'induction électromagnétique étudiée dans la suite.

Équations de MAXWELL dans le vide.

On se limite au cas où le référentiel est considéré galiléen et on insiste sur le contenu physique de ces équations.

Relations entre les composantes du champ électromagnétique de part et d'autre d'une interface.

On souligne que les relations de passage se substituent aux équations de MAXWELL dans le cas d'une modélisation surfacique ; on fait le lien avec les discontinuités rencontrées sur des exemples vus en PCSI.

Puissance volumique cédée par le champ électromagnétique à la matière. Expression de la densité volumique d'énergie électromagnétique.

L'expression de la densité d'énergie électromagnétique peut être affirmée sur les exemples du condensateur plan et d'un solénoïde infini.

Vecteur de POYNTING. Équation locale de conservation de l'énergie électromagnétique (identité de POYNTING). Forme intégrale de la conservation de l'énergie électromagnétique.

On affirme la signification physique du vecteur de POYNTING.

On interprète l'équation locale de POYNTING comme un bilan d'énergie électromagnétique.

Sur l'exemple d'un conducteur cylindrique parcouru uniformément par un courant parallèle à son axe, on montre que la puissance fournie par le champ électromagnétique à un conducteur oh-

Cas de l'approximation des régimes quasi-permanents (ARQP) ou quasi-stationnaires (ARQS). Limite de validité. Équations de MAXWELL dans le cadre de l'ARQP.

Cas du régime stationnaire.

Équation de POISSON pour le potentiel électrostatique.

Propriétés topographiques

Application à l'étude de l'effet de peau dans un conducteur ohmique ; puissance volumique cédée par le champ.

Modèle limite du conducteur parfait.

mique, est intégralement dissipée par effet JOULE.

On exploite le caractère conservatif du flux du vecteur 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.

On se limite à écrire les équations de MAXWELL en régime stationnaire et à en déduire les résultats établis en première année.

On établit l'équation de POISSON reliant le potentiel électrostatique à la densité volumique de charge électrique.

On complète les propriétés topographiques vues en première année en associant l'évasement des tubes de champ à l'évolution de la norme du champ électrique en dehors des sources.

On représente les lignes de champ connaissant les surfaces équipotentielles et inversement.

On évalue la valeur d'un champ électrique à partir d'un réseau de surfaces équipotentielles.

On définit le modèle limite du conducteur parfait et on dégage un critère de validité de ce modèle mettant en jeu l'épaisseur de peau.

3.4 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.

Action d'un champ magnétique extérieur sur une distribution volumique de courant : résultante et moment résultant des forces de LAPLACE. Cas d'un circuit filiforme fermé.

Puissance des forces de LAPLACE.

Résultante et puissance des forces de LAPLACE s'exerçant sur une barre conductrice en translation rectiligne sur deux rails parallèles (rails de LAPLACE) dans un champ magnétique extérieur uniforme, stationnaire et orthogonal aux rails.

Couple et puissance des actions mécaniques de LAPLACE dans le cas d'une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.

Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.

On différencie le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme.

La notion de flux coupé ainsi que le théorème de MAXWELL ne sont pas au programme.

On établit l'expression de la résultante et on évalue la puissance des forces de LAPLACE.

On établit l'expression du couple et on évalue la puissance des forces de LAPLACE.

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.

3.5 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 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.

Flux d'un champ magnétique

Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour (courbe fermée) orienté.

Lois d'induction électromagnétique

Conservation du flux magnétique

Loi de FARADAY

Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit. Force électromotrice induite, loi de FARADAY :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

On réalise des expériences de cours pour illustrer les lois de l'induction.

On présente les causes de la variation de flux magnétique. On précise les conventions d'algèbre du flux magnétique, de la f.é.m. induite et du courant induit.

On évite les situations où la loi de FARADAY n'est pas applicable.

Loi de modération de LENZ

On réalise des expériences de cours pour illustrer la loi de LENZ.

On utilise la loi de LENZ pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.

On précise la signification physique du signe (-) dans la loi de FARADAY.

Auto-induction

flux propre et inductance propre. Inductance mutuelle entre deux bobines.

Circuits électriques à une maille, couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.

Bilan énergétique de l'établissement du courant dans un ensemble de deux circuits filiformes fermés indéformables et fixes : énergie magnétique. Densité volumique d'énergie magnétique.

Couplage partiel, couplage parfait.

Le théorème de NEUMANN ($M_{12} = M_{21}$) est simplement affirmé.

On détermine l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en "influence totale".

On exprime l'énergie magnétique en fonction des coefficients d'inductance et des intensités.

On vérifie sur l'exemple du solénoïde long la cohérence de cette expression de l'énergie magnétique avec celle qui a été obtenue à partir des équations

de MAXWELL.

On établit l'expression de la densité volumique d'énergie magnétique dans le cas d'une bobine dont on néglige les effets de bord à partir de la relation $E = \frac{1}{2}LI^2$.

On établit la relation $M \leq \sqrt{L_1 L_2}$ dans le cas de deux bobines couplées et on affirme le résultat pour deux circuits quelconques en interaction mutuelle.

Applications

- ◆ Rails de LAPLACE dans un champ magnétique extérieur uniforme, stationnaire et orthogonal aux rails.
- ◆ Spire rectangulaire soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et en rotation uniforme autour d'un axe fixe orthogonal au champ magnétique.
- ◆ Freinage par induction.
- ◆ Courants de FOUCAULT.
- ◆ Moteur à courant continu à entrefer

On interprète qualitativement les phénomènes observés.

On écrit les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe.

On explique le principe du freinage par induction et on en donne des exemples d'utilisation.

On traite la distribution des courants de FOUCAULT dans le cas d'un conducteur cylindrique soumis à un champ magnétique parallèle à son axe, uniforme et oscillant. On exprime la puissance dissipée par effet JOULE en négligeant le champ propre et on explique le rôle du feuilletage.

On analyse le fonctionnement du moteur à courant continu à entrefer plan en s'appuyant sur la configuration des rails de LAPLACE. On indique que ce dispositif est utilisé dans certaines applications telles que les vélos électriques, les ordinateurs ou pour actionner les pompes à sang en médecine.

3.6 Milieux ferromagnétiques

L'objectif de cette partie est d'introduire les concepts nécessaires aux cours de la conversion électromagnétique statique. Elle conduit à une réécriture de l'équation de MAXWELL-AMPERE, plus adaptée à l'étude des milieux magnétiques.

L'électrostatique des milieux diélectriques étant hors programme, aucun calcul des champs $\vec{B}$ et $\vec{H}$ n'est demandé.

Aimant permanent, champ magnétique créé dans son environnement.

On se base sur la formule exprimant le champ d'un dipôle magnétique pour décrire le champ créé par un aimant à grande distance et on représente qualitativement les lignes de champ magnétique.

Actions subies par un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur.

On utilise les expressions de l'énergie potentielle, de la résultante et du moment fournies, pour décrire qualitativement l'évolution d'un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur.

Magnéton de BOHR.

On établit l'expression du magnéton de BOHR dans le cadre du modèle de BOHR.

Vecteur aimantation $\vec{M}$; notions élémentaires sur les courants d'aimantation; vecteur excitation magnétique $\vec{H}$.

On associe à une distribution d'aimantation une densité volumique de courants liés équivalente, l'expression étant admise.

Équation de MAXWELL-AMPERE écrite avec le vecteur excitation magnétique.

On interprète qualitativement que les sources de l'excitation magnétique sont les courants élec-

Vecteur aimantation dans un milieu LHI.
 Expression de la perméabilité magnétique relative d'un milieu LHI.
 Exemples de milieux LHI.
 Milieu ferromagnétique.
 Milieu ferromagnétique doux.
 Perméabilité magnétique relative.
 Modélisation d'un milieu doux par une relation constitutive linéaire.

Circuit magnétique avec ou sans entrefer. Champ magnétique produit dans l'entrefer d'un électroaimant.

Électroaimant.

Inductance propre d'une bobine à noyau de fer doux modélisé linéairement.
 Pertes d'une bobine réelle à noyau : pertes fer par courants de FOUCAULT et par hystérésis, pertes cuivre.

triques libres, et que celles de champ magnétique sont les courants électriques libres et l'aimantation.

On donne l'allure des cycles d'hystérésis (excitation magnétique, aimantation) et (excitation magnétique, champ magnétique) d'un milieu ferromagnétique.

On distingue milieu dur et milieu doux.

On cite des exemples de matériaux.

On donne l'ordre de grandeur de la perméabilité magnétique relative.

On donne l'allure des lignes de champ dans un circuit magnétique en admettant que les lignes de champ sortent orthogonalement à l'interface dans un entrefer.

On exprime le champ magnétique produit dans l'entrefer d'un électroaimant.

On établit l'expression de l'inductance de la bobine à noyau et on l'utilise pour vérifier l'expression de l'énergie magnétique emmagasinée

$$E_{magn} = \iiint \frac{1}{2\mu_0\mu_r} B^2 d\tau$$

On exprime le lien entre l'aire du cycle d'hystérésis et la puissance moyenne absorbée.

4 Conversion de puissance

L'enseignement de cette partie fait appel à une approche synthétique de phénomènes d'électromagnétisme et d'électronique concernant la transmission de puissance. L'objectif est de faire comprendre les concepts physiques mis en oeuvre dans ces phénomènes. Il s'agit donc d'un enseignement général portant sur des connaissances bien délimitées. Toute spécification technique est exclue et strictement hors programme. En particulier les courants triphasés et la notion de puissance réactive ne sont pas au programme. On souligne le rôle essentiel du fer et de l'aimantation du milieu dans le calcul des actions. De même, on insiste sur la nécessité d'une forte perméabilité du noyau d'un transformateur pour expliquer les relations entre les courants ou les tensions mis en jeu.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- ◆ réaliser des bilans d'énergie ;
- ◆ appliquer l'électromagnétisme à des problématiques industrielles ;
- ◆ élaborer des modèles, analyser des limitations et des défauts ;
- ◆ associer divers éléments (sources, convertisseurs) afin de concevoir une chaîne énergétique complète.

4.1 Conversion électromagnétique statique

Couplage parfait de deux bobines à l'aide d'un circuit ferromagnétique torique. Fonctionnement linéaire et sans fuites. Flux magnétique commun.

Application au modèle de transformateur parfait : rapports de transformations en tension et en intensité. Transfert d'impédance.

Les pertes et les défauts sont évoqués mais ne sont pas modélisés. En particulier, l'inductance magnétisante est hors programme.

On établit les lois de transformation des tensions et des courants du transformateur parfait, en respectant l'algébrisation associée aux bornes homologues.

On explique l'intérêt du transport de l'énergie électrique à haute tension afin de réduire les pertes en ligne. On signale l'avantage d'un facteur de puissance élevé.

On décrit des solutions permettant de réduire les pertes fer.

On explique le rôle du transformateur d'isolement.

4.2 Conversion électromécanique

Contacteur électromagnétique en translation

Énergie et force électromagnétique d'un enroulement enlaçant un circuit magnétique présentant un entrefer variable. Fonctionnement d'un contacteur électromagnétique.

La notion de coénergie est hors programme.

On admet l'expression $F = \left(\partial E / \partial x \right)_i$ de la force électromagnétique calculée à partir de l'énergie magnétique.

Pour expliquer son fonctionnement, on assimile le contacteur électromagnétique à un relai.

Machine synchrone

Structure d'un moteur synchrone diphasé et bipolaire.

Champ magnétique dans l'entrefer.

Champ glissant statorique.

Champ glissant rotorique.

Énergie et couple.

Condition de synchronisme.

Stabilité du système.

On décrit qualitativement le principe de l'autopilotage.

Modèle électrique de l'induit.

Bilan énergétique.

Réversibilité d'une machine synchrone.

On se limite au cas du moteur à pôles lisses et à excitation séparée.

On se place dans le cas d'une machine de perméabilité infinie à entrefer constant. On explique qualitativement que, dans l'entrefer, on peut obtenir un champ magnétique à dépendance angulaire sinusoïdale par association de plusieurs spires décalées. On justifie l'existence d'un champ glissant statorique par le fait que les deux phases sont alimentées en quadrature, puis on montre que le champ glissant rotorique est lié à la rotation de l'inducteur. On exprime l'énergie magnétique emmagasinée en fonction de la position angulaire du rotor.

L'expression $\Gamma = \left(\partial E / \partial \theta \right)_i$ du moment électromagnétique est admise.

On signale la particularité du démarrage et du contrôle de la vitesse d'un moteur synchrone.

On décrit qualitativement le principe de l'autopilotage.

Les expressions des coefficients d'inductance sont admises. En tenant compte uniquement des pertes cuivre, on justifie l'égalité entre la puissance électrique absorbée par les f.c.é.m. et la puissance mécanique fournie. On donne la représentation de

Machine à courant continu

Structure d'un moteur à courant continu bipolaire à excitation séparée.

Collecteur.

Couple $\Gamma = \Phi i$ et f.c.é.m. $e = \Phi \Omega$.

Équations électrique et mécanique.

Caractéristique (Ω, Γ) .

Réversibilité d'une machine à courant continu.

FRESNEL associées.

On cite quelques exemples d'application des machines synchrones.

On se limite au moteur à courant continu à pôles lisses.

On fait l'analogie avec le moteur synchrone pour expliquer que le collecteur assure le synchronisme entre le champ statorique stationnaire et le champ rotorique quelle que soit la position angulaire du rotor.

On se limite à moteur à courant continu à pôles lisses.

On fait l'analogie avec le moteur synchrone pour expliquer que le collecteur assure le synchronisme entre le champ statorique stationnaire et le champ rotorique quelle que soit la position angulaire du rotor.

L'expression du couple $\Gamma = \Phi i$ est admise.

On analyse le démarrage d'un moteur entraînant une charge mécanique exerçant un moment de la forme $\Gamma = -f\Omega$.

On donne quelques exemples d'application de machines à courant continu.

4.3 Conversion électronique

Formes continue et alternative de la puissance électrique.

Transfert de puissance entre une source et une charge : rendement.

Ordre de grandeur des puissances mises en jeu. Nécessité de la commutation et d'éléments de réserve d'énergie : interrupteurs, inductances et capacités.

Interrupteurs idéaux. Fonctions de commutation : fonction diode à commutation spontanée à l'amorçage et au blocage, fonction transistor à commutation commandée à l'amorçage et au blocage.

Modélisation des générateurs et récepteurs par des sources de courant ou de tension. Sources parfaites, puissance échangée.

On cite des exemples illustrant la nécessité d'une conversion de puissance électrique.

On rappelle la continuité de l'énergie et ses conséquences sur la continuité du flux magnétique et de la charge électrique.

On ne considère que des interrupteurs idéaux : courant nul dans l'interrupteur bloqué (ouvert), tension nulle aux bornes de l'interrupteur amorcé (fermé). L'étude des limites du modèle idéal et des pertes de puissance n'est pas au programme.

Les diodes et les transistors ne seront considérés que sous leurs aspects fonctionnels de commutation.

Toute considération technologique est hors programme.

La conversion entre sources non parfaites ainsi que la décomposition de FOURIER de la puissance sont exclues du programme. On signale l'intérêt de condensateurs ou de bobines pour parfaire une source.

On caractérise les sources par leur réversibilité en tension, en intensité, en puissance et on cite des exemples.

Transfert de puissance entre un générateur et un récepteur : règle d'association.

Hacheur.

Application au transfert de puissance entre un générateur de tension continue et un récepteur de courant continu par une cellule à deux interrupteurs : Chronogrammes. Valeurs moyennes des signaux

On explique le fonctionnement d'une cellule élémentaire à deux interrupteurs assurant le transfert d'énergie entre une source de tension et une source de courant.

La connaissance des circuits de commande est hors programme.

On traite l'ondulation en intensité dans l'approximation d'un hachage haute fréquence réalisant une intensité affine par morceaux.

On illustre l'intérêt de cette conversion pour assurer la variation de vitesse d'une machine à courant continu.

On décrit les différentes séquences de commutation des diodes pour un générateur de tension sinusoïdal alimentant une charge assimilable à une source continue de courant.

On décrit la structure en pont à quatre interrupteurs et les séquences de commutation pour une fréquence de commutation fixe.

On étudie, pour un générateur de tension continue et une charge (R, L), la réalisation d'une intensité quasi sinusoïdale par modulation de largeur d'impulsion.

Redressement double alternance réalisé avec un pont de diodes.

Onduleur.

5 Physique des ondes

L'enseignement de cette partie est basé sur une approche synthétique : les concepts sont introduits sur un exemple et utilisés ensuite dans d'autres cas.

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 ;
- ◆ dégager les similitudes de comportement entre systèmes analogues par une mise en équation pertinente utilisant variables réduites et paramètres caractéristiques adimensionnés.

5.1 Phénomènes de propagation unidimensionnels non dispersifs

Ondes transversales sur une corde vibrante. Équation d'onde.

Solutions de l'équation de d'ALEMBERT sous forme d'onde plane progressive.

Cas particulier de l'onde plane progressive harmonique : déphasage, double périodicité spatiale et temporelle. Vecteur d'onde.

On se limite aux petits mouvements d'une corde sans raideur dans un plan fixe.

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. On fait apparaître le rôle simplificateur de la nota-

Interférences entre deux ondes mécaniques de même fréquence.

Ondes stationnaires.

Oscillations libres d'une corde fixée à ses extrémités : modes propres. Oscillations forcées d'une corde fixée à une extrémité (corde de MELDE) : ondes stationnaires, résonance.

Ondes de tension et de courant dans un câble coaxial sans pertes. Impédance caractéristique.

Réflexion en amplitude sur une impédance terminale.

tion complexe pour les ondes progressives harmoniques.

On utilise la représentation de FRESNEL pour déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage.

On exprime les conditions d'interférences constructives ou destructives et on détermine l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage.

On introduit la méthode de séparation des variables.

On détermine les positions relatives des ventres et des nœuds de vibrations.

On montre qu'on peut décomposer une onde stationnaire en ondes progressives et vice-versa.

On établit les équations de propagation dans le câble coaxial modélisé comme un milieu continu, caractérisé par une inductance linéique et une capacité linéique.

On étudie la réflexion en amplitude de tension pour une impédance terminale nulle, infinie ou résistive.

5.2 Ondes sonores dans les fluides

Mise en équation des ondes acoustiques dans l'approximation acoustique, équation de d'ALEMBERT, célérité, caractère longitudinal.

Ondes planes progressives.

Domaine fréquentiel des ondes sonores.

On s'appuie sur les notions introduites pour les phénomènes unidimensionnels, tout en soulignant les apports nouveaux liés au caractère tridimensionnel.

On justifie les hypothèses de l'approximation acoustique par des ordres de grandeur.

On adopte la description eulérienne en liaison avec le cours de mécanique des fluides. On suppose l'écoulement parfait.

On exprime la célérité en fonction de la température pour un gaz parfait. On donne les ordres de grandeur de la célérité pour l'air et pour l'eau.

Structure d'ondes planes progressives harmoniques, impédance acoustique.

On définit l'impédance acoustique comme le rapport de la surpression sur la vitesse. Aucune autre définition de l'impédance acoustique ne peut être exigée.

Aspects énergétiques : densité volumique d'énergie sonore, vecteur densité de courant énergétique, bilan énergétique de la propagation d'une onde sonore. Intensité sonore. Niveau sonore.

Les expressions du vecteur densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde sont admises.

Réflexion, transmission d'une onde sonore plane progressive sur une interface plane, sous incidence normale. Conditions aux limites.

On donne quelques ordres de grandeur de niveaux d'intensité sonore.

Coefficients de réflexion et de transmission des vi-

tesses, des surpressions et des puissances sonores.
Adaptation des impédances.

Onde sonore sphérique harmonique divergente.

Effet DOPPLER pour les ondes sonores.

On relie l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance.

On signale l'utilisation des ondes ultra-sonores pour l'échographie médicale.

On commente l'expression de la surpression $p(r, t) \propto \frac{1}{r} \cos(\omega(t - r/c))$ générée par une sphère pulsante.

On présente le principe d'une détermination de vitesse par effet DOPPLER.

5.3 Ondes électromagnétiques dans le vide

Équations de propagation du champ électromagnétique dans une région sans charges ni courants. Onde plane. Structure de l'onde plane progressive. Cas particulier de l'onde monochromatique (harmonique ou sinusoïdale).

Domaines spectraux et applications des ondes électromagnétiques.

Relation entre le flux du vecteur de POYNTING et le flux de photons.

États de polarisation d'une onde plane progressive monochromatique.

Polarisation rectiligne d'une onde plane progressive monochromatique.

Loi de MALUS.

Réflexion d'une onde électromagnétique polarisée rectilignement sur un conducteur parfait, en incidence normale.

Pression de radiation.

On associe à chaque domaine du spectre des ondes électromagnétiques des applications.

On fournit la relation d'EINSTEIN-PLANCK et on l'utilise pour établir la correspondance entre le flux de photons et le flux du vecteur de POYNTING.

On donne quelques ordres de grandeur de flux énergétiques surfaciques moyens (laser hélium-néon, flux solaire).

Les polariseurs et les lames à retard sont introduits de façon simple en TP.

On exploite la continuité de la composante tangentielle du champ électrique pour justifier l'existence d'une onde réfléchie et calculer celle-ci.

On établit l'expression du champ électromagnétique de l'onde réfléchie et du vecteur densité de courant surfacique. On calcule le coefficient de réflexion en puissance.

On détermine la pression de radiation à l'aide de l'expression de la force de LAPLACE.

5.4 Phénomènes linéaires de propagation unidimensionnels dispersifs

Relation de dispersion, vitesse de phase, vitesse de groupe, dispersion, absorption.

Paquet d'ondes; vitesse de groupe. Domaine spectral d'un paquet d'onde de durée finie.

Propagation d'une onde plane transverse progressive harmonique dans un plasma.

Fréquence de coupure. Dispersion, vitesse de phase et vitesse de groupe. Conductivité imaginaire pure.

Interprétation énergétique.

Équation de propagation dans le plasma. Onde

Ces notions sont introduites sur un exemple de phénomène unidimensionnel linéaire.

On insiste sur l'intérêt de la décomposition en ondes planes proportionnelles à $\exp(i(\omega t - kx))$ avec réel et a priori complexe pour le traitement des phénomènes de propagation linéaires.

On considère un plasma comme un milieu dilué localement neutre, dont les charges sont sans interaction entre elles et où les ions sont immobiles. On décrit le modèle de la conduction électrique dans un plasma et on construit une conductivité complexe en justifiant les approximations.

plane progressive harmonique dans le plasma.
Onde évanescence dans le domaine réactif ; absence de propagation de l'énergie.

On associe le caractère imaginaire pur de la conductivité complexe à l'absence de puissance échangée entre le champ et les porteurs.

On relie la fréquence de coupure aux caractéristiques du plasma et on cite son ordre de grandeur dans le cas de l'ionosphère.

6 Optique

On se restreint au domaine d'approximation où une description par des ondes scalaires est suffisante. Le théorème de MALUS-DUPIN, outil nécessaire à l'étude de l'optique ondulatoire, est admis.

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. On évite les démonstrations mathématiques compliquées.

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 ;
- ♦ savoir utiliser simplement une lame à retard.

6.1 Interférences de deux ondes cohérentes

Modèle scalaire des ondes lumineuses. Chemin optique le long d'un rayon lumineux et retard de phase associé. Surfaces d'onde (ou équiphasés). Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de GAUSS. Théorème de MALUS-DUPIN. Récepteurs. Éclairement ou intensité lumineuse. Densité spectrale.

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.

On définit les surfaces d'ondes relatives à une source ponctuelle S par l'ensemble des points M tels que $(SM) = \text{constante}$. Le théorème de MALUS-DUPIN est admis.

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.

Superposition de deux ondes lumineuses. Cohérence mutuelle. Formule de FRESNEL :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi)$$

On compare les prévisions théoriques et les réalités expérimentales et on affirme les conditions d'interférence. La notion de train d'onde 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).

Application

trous d'YOUNG ponctuels dans un milieu non dispersif : source à distance finie et observation à grande distance finie et à l'infinie.
Perte de contraste par élargissement angulaire de la source.

Interférence en lumière blanche.

On justifie que les franges ne sont pas localisées.
On affirme et on utilise le critère semi-qualitatif de brouillage des franges $\Delta p \geq 1/2$ (où Δp est évalué sur la moitié de l'étendue de la source) pour interpréter des observations expérimentales.
L'étude de tout dispositif interférentiel autre que les trous d'YOUNG n'est pas exigible.
On interprète qualitativement la figure d'interférence en lumière blanche.

6.2 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.

Superposition de N ondes quasi monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique.
Relation fondamentale des réseaux.

Diffraction à l'infini

Minimum de déviation dans un ordre donné.

Dispersion par le réseau dans un ordre donné : spectre d'ordre p .
Pouvoir dispersif d'un réseau.

Pouvoir de résolution. Critère de RAYLEIGH.

On établit l'expression de la différence de marche entre deux motifs consécutifs.
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.
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.
Le calcul de l'intensité lumineuse est hors programme.
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).
On souligne qualitativement l'intérêt expérimental du minimum de déviation.
On interprète les positions des raies observées comme résultant d'une condition d'interférences constructives.
On définit le pouvoir dispersif d'un réseau en comparant différents réseaux.
On définit le pouvoir de résolution et on indique les facteurs qui le limitent :
♦ pouvoir séparateur du détecteur ;
♦ influence de la diffraction.

7 Thermodynamique

Le cours de thermodynamique en deuxième année PSI est consacré à la conduction (ou diffusion) thermique et à la diffusion de particules 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.

On souligne les analogies et les différences entre les différents phénomènes de transport abordés : diffusion thermique, diffusion de particules et conduction électrique.

L'étude de la conduction thermique contribue aussi à consolider la maîtrise d'outils mathématiques puissants (divergence, laplacien) dans un contexte concret.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- ◆ identifier la nature des transferts thermiques ;
- ◆ 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).

7.1 Conduction thermique

Le cours de conduction thermique permet un réinvestissement du cours de thermodynamique de PCSI et contribue à asseoir les compétences correspondantes.

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 modes de transfert thermique d'énergie :
conduction, convection et rayonnement.

Flux thermique.

Vecteur densité de flux thermique $\vec{j}_Q$.

Équilibre thermodynamique local.

Loi phénoménologique de FOURIER relative à la conduction thermique.

Bilan d'énergie thermique.

Équation de la diffusion thermique. Linéarité de l'équation de diffusion. Relation de l'équation de diffusion avec l'irréversibilité temporelle du phénomène.

On énonce l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local et on utilise les champs scalaires intensifs (volumiques ou massiques) associés à des grandeurs extensives de la thermodynamique.

On souligne l'analogie entre les lois phénoménologiques d'OHM et de FOURIER.

Toute modélisation microscopique de la loi de FOURIER est hors programme.

On donne des ordres de grandeur de la conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, verre, acier...

On établit, à l'aide du premier principe appliqué à un volume élémentaire l'équation de la diffusion thermique, avec ou sans terme source.

On donne le terme source local et intégral correspondant à l'effet JOULE.

Analyse dimensionnelle.

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 .

Conduction thermique en régime stationnaire, conductance et résistance thermiques. Associations de résistances thermiques en série ou en parallèle.

ARQS, analogie électrocinétique avec un circuit RC.

Ondes thermiques

Régime sinusoïdal forcé : onde plane de diffusion thermique. Relation de dispersion. Effet de peau thermique.

On se limite à des problèmes unidimensionnels en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique. On admet et on utilise une généralisation en géométrie quelconque en utilisant les opérateurs divergence et laplacien et leurs expressions fournies. Aucune méthode de résolution de cette équation ne peut être supposée connue.

On analyse l'équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.

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.

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.

On signale les analogies avec le calcul des conductances électriques et on énonce les conditions d'application de l'analogie. Seule la mémorisation de l'expression de la résistance thermique d'un barreau cylindrique calorifugé latéralement est exigible.

On met en évidence un temps caractéristique d'évolution de la température, on justifie l'ARQS et on établit l'analogie avec un circuit électrique RC.

On fait le lien avec l'étude générale des phénomènes de propagation dispersif.

On met en évidence le déphasage lié à la propagation et on établit une distance caractéristique d'atténuation.

7.2 Diffusion de particules

On traite cette partie par analogie avec le phénomène de transport de charge et de conduction thermique. On peut également utiliser la loi de FICK pour interpréter les paliers de diffusion en électrochimie

Les différents modes de transfert de masse : diffusion et convection.

Vecteur densité de courant de particules $\vec{j}_N$.

Bilan de particules. Loi phénoménologique de FICK. Équation de diffusion.

On précisera que la diffusion particulière traduit une situation d'un système hors-équilibre.

Toute modélisation microscopique de la loi de FICK est hors-programme.

Aucune méthode de résolution de l'équation de la diffusion ne peut être supposée connue.

ANNEXES

1 Liste de matériel

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

Le tableau ci-dessous donne le matériel nécessaire à la mise en oeuvre 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	■ goniomètre ; ■ viseur à frontale fixe ; ■ lunette auto-collimatrice ; ■ spectromètre à fibre optique ; ■ laser à gaz et diode laser ; ■ sources de lumière spectrales ; ■ source de lumière blanche à condenseur.
2. Électronique	■ oscilloscope numérique ; ■ carte d'acquisition et logiciel dédié ; ■ générateur de signaux électrique Basse Fréquence avec modulation interne en fréquence et sortie d'une tension image de la fréquence ; ■ alimentation stabilisée en tension ; ■ multimètre numérique ; ■ multiplieur analogique ; ■ microcontrôleur.
3. Ondes	■ émetteur et récepteur d'ondes électromagnétiques ■ câble coaxial ; ■ émetteur et récepteur acoustique (domaine audible et domaine ultrasonore).
4. Mécanique	■ stroboscope ; ■ appareil photo numérique ; ■ pendule simple et pendule pesant ; ■ chute libre.
5. Thermodynamique	■ capteur de pression ; ■ webcam avec logiciel dédié ; ■ caméra thermique ; ■ thermomètre ; ■ thermocouple ; ■ thermistance ; ■ capteur infra-rouge.

6. Électromagnétisme

- teslamètre ;
- balance de COTON.

2 Outils mathématiques pour la physique

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

Équations algébriques :

Systèmes linéaires de n équations à p inconnues.

Identifier les variables (inconnues) nécessaires à la modélisation du problème sous forme d'un système d'équations linéaires. On donne l'expression formelle des solutions dans le seul cas $n = p = 2$.

Équations non linéaires.

Représenter graphiquement une équation de la forme $f(x) = g(x)$ et on interprète graphiquement la ou les solutions.

Équations différentielles linéaires et non linéaires :

Équations différentielles linéaires à coefficients constants. Identifier l'ordre d'une équation différentielle. Forme canonique.

Mettre l'équation sous forme canonique.

Équations différentielles linéaires du premier ordre à coefficients constants :

$$y' + ay = f(x)$$

Équations différentielles linéaires du deuxième ordre à coefficients constants :

$$y'' + ay' + by = f(x)$$

Autres équations différentielles d'ordre 1 ou 2.

Exemples d'équations différentielles non linéaires

Identifier l'ordre d'une équation différentielle.

Mettre l'équation sous forme canonique.

Trouver la solution générale de l'équation sans second membre (équation homogène).

Trouver l'expression des solutions lorsque $f(x)$ est constante ou de la forme $A \cos(\omega t + \varphi)$ (en utilisant la notation complexe).

Utiliser l'équation caractéristique pour trouver la solution générale de l'équation sans second membre.

Prévoir le caractère borné ou non de ses solutions (critère de stabilité).

Trouver l'expression des solutions lorsque $f(x)$ est constante ou de la forme $A \exp(\lambda x)$ avec λ complexe. Trouver la solution de l'équation complète correspondant à des conditions initiales données. Représenter graphiquement cette solution.

Obtenir une intégrale première d'une équation de Newton $x'' = f(x)$ et l'exploiter graphiquement. Séparer les variables d'une équation du premier ordre à variables séparables.

Faire le lien entre les conditions initiales et le graphe de la solution correspondante.

Fonctions :

Fonctions usuelles.

Exponentielle, logarithme népérien et décimal, co-

Dérivée. Dérivée d'une fonction composée. Dérivée temporelle d'une fonction, notation dx/dt
 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 graphique.
 Primitive et intégrale. Valeur moyenne. Représentation graphique d'une fonction.

sinus, sinus, tangente, puissance réelle $(1+x)^\alpha$
 Utiliser la formule de TAYLOR à l'ordre un ou deux ; interpréter graphiquement.
 Connaître et utiliser les développements limités à l'ordre 1 des fonctions $(1+x)^\alpha$, $\ln(1+x)$; $\exp(x)$; et à l'ordre 2 des fonctions $\cos(x)$ et $\sin(x)$
 Interpréter l'intégrale comme une somme de contributions infinitésimales, en lien avec la méthode des rectangles en mathématiques.
 Exprimer la valeur moyenne sous forme d'une intégrale. Connaître la valeur moyenne sur une période des fonctions $\cos(x)$; $\sin(x)$; $\cos^2(x)$ et $\sin^2(x)$
 Déterminer un comportement asymptotique ; rechercher un extremum local.
 Utiliser des échelles logarithmiques ; identifier une loi de puissance à une droite en échelle log-log.

Équations aux dérivées partielles :

Exemples d'équations aux dérivées partielles : équation de Laplace, équation de diffusion, équation de d'ALEMBERT.

Identifier une équation aux dérivées partielles connue.
 Transposer une solution familière dans un domaine de la physique à un autre domaine.
 Obtenir des solutions de forme donnée par substitution.
 Utiliser des conditions initiales et des conditions aux limites.

Calcul différentiel :

Différentielle d'une fonction de plusieurs variables. Dérivée partielle. Théorème de SCHWARZ.

Savoir écrire l'expression de la différentielle en fonction des dérivées partielles. Identifier la valeur d'une dérivée partielle, l'expression de la différentielle étant donnée. Utiliser le théorème de SCHWARZ (admis).

Géométrie dans $\mathbb{R}^2$ et $\mathbb{R}^3$:

Vecteurs et système de coordonnées.
 Projection d'un vecteur et produit scalaire, interprétation géométrique.
 Produit vectoriel, interprétation géométrique.
 Produit mixte.
 Notions de dérivée temporelle d'un vecteur dans un référentiel donné.
 Transformations géométriques, symétries par rapport à un plan, translations et rotations de l'espace.
 Courbes planes.
 Courbes planes paramétrées.
 Longueurs, aires et volumes classiques.
 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.
 Interpréter géométriquement le produit scalaire et connaître son expression en fonction des coordonnées dans une base orthonormée.
 Utiliser la bilinéarité et le caractère symétrique du produit scalaire.
 Interpréter géométriquement le produit vectoriel et connaître son expression en fonction des coordonnées dans une base orthonormée directe.
 Utiliser la bilinéarité et le caractère antisymétrique du produit vectoriel.
 Faire le lien avec l'orientation des trièdres.
 Utiliser les symétries par rapport à un plan, les translations et les rotations de l'espace.
 Utiliser leur effet sur l'orientation de l'espace.
 Reconnaître l'équation cartésienne d'une droite, d'un cercle.

Utiliser la représentation polaire d'une courbe plane ; utiliser un grapheur pour obtenir son tracé. Identifier une ellipse à l'aide de sa représentation paramétrique $x = a \cos(\omega t)$, $y = b \cos(\omega t - \varphi)$ et la tracer dans les cas particuliers $\varphi = 0$, $\varphi = \pi/2$ et $\varphi = \pi$.

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.

Énoncer la définition du barycentre.

Utiliser son associativité.

Exploiter les symétries pour prévoir la position du barycentre d'un système homogène.

Trigonométrie :

Angle orienté, convention d'orientation des angles d'un plan (euclidien). Lecture des lignes trigonométriques dans un triangle rectangle, cas des petits angles.

Fonctions cosinus, sinus et tangente.

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.

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. Relier l'orientation d'un axe de rotation à l'orientation positive des angles d'un plan perpendiculaire à cet axe.

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 $\cos(\pi/2 - \pm x)$ parités, périodicité, valeurs des fonctions pour les angles usuels. Citer les formules d'addition et de duplication des cosinus et sinus ; utiliser un formulaire dans les autres cas.

Calculer et interpréter géométriquement la partie réelle, la partie imaginaire, le module et l'argument d'un nombre complexe.

Analyse vectorielle :

Gradient d'un champ scalaire, lien entre le gradient et la différentielle.

Divergence.

Rotationnel.

Laplacien d'un champ scalaire.

Laplacien d'un champ de vecteurs.

Champs proportionnels à $\exp[i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})]$ ou $\exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)]$.

On fait le lien entre le gradient et la différentielle. Citer l'expression de la différentielle en fonction des dérivées partielles.

Citer l'expression du gradient en coordonnées cartésiennes ; utiliser un formulaire fourni en coordonnées cylindriques ou sphériques.

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.

Énoncer et utiliser le théorème d'OSTROGRADSKI.

Exprimer la divergence en coordonnées cartésiennes.

Énoncer et utiliser le théorème de STOKES.

Exprimer le rotationnel en coordonnées cartésiennes.

Définir le laplacien à l'aide de la divergence et du gradient.

Exprimer le laplacien en coordonnées cartésiennes.

Exprimer le laplacien d'un champ de vecteurs en

coordonnées cartésiennes.

Utiliser la formule d'analyse vectorielle :

$$\vec{\text{rot}}(\vec{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{\text{grad}}(\text{div} \vec{A}) - \Delta \vec{A}$$

Exprimer l'action des opérateurs d'analyse vectorielle sur un tel champ à l'aide du vecteur $i \vec{k}$.

Analyse de FOURIER

Synthèse spectrale d'une fonction périodique. Synthèse spectrale d'une fonction non périodique.

Utiliser un développement en série de FOURIER fourni.

Utiliser un raisonnement par superposition.

Citer et utiliser la relation liant en ordre de grandeur la largeur spectrale Δf et la durée caractéristique Δt d'un signal non périodique.

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 la place nouvelle des sciences numériques dans la formation des scientifiques notamment dans le domaine de la simulation. Elles offrent aux élèves la possibilité d'effectuer une modélisation avancée du monde réel, par exemples par la prise en compte d'effets non linéaires ou le test d'une loi.

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...), 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 numériques exigibles

Outils numériques :

Représentation graphique d'un nuage de points.

Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque Matplotlib pour représenter un nuage de points.

Représentation graphique d'une fonction.

Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque Matplotlib pour tracer la courbe représentative d'une fonction.

Courbes planes paramétrées.

Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque Matplotlib pour tracer une courbe plane paramétrée.

Équations algébriques :

Résolution d'une équation algébrique ou d'une équation transcendante : méthode dichotomique.

Déterminer, en s'appuyant sur une représentation graphique, un intervalle adapté à la recherche nu-

mérique d'une racine par une méthode dichotomique.

Mettre en oeuvre une méthode dichotomique afin de résoudre une équation avec une précision donnée. Utiliser la fonction `bisect` de la bibliothèque `scipy.optimize` (sa spécification étant fournie).

Intégration - Dérivation :

Calcul approché d'une intégrale sur un segment par la méthode des rectangles.

Mettre en oeuvre la méthode des rectangles pour calculer une valeur approchée d'une intégrale sur un segment.

Calcul approché du nombre dérivé d'une fonction en un point.

Utiliser un schéma numérique pour déterminer une valeur approchée du nombre dérivé d'une fonction en un point.

Équations différentielles :

Équations différentielles d'ordre 1.

Mettre en oeuvre la méthode d'EULER explicite afin de résoudre une équation différentielle d'ordre 1.

Équations différentielles d'ordre supérieur ou égal à 2.

Transformer une équation différentielle d'ordre n en un système différentiel de n équations d'ordre 1.

Utiliser la fonction `odeint` de la bibliothèque `scipy.integrate` (sa spécification étant fournie).

Probabilités – statistiques :

Variable aléatoire.

Utiliser les fonctions de base des bibliothèques `random` et/ou `numpy` (leurs spécifications étant fournies) pour réaliser des tirages d'une variable aléatoire.

Utiliser la fonction `hist` de la bibliothèque `matplotlib.pyplot` (sa spécification étant fournie) pour représenter les résultats d'un ensemble de tirages d'une variable aléatoire. Déterminer la moyenne et l'écart-type d'un ensemble de tirages d'une variable aléatoire.

Régression linéaire.

Utiliser la fonction `polyfit` de la bibliothèque `numpy` (sa spécification étant fournie) pour exploiter des données. Utiliser la fonction `random.normal` de la bibliothèque `numpy` (sa spécification étant fournie) pour simuler un processus aléatoire.

Transformée de FOURIER discrète :

Calculer la transformée de FOURIER discrète d'un signal à valeurs réelles en utilisant la fonction `rfft` de la bibliothèque `numpy.fft` (sa spécification étant donnée).

Équation de diffusion à une dimension :

Mettre en oeuvre une méthode des différences finies explicite pour résoudre l'équation de diffusion à une dimension en régime variable.