



Programmes des classes préparatoires aux Grandes Ecoles

Filière : **scientifique**

Voie : **Technologie, physique, chimie (TPC)**

Discipline : **Physique**

Seconde année

Programme de physique de la voie TPC2

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Partie 1 - Démarche scientifique

1. Démarche expérimentale

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

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

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

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

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

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

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

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

Compétences spécifiques mobilisées lors des activités expérimentales

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

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

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

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

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

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

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

2. Résolution de problèmes

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

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

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

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

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

3. Approches documentaires

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

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

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

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

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

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

Partie 2 : Formation expérimentale

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

Les capacités rassemblées ici ne constituent en aucun cas une liste de travaux pratiques qui s'articuleraient autour d'une découverte du matériel, mais doivent au contraire faire l'objet d'un apprentissage progressif contextualisé où chaque élément apparaît naturellement à l'occasion d'un problème concret.

| Nature et méthodes | Capacités exigibles |
|--|---|
| 1. Mesures de longueurs et d'angles Caractéristiques spatiales d'un émetteur (ondes lumineuses, ondes acoustiques, ondes centimétriques...) | Construire l'indicatrice de rayonnement. Étudier la dépendance par rapport à la distance au récepteur. |
| 2. Mesures de temps et de fréquences Fréquence ou période : <ul style="list-style-type: none"> • Mesure indirecte : par comparaison avec une fréquence connue voisine, en utilisant une détection synchrone. Analyse spectrale. | Réaliser une détection synchrone élémentaire à l'aide d'un multiplieur et d'un passe-bas simple adapté à la mesure. Mettre en évidence le phénomène de repliement du spectre provoqué par l'échantillonnage avec un oscilloscope numérique ou une carte d'acquisition. Choisir les paramètres d'une acquisition numérique destinée à une analyse spectrale afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon, tout en optimisant la résolution spectrale. |
| 3. Électricité Élaborer un signal électrique analogique : <ul style="list-style-type: none"> • modulé en fréquence | Utiliser la fonction de commande externe de la fréquence d'un GBF par une tension (VCF). |
| 4. Optique Analyser une lumière complètement | Identifier de façon absolue l'axe d'un polariseur par une |

| | |
|---|---|
| <p>polarisée.</p> <p>Étudier la cohérence temporelle d'une source.</p> <p>Mesurer une faible différence de nombre d'onde : doublet spectral, modes d'une diode laser.</p> | <p>méthode mettant en œuvre la réflexion vitreuse</p> <p>Identifier les lignes neutres d'une lame quart d'onde ou demi-onde, sans distinction entre axe lent et rapide.</p> <p>Modifier la direction d'une polarisation rectiligne.</p> <p>Obtenir une polarisation circulaire à partir d'une polarisation rectiligne, sans prescription sur le sens de rotation.</p> <p>Mesurer un pouvoir rotatoire naturel.</p> <p>Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue par une démarche autonome non imposée.</p> <p>Obtenir une estimation semi-quantitative de la longueur de cohérence d'une radiation à l'aide d'un interféromètre de Michelson en lame d'air.</p> <p>Réaliser la mesure avec un interféromètre de Michelson.</p> |
| <p>5. Mécanique</p> <p>Mesurer un moment d'inertie.</p> <p>Mesurer un coefficient de tension superficielle.</p> | <p>Repérer la position d'un centre de masse et mesurer un moment d'inertie à partir d'une période et de l'application de la loi d'Huygens fournie.</p> |

Partie 3 : Formation disciplinaire

1. Optique

Présentation

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

L'analyse de Fourier joue un rôle important dans cette partie, d'une part dans le domaine temporel pour décomposer une onde réelle en ondes monochromatiques et d'autre part dans le

domaine spatial pour décomposer le coefficient de transmission d'une mire en un fond continu plus une somme de fonctions sinusoïdales. Comme dans l'ensemble du programme de TPC2 on se limite à une approche semi-quantitative. Il s'agit exclusivement :

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

Objectifs généraux de formation

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

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

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| 1. Modèle scalaire des ondes lumineuses | |
| <p>α) Modèle de propagation dans l'approximation de l'optique géométrique.</p> <p>Chemin optique. Déphasage dû à la propagation.</p> <p>Surfaces d'ondes. Loi de Malus.</p> <p>Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.</p> | <p>Associer la grandeur scalaire de l'optique à une composante d'un champ électrique.</p> <p>Exprimer le retard de phase en un point en fonction du retard de propagation ou du chemin optique.</p> <p>Utiliser l'égalité des chemins optiques sur les rayons d'un point objet à son image.</p> <p>Associer une description de la formation des images en termes de rayon lumineux et en termes de surfaces d'onde.</p> |
| <p>β) Modèle d'émission. Approche expérimentale de la longueur de cohérence temporelle. Relation entre le temps de cohérence et la largeur spectrale.</p> | <p>Classifier différentes sources lumineuses (lampe spectrale basse pression, laser, source de lumière blanche...) en fonction du temps de cohérence de leurs diverses radiations et connaître quelques ordres de grandeur des longueurs de cohérence temporelle associées. Utiliser la relation $\Delta f \cdot \Delta t \approx 1$ pour relier le temps de cohérence et la largeur spectrale $\Delta \lambda$ de la radiation considérée.</p> |

| | |
|--|--|
| <p>χ) Récepteurs. Intensité.</p> | <p>Relier l'intensité à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique.</p> <p>Citer le temps de réponse de l'œil.</p> <p>Choisir un récepteur en fonction de son temps de réponse et de sa sensibilité fournis.</p> |
|--|--|

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

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

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

| | |
|---|--|
| Observations en lumière blanche (blanc d'ordre supérieur, spectre cannelé). | la longueur de cohérence, $\Delta\lambda$ et λ en ordre de grandeur. Déterminer les longueurs d'ondes des cannelures. |
| Généralisation au montage de Fraunhofer : trous d'Young ; ensemble de N trous alignés équidistants. | Confronter ce modèle à l'étude expérimentale du réseau plan. |

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

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

La partie 5 est essentiellement expérimentale.

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

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

2. Thermodynamique

Présentation

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

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

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

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

Objectifs généraux de formation

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

- réaliser des bilans sous forme globale et locale ;
- manipuler des équations aux dérivées partielles (analyse en ordre de grandeur, conditions initiales, conditions aux limites) ;
- mettre en évidence l'analogie entre les différentes équations locales traduisant le bilan d'une grandeur scalaire extensive ;
- mettre en évidence un squelette algébrique commun à plusieurs phénomènes physiques ;
- utiliser les trois échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique ;
- distinguer une loi phénoménologique et une loi universelle.

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

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

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|--|---|
| 2.2 Diffusion thermique | |
| Vecteur densité de flux thermique \mathbf{j}_q | Exprimer le flux thermique à travers une surface en utilisant le vecteur \mathbf{j}_q . |
| Premier principe de la thermodynamique. | Utiliser le premier principe dans le cas d'un milieu solide pour établir une équation locale dans le cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne, éventuellement en présence de sources internes. Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence et son expression fournie. |
| Loi de Fourier. | Utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, béton, acier. |
| Régimes stationnaires. Résistance thermique. | Utiliser la conservation du flux sous forme locale ou globale en l'absence de source interne. Définir la |

| | |
|--|--|
| | <p>notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique.</p> <p>Exprimer une résistance thermique dans le cas d'un modèle unidimensionnel en géométrie cartésienne.</p> <p>Utiliser des associations de résistances thermiques.</p> |
| Équation de la diffusion thermique en l'absence de sources internes. | <p>Établir une équation de la diffusion dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne.</p> <p>Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur laplacien et son expression fournie.</p> <p>Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.</p> <p>Utiliser la relation de Newton $\delta Q = h(T_s - T_a) dS dt$ fournie comme condition aux limites à une interface solide-fluide.</p> |

3. Mécanique

Présentation

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

Objectifs généraux de formation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. Électromagnétisme

Présentation

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

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

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

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

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

Objectifs généraux de formation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Physique des ondes

Présentation

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

Objectifs généraux de formation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Appendice 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en appendice 1 du programme de physique de TPC1. Elle regroupe avec celle-ci le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice simplifiée fournie sous forme de version papier ou numérique. Une utilisation de matériel hors de ces listes lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une introduction guidée suffisamment détaillée.

1. Domaine optique

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

2. Domaine électrique

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

Appendice 2 : outils mathématiques

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

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

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

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

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

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

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

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

Appendice 3 : outils transversaux

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

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

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

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

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

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