



# Programmes des classes préparatoires aux Grandes Ecoles

Filière : **scientifique**

Voie : **Physique et chimie (PC)**

Discipline : **Physique**

**Seconde année**

# Programme de physique de la voie PC

Le programme de physique de la classe de PC s'inscrit dans la continuité du programme de PCSI. Il s'appuie sur des champs disciplinaires variés : optique interférentielle, phénomènes de transports, mécanique des fluides, électromagnétisme, propagation d'ondes ; en outre il propose des introductions à la physique des lasers et 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 PC, 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 PC. 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 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 PC inclut celui de la classe de PCSI, 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 PCSI, qui restent exigibles, et devront être régulièrement exercées durant la classe de PC. 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 PC. 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 PC. 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 est une science à la fois théorique et expérimentale. Ces deux parties de la démarche scientifique s'enrichissent mutuellement, leur intrication est un élément essentiel de notre enseignement.

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

- Le premier a trait à la formation expérimentale à laquelle l'intégralité de la deuxième partie est consacrée. Compte tenu de l'important volume horaire dédié aux travaux pratiques, ceux-ci doivent permettre l'acquisition de compétences spécifiques décrites dans cette partie, de capacités dans le domaine de la mesure (réalisation, évaluation de la précision, analyse du résultat...) et des techniques associées. Cette composante importante de la formation d'ingénieur ou de chercheur a vocation à être évaluée de manière appropriée dans l'esprit décrit dans cette partie.
- Le second concerne l'identification, tout au long du programme dans la troisième partie (contenus disciplinaires), de problématiques se prêtant particulièrement à une approche expérimentale. Ces items, **identifiés en gras**, doivent être abordés, au choix, à travers des expériences de cours exploitées de manière approfondie et collective, ou lors de séances de travaux pratiques où l'autonomie et l'initiative individuelle de l'étudiant sont davantage privilégiées.

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

- Les expériences de cours doivent susciter un questionnement actif et collectif autour d'une expérience bien choisie permettant de faire évoluer la réflexion théorique et la modélisation, d'aboutir à des lois simplificatrices et unificatrices, de dégager des concepts transversaux entre différents domaines de la physique.
- Les séances de travaux pratiques doivent permettre, dans une approche contextualisée, suscitée par une problématique clairement identifiée et, chaque fois que cela est possible, transversale, l'acquisition de savoir-faire techniques, de connaissances dans le domaine de la mesure et de l'évaluation de sa précision, d'autonomie dans la mise en œuvre

de protocoles simples associés à la mesure des grandeurs physiques les plus souvent mesurées.

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

### **Compétences spécifiques mobilisées lors des activités expérimentales**

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

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

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

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

	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ utiliser un vocabulaire scientifique adapté</li> <li>○ s'appuyer sur des schémas, des graphes</li> </ul>
<b>Être autonome, faire preuve d'initiative</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- faire preuve d'écoute, confronter son point de vue</li> <li>- travailler seul ou en équipe</li> <li>- solliciter une aide de manière pertinente</li> <li>- s'impliquer, prendre des décisions, anticiper</li> </ul>

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<sup>ème</sup> et XXI<sup>ème</sup> 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
<b>S'approprier</b>	- Dégager la problématique principale - Acquérir de nouvelles connaissances en autonomie - Identifier la complémentarité d'informations présentées sous des formes différentes (texte, graphe, tableau,...)
<b>Analyser</b>	- 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
<b>Réaliser</b>	- 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
<b>Valider</b>	- Faire preuve d'esprit critique - Confronter le contenu du document avec ses connaissances et savoir-faire - Repérer les points faibles d'une argumentation (contradiction, partialité, incomplétude, ...) - Estimer des ordres de grandeur et procéder à des tests de vraisemblance
<b>Communiquer</b> à l'écrit comme à l'oral	- 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 PC durant les séances de travaux pratiques. Elle vient prolonger la partie correspondante de PCSI dont les capacités doivent être complètement acquises à l'issue des deux années de préparation, et restent donc naturellement au programme de seconde année PC.

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
<b>1. Mesures de longueurs et d'angles</b> 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.
<b>2. Mesures de temps et de fréquences</b>  Fréquence ou période : <ul style="list-style-type: none"> <li>Mesure indirecte : par comparaison avec une fréquence connue voisine, en utilisant une détection</li> </ul>	Réaliser une détection « synchrone » élémentaire à l'aide d'un multiplieur et d'un passe-bas simple adapté à la mesure.





## Partie 3 : Formation disciplinaire

Dans cette partie du programme, il est parfois évoqué une approche descriptive de telle ou telle notion. Il s'agit là d'une introduction essentiellement qualitative de cette notion ou phénomène, dont l'évaluation ne peut conduire à des développements quantitatifs et calculatoires.

### 1. Optique

#### Présentation

Le programme de PC s'inscrit dans la continuité de la rubrique « signaux physiques » du programme de PCSI. Dans le bloc 1 on introduit les éléments spécifiques à l'émission, la propagation et la détection des ondes lumineuses. Puis les blocs 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 PC 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  $\Delta k_x$ ) et l'étendue caractéristique d'un signal non périodique ( $\Delta t$  ou  $\Delta x$ ).

#### 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).

Le bloc 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 « éclaircissement » 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
<b>1. Modèle scalaire des ondes lumineuses</b>	
<p>a) 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>b) Modèle d'émission. Approche expérimentale de la longueur de cohérence temporelle. Relation entre le temps de cohérence et la largeur spectrale.</p> <p>c) Récepteurs. Intensité.</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>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 <math>\Delta f \cdot \Delta t \approx 1</math> pour relier le temps de cohérence et la largeur spectrale <math>\Delta \lambda</math> de la radiation considérée.</p> <p>Relier l'intensité à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique.</p> <p>Citer le temps de réponse de l'œil. <b>Choisir un récepteur en fonction de son temps de réponse et de sa sensibilité fournis.</b></p>

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2. Superposition d'ondes lumineuses</b>	
<p>Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel <math>I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi</math>.</p>	<p>Établir la formule de Fresnel. Citer la formule de Fresnel et justifier son utilisation par la cohérence des deux ondes.</p>

Contraste.	Associer un bon contraste à des intensités $I_1$ et $I_2$ voisines.
Superposition de deux ondes incohérentes entre elles.	Justifier et utiliser l'additivité des intensités.
Superposition de N ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique dans le cas $N \gg 1$ .	Utiliser un grapheur pour discuter l'influence de N sur la finesse sans calculer explicitement l'intensité sous forme compacte. Utiliser la construction de Fresnel pour établir la condition d'interférences constructives et la demi-largeur $2\pi/N$ des franges brillantes.

Dans le bloc 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
<b>3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young</b>	
Trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source ponctuelle à grande distance finie et observation à grande distance finie. Champ d'interférences. Ordre d'interférences $p$ .	Savoir que les franges ne sont pas localisées. Définir, déterminer et utiliser l'ordre d'interférences.
Variations de $p$ avec la position du point d'observation ; franges d'interférences.	Interpréter la forme des franges observées sur un écran éloigné parallèle au plan contenant les trous d'Young.
<b>Comparaison entre deux dispositifs expérimentaux : trous d'Young et fentes d'Young.</b>	<b>Confronter les deux dispositifs : analogies et différences.</b>
Variation de $p$ par rajout d'une lame à faces parallèles sur un des trajets.	Interpréter la modification des franges
Variations de $p$ avec la position d'un point source ; perte de contraste par élargissement spatial de la source.	Utiliser le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $ \Delta p  > 1/2$ (où $ \Delta p $ est évalué sur la moitié de l'étendue spatiale de la source) pour interpréter des observations expérimentales.
Variations de $p$ avec la longueur d'onde. Perte de contraste par élargissement spectral de la source.	Utiliser le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $ \Delta p  > 1/2$ (où $ \Delta p $ est évalué sur la moitié de l'étendue spectrale de la source) pour interpréter des observations expérimentales. Relier la longueur de cohérence, $\Delta\lambda$ et $\lambda$ en ordre de grandeur.
Observations en lumière blanche (blanc d'ordre supérieur, spectre cannelé).	Déterminer les longueurs d'ondes des cannelures.
Généralisation au montage de Fraunhofer : trous d'Young ; ensemble de N trous alignés équidistants.	Confronter ce modèle à l'étude expérimentale du réseau plan.

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

Le bloc 5 est essentiellement expérimental.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5. Approche expérimentale : onde transmise par un objet diffractant plan éclairé par une onde plane sous incidence normale.</b>	
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.
<b>Mire unidimensionnelle d'extension latérale infinie de N traits parallèles équidistants. Fréquence spatiale.</b>	<b>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.</b>
<b>Fente rectiligne de coefficient de transmission uniforme.</b>	<b>Relier une fréquence spatiale du spectre de la fente à la position d'un point du plan de Fourier. Relier l'amplitude de l'onde en ce point à la composante du spectre de Fourier correspondant. Interpréter les observations dans le plan de Fourier.</b>

	Faire le lien avec la relation $\sin \theta = \lambda/a$ vue en première année.
<b>Filtrage optique</b>	<b>Utiliser l'analyse de Fourier pour interpréter les effets d'un filtrage de fréquences spatiales dans le plan de Fourier .</b>

## 2. Thermodynamique

### Présentation

Le programme de thermodynamique de PC s'inscrit dans le prolongement du programme de PCSI : 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. Par ailleurs on néglige le rayonnement thermique qui fait l'objet d'une approche documentaire.

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 PC permet une révision du cours de thermodynamique de PCSI 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 ;
- utiliser une description probabiliste d'un phénomène physique ;

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Systèmes ouverts en régime stationnaire</b>	
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
<b>2.1 Diffusion de particules</b>	
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.
Approche microscopique du phénomène de diffusion.	Mettre en place un modèle probabiliste discret à une dimension de la diffusion (marche au hasard) et évaluer le coefficient de diffusion associé en fonction du libre parcours moyen et de la vitesse quadratique moyenne.

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

	divergence et son expression fournie.
Loi de Fourier.	Utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, béton, acier.
Régimes stationnaires. Résistance thermique.	Utiliser la conservation du flux sous forme locale ou globale en l'absence de source interne. Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique. Exprimer une résistance thermique dans le cas d'un modèle unidimensionnel en géométrie cartésienne. Utiliser des associations de résistances thermiques.
Équation de la diffusion thermique en l'absence de sources internes.	Établir une équation de la diffusion dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur laplacien et son expression fournie. Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle. Utiliser la relation de Newton $\delta Q = h(T_s - T_a)dSdt$ fournie comme condition aux limites à une interface solide-fluide.
<b>2.3 Rayonnement thermique</b>	
Approche descriptive du rayonnement du corps noir : loi de Wien, loi de Stefan.	Utiliser les expressions fournies des lois de Wien et de Stefan pour expliquer qualitativement l'effet de serre.

### 3. Mécanique

#### Présentation

Le programme de mécanique de PC s'inscrit dans le prolongement des rubriques « mécanique » et « statique des fluides » du programme de PCSI : il est constitué de deux sous-parties, l'une consacrée aux changements de référentiels et l'autre à la mécanique des fluides.

#### Objectifs généraux de formation

L'étude des changements de référentiel en mécanique doit conduire les étudiants :

- à choisir de manière autonome un référentiel d'étude éventuellement non galiléen en pesant les avantages et les inconvénients de ce choix ;
- à discuter le caractère approximativement galiléen du référentiel géocentrique ou du référentiel terrestre selon le contexte ;
- à réfléchir sur les fondements de la cinématique classique en les confrontant aux éléments de cinématique relativiste du cours de terminale S.

L'enseignement de mécanique des fluides vise à développer les compétences suivantes :



- utiliser les échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique dans un même contexte ;
- utiliser un formalisme puissant tout en restant au contact permanent du concret à l'échelle humaine, favorisant ainsi les allers retours entre la théorie et l'expérience (confronter des observations et une ou plusieurs modélisations, etc...)
- former des nombres sans dimension pour déterminer les termes dominants et réduire la complexité des équations ;
- utiliser des modèles de complexité croissante (prise en compte ou non de la tension superficielle, de la viscosité, etc...) ;
- utiliser à bon escient des modèles d'écoulements (incompressible, irrotationnel, stationnaire).

Le bloc 1 concerne les changements de référentiel. Compte tenu de l'introduction en terminale S de notions sur la dilatation des durées, il importe dans la première sous-partie de mettre en évidence clairement les fondements de la cinématique classique qui pour être « intuitifs » n'en sont pas moins incompatibles avec la cinématique relativiste. La cinématique des changements de référentiels n'est pas étudiée pour elle-même mais en vue d'applications en dynamique du point ou des fluides. Pour l'étude du champ de pesanteur, on supposera le référentiel géocentrique galiléen, ce qui revient à omettre le terme de marées dont il sera question dans une approche documentaire. En outre, l'approche descriptive du rôle des roues dans la propulsion d'un véhicule tracté ou motorisé fait utiliser un changement de référentiel en mécanique du solide : on se limite au cas d'un véhicule en mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel galiléen, de telle sorte que les roues sont en rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel barycentrique galiléen.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1 Changements de référentiel en mécanique classique</b>	
Cas d'un référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un autre : transformation de Galilée, composition des vitesses.	Relier ces lois à la relation de Chasles et au caractère supposé absolu du temps.
Composition des vitesses et des accélérations dans le cas d'un référentiel en translation par rapport à un autre : point coïncident, vitesse d'entraînement, accélération d'entraînement.	Utiliser le point coïncident pour exprimer la vitesse d'entraînement et l'accélération d'entraînement.
Composition des vitesses et des accélérations dans le cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe : point coïncident, vitesse d'entraînement, accélération d'entraînement, accélération de Coriolis.	Utiliser le point coïncident pour exprimer la vitesse d'entraînement et l'accélération d'entraînement. Citer et utiliser l'expression de l'accélération de Coriolis.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.2 Dynamique dans un référentiel non galiléen</b>	
Cas d'un référentiel en translation par rapport à un référentiel galiléen : force d'inertie d'entraînement	Déterminer la force d'inertie d'entraînement. Appliquer la loi de la quantité de mouvement, la loi du moment cinétique et la loi de l'énergie cinétique dans un référentiel non galiléen.
Cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen : force d'inertie d'entraînement, force	Exprimer la force d'inertie axifuge et la force d'inertie de Coriolis. Associer la force d'inertie axifuge à l'expression familière

d'inertie de Coriolis.	« force centrifuge ». Appliquer la loi de la quantité de mouvement, la loi du moment cinétique et la loi de l'énergie cinétique dans un référentiel non galiléen.
Exemples :  - champ de pesanteur : définition, évolution qualitative avec la latitude, ordres de grandeur ;  - équilibre d'un fluide dans un référentiel non galiléen en translation ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.	Distinguer le champ de pesanteur et le champ gravitationnel.  Établir et utiliser l'expression de la force d'inertie d'entraînement volumique.  <b>Approche documentaire</b> : associer les marées à un terme gravitationnel différentiel et comparer l'influence de la Lune et du Soleil pour analyser des documents scientifiques.  <b>Approche documentaire</b> : utiliser l'expression de la force de Coriolis pour analyser des documents scientifiques portant sur les effets de la force de Coriolis sur les vents géostrophiques ou les courants marins.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3 Approche descriptive du fonctionnement d'un véhicule à roues.</b>	
Mouvement rectiligne uniforme d'un véhicule à roues dans un référentiel galiléen en l'absence de glissement : a) véhicule tracté par une force extérieure $F$ b) véhicule muni de roues motrices.	Exprimer la condition de non-glissement des roues.  Appliquer la loi de la quantité de mouvement et la loi de l'énergie cinétique au véhicule. Appliquer la loi du moment cinétique aux roues dans le référentiel du véhicule.  Expliquer qualitativement les rôles respectifs du moteur et des actions de contact exercées par la route selon qu'on envisage un bilan énergétique global ou un bilan de quantité de mouvement global.

La partie consacrée à la mécanique des fluides prolonge à la fois la rubrique « statique des fluides » et la rubrique « thermodynamique » de PCSI. Cet enseignement est conçu comme une initiation de telle sorte que de nombreux concepts (écoulement laminaire, écoulement turbulent, couche limite, vecteur tourbillon, nombre de Reynolds...) sont introduits de manière élémentaire. Toute extension du programme vers les cours spécialisés doit être évitée : par exemple l'approche lagrangienne, la fonction de courant, le potentiel complexe, l'étude locale du champ des vitesses, la relation de Bernoulli pour des écoulements compressibles ou instationnaires, le théorème de Reynolds et le théorème d'Euler sont hors-programme. Enfin la tension superficielle est abordée exclusivement d'un point de vue énergétique et expérimental.

L'apprentissage de la mécanique des fluides contribue à la maîtrise progressive des opérateurs d'analyse vectorielle qui sont utilisés par ailleurs en thermodynamique et en électromagnétisme. 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. Par ailleurs, la recherche de lignes de courants est traitée exclusivement à l'aide de logiciels d'intégration numérique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.1 Description d'un fluide en mouvement</b>	
Champ eulérien des vitesses. Lignes de champ. Tubes de champ.	Définir et utiliser l'approche eulérienne.
Écoulement stationnaire.	Savoir que le caractère stationnaire dépend du référentiel.
Dérivée particulaire de la masse volumique. Écoulement incompressible.	Établir l'expression de la dérivée particulaire de la masse volumique. Utiliser son expression pour caractériser un écoulement incompressible. Savoir que le caractère incompressible ne dépend pas du référentiel.
Équation locale de conservation de la masse.	Établir cette équation dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence et son expression fournie.
Caractérisation d'un écoulement incompressible par la divergence du champ des vitesses.	Utiliser $\text{div } \mathbf{v} = 0$ pour un écoulement incompressible.
Dérivée particulaire du vecteur-vitesse : terme local ; terme convectif.	Associer $d\mathbf{v}/dt$ à l'accélération de la particule de fluide qui passe en un point. Connaître et utiliser l'expression de l'accélération avec le terme convectif sous la forme $(\mathbf{v} \cdot \text{grad}) \mathbf{v}$ . Utiliser l'expression fournie de l'accélération convective en fonction de $\text{grad } (v^2/2)$ et $\text{rot } \mathbf{v} \times \mathbf{v}$ .
Vecteur tourbillon.	Illustrer sur des exemples simples la signification qualitative du vecteur tourbillon.
Écoulement irrotationnel défini par la nullité du rotationnel du champ des vitesses en tout point ; potentiel des vitesses.	Utiliser $\text{rot } \mathbf{v} = \mathbf{0}$ pour un écoulement irrotationnel et en déduire l'existence d'un potentiel des vitesses. Savoir que le caractère irrotationnel dépend du référentiel.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2.2 Actions de contact dans un fluide en mouvement</b>	
Forces de pression. Équivalent volumique.	Utiliser les relations $d\mathbf{F} = -pd\mathbf{S}$ et $d\mathbf{F} = -\text{grad}p \, d\tau$
Contraintes tangentielles dans un écoulement $\mathbf{v} = v_x(y) \mathbf{u}_x$ au sein d'un fluide newtonien ; viscosité.	Utiliser l'expression fournie $d\mathbf{F} = \eta \partial v_x / \partial y \, dS \mathbf{u}_x$
Équivalent volumique des forces de viscosité dans un écoulement incompressible.	Établir sur cet exemple l'expression $d\mathbf{F} = \eta \Delta \mathbf{v} \, d\tau$ . Utiliser sa généralisation admise pour un écoulement incompressible quelconque.

<b>Coefficient de tension superficielle.</b>	<b>Mesurer un coefficient de tension superficielle. Utiliser l'expression de l'énergie de tension superficielle pour interpréter un protocole expérimental.</b>
Traînée d'une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme dans un fluide newtonien : nombre de Reynolds ; coefficient de traînée $C_x$ ; graphe de $C_x$ en fonction du nombre de Reynolds ; notion d'écoulement laminaire et d'écoulement turbulent.	Évaluer un nombre de Reynolds pour choisir un modèle de traînée linéaire ou un modèle de traînée quadratique.

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<b>2.3 Équations dynamiques locales</b>	
Équation de Navier-Stokes dans un fluide newtonien en écoulement incompressible. Terme convectif. Terme diffusif. Nombre de Reynolds dans le cas d'une unique échelle spatiale.	Utiliser cette équation. Évaluer en ordre de grandeur le rapport du terme convectif sur le terme diffusif et le relier au nombre de Reynolds dans le cas d'une unique échelle spatiale.
Notion d'écoulement parfait et de couche limite.	Exploiter l'absence de forces de viscosité et le caractère isentropique de l'évolution des particules de fluide. Utiliser la condition aux limites sur la composante normale du champ des vitesses.
Équation d'Euler.	Utiliser cette équation.
Relation de Bernoulli pour un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et homogène dans le champ de pesanteur uniforme dans un référentiel galiléen.	Justifier et utiliser cette relation. Interpréter d'éventuels écarts observés en vérifiant les conditions de validité.

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<b>2.4 Bilans macroscopiques</b>	
Bilans de masse.	Établir un bilan de masse en raisonnant sur un système ouvert et fixe ou sur un système fermé et mobile. Utiliser un bilan de masse.
Bilans de quantité de mouvement ou d'énergie cinétique pour un écoulement stationnaire unidimensionnel à une entrée et une sortie.	Associer un système fermé à un système ouvert pour faire un bilan. Utiliser la loi de la quantité de mouvement et la loi de l'énergie cinétique pour exploiter un bilan. Exploiter la nullité (admise) de la puissance des forces intérieures dans un écoulement parfait et incompressible.

## 4. Électromagnétisme

### Présentation

L'électromagnétisme a été étudié en PCSI dans un domaine restreint (induction électromagnétique et forces de Laplace) et sans le support des équations locales. Le programme de PC 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 blocs. 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...)

Le bloc 1 étudie les sources du champ électromagnétiques 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, gravitation, mécanique des fluides.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Sources du champ électromagnétique</b>	
<b>1.1 Description microscopique et mésoscopique des sources</b>	
Densité volumique de charges. Charge traversant un élément de surface fixe et vecteur densité de courant. Intensité du courant.	Exprimer $\rho$ 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 $\mathbf{j}$ .
<b>1.2 Conservation de la charge</b>	
Équation locale de conservation de la charge.	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.
Conséquences en régime stationnaire.	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	
<p>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 <math>-m\mathbf{v}/\tau</math> Conductivité électrique. Résistance d'une portion de conducteur filiforme.</p> <p>Approche descriptive de l'effet Hall.</p> <p>Effet thermique du courant électrique : loi de Joule locale.</p>	<p>Déduire du modèle un ordre de grandeur de <math>\tau</math> et en déduire un critère de validité du modèle en régime variable. Déduire du modèle un ordre de grandeur de <math>v</math> et en déduire un critère pour savoir s'il convient de prendre en compte un éventuel champ magnétique.</p> <p>Interpréter qualitativement l'effet Hall dans une géométrie rectangulaire.</p> <p>Exprimer la puissance volumique dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique.</p>

Le bloc 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. Cette rubrique permet aussi d'introduire et d'exploiter des analogies avec le champ gravitationnel qui a été étudié en PCSI dans le seul cas d'astres ponctuels.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2. Electrostatique</b>	
<b>2.1 Champ électrostatique</b>	
<p>Loi de Coulomb. Champ et potentiel électrostatiques créés par une charge ponctuelle : relation <math>\mathbf{E} = -\text{grad } V</math>. Principe de superposition.</p> <p>Circulation conservative du champ électrique et signification physique : énergie potentielle d'une charge <math>q</math> dans un champ <math>\mathbf{E}</math>.</p> <p>Équation locale <math>\text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{0}</math>.</p> <p>Propriétés de symétrie.</p> <p>Théorème de Gauss et équation locale <math>\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0</math>.</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 <math>\mathbf{E}</math> au travail de la force <math>q\mathbf{E}</math>.</p> <p>Utiliser le théorème de Stokes. Associer les propriétés locales <math>\text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{0}</math> dans tout l'espace et <math>\mathbf{E} = -\text{grad } V</math>. Associer la relation <math>\mathbf{E} = -\text{grad } V</math> 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</p>

	<p>électrostatique ; repérer d'éventuelles sources du champ et leur signe. Associer l'évolution de la norme de <math>\mathbf{E}</math> à l'évasement des tubes de champ loin des sources. Dédurre les lignes équipotentielles d'une carte de champ électrostatique, et réciproquement. Évaluer le champ électrique à partir d'un réseau de lignes équipotentielles.</p>
<b>2.2 Exemples de champs électrostatiques</b>	
<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>Énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure.</p> <p>Approche descriptive des interactions ion-molécule et molécule-molécule.</p> <p>Dipôle induit. Polarisabilité.</p>	<p>Décrire les conditions de l'approximation dipolaire.</p> <p>Établir l'expression du potentiel <math>V</math>. 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 <math>E_p</math>, de la résultante <math>\mathbf{F}</math> et du moment <math>\mathbf{M}</math>.</p> <p>Prévoir qualitativement l'évolution d'un dipôle dans un champ d'origine extérieure <math>\mathbf{E}</math>.</p> <p>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 <math>1/r^3</math>.</p> <p>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.</p>
<p>Plan infini uniformément chargé en surface.</p> <p>Condensateur plan modélisé par deux plans parallèles portant des densités superficielles de charges opposées et uniformes. Capacité. Densité volumique d'énergie électrostatique.</p>	<p>Établir l'expression du champ créé.</p> <p>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.</p>
<p>Noyau atomique modélisé par une boule uniformément chargée : énergie de constitution de la distribution.</p>	<p>Exprimer l'énergie de constitution du noyau à un préfacteur numérique près par analyse dimensionnelle. Obtenir le préfacteur numérique en construisant le noyau par adjonction progressive de charges apportées de l'infini.</p>

	Relier les ordres de grandeur mis en jeu : rayons et énergies. Justifier la nécessité de l'interaction forte.
<b>2.3 Analogies avec le champ gravitationnel</b>	
Analogies formelles entre champ électrostatique et champ gravitationnel.	Mettre en évidence les analogies formelles entre les forces électrostatique et gravitationnelle pour en déduire l'analogie des propriétés des champs.

Le bloc 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 les forces de Lorentz étudiées en PCSI. Enfin la notion de potentiel-vecteur est hors-programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3. Magnétostatique</b>	
<b>3.1 Champ magnétostatique</b>	
Équations locales de la magnétostatique et formes intégrales : flux conservatif et théorème d'Ampère.	Choisir un contour, une surface et les orienter pour appliquer le théorème d'Ampère.
Linéarité des équations.	Utiliser une méthode de superposition.
Propriétés de symétrie.	Exploiter les propriétés de symétrie des sources (rotation, symétrie plane, conjugaison de charges) pour prévoir des propriétés du champ créé.
Propriétés topographiques.	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.
<b>3.2 Exemples de champs magnétostatiques</b>	
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 d'énergie magnétique.	Établir les expressions de l'inductance propre et de l'énergie d'une bobine modélisée par un solénoïde. Associer cette énergie à une densité d'énergie volumique.
<b>3.3 Dipôles magnétostatiques</b>	
Moment magnétique d'une boucle de courant plane.	Utiliser un modèle planétaire pour relier le moment magnétique d'un atome d'hydrogène à son moment cinétique.
Rapport gyromagnétique de l'électron. Magnéton de Bohr.	Construire en ordre de grandeur le magnéton de Bohr par analyse



<p>Ordre de grandeur de la force surfacique d'adhérence entre deux aimants permanents identiques en contact.</p>	<p>dimensionnelle. Interpréter sans calculs les sources microscopiques du champ magnétique. Évaluer l'ordre de grandeur maximal du moment magnétique volumique d'un aimant permanent.</p> <p>Obtenir l'expression de la force surfacique d'adhérence par analyse dimensionnelle.</p>
<p>Actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure : résultante et moment.</p> <p>Énergie potentielle d'un dipôle magnétique rigide placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.</p>	<p>Utiliser des expressions fournies.</p> <p><b>Approche documentaire</b> 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.</p>

Le bloc 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 ce bloc 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
<p><b>4. Équations de Maxwell</b></p>	
<p><b>4.1 Postulats de l'électromagnétisme</b></p>	
<p>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.</p> <p>Linéarité.</p>	<p>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 PCSI.</p> <p>Utiliser une méthode de superposition.</p>
<p><b>4.2 Aspects énergétiques</b></p>	
<p>Vecteur de Poynting. Densité volumique d'énergie électromagnétique. Équation locale de Poynting.</p>	<p>Utiliser les grandeurs énergétiques pour faire des bilans d'énergie électromagnétique. Associer le vecteur de Poynting et l'intensité utilisée en optique.</p>
<p><b>4.3 Validation de l'approximation des régimes quasi-stationnaires « magnétique »</b></p>	
<p>Équations de propagation des champs <b>E</b> et <b>B</b> dans le vide. Caractère non instantané des interactions électromagnétiques. Relation <math>\epsilon_0\mu_0c^2=1</math>.</p>	<p>Établir les équations de propagation. Interpréter c.</p>
<p>ARQS « magnétique ».</p>	<p>Discuter la légitimité du régime quasi-stationnaire.</p>

	<p>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.</p>
--	--

## 5. Physique des ondes

### Présentation

Le programme de physique des ondes de PC s'inscrit dans le prolongement de la partie « signaux physiques » du programme de PCSI 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, puis d'envisager des modèles de sources d'ondes rayonnées dans l'espace. 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 l'approche ondulatoire de la mécanique quantique et par une introduction à la physique du laser.

### 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) ;
- identifier les limites d'une approche classique particulière au niveau microscopique et la richesse prévisionnelle d'un modèle ondulatoire : confronter les effets quantiques et les prédictions classiques en s'appuyant, entre autres, sur des estimations numériques.

Le bloc 1 est consacré 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 ou sphérique une onde par référence à sa dépendance spatiale  $f(x,t)$  ou  $f(r,t)$ .

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de d'Alembert</b>	
<b>1.1. Ondes mécaniques unidimensionnelles dans les solides déformables</b>	
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.	Relier la raideur des ressorts fictifs à l'énergie de liaison et évaluer l'ordre de grandeur du module d'Young.
Ondes acoustiques longitudinales dans une tige solide dans l'approximation des milieux continus.	Établir l'équation d'onde en utilisant un système infinitésimal.
Équation de d'Alembert ; célérité.	Reconnaître une équation de d'Alembert. Associer qualitativement la célérité d'ondes mécaniques, la raideur et l'inertie du milieu support.
Exemples de solutions de l'équation de d'Alembert : <ul style="list-style-type: none"> <li>- ondes progressives harmoniques</li> <li>- ondes stationnaires harmoniques</li> </ul>	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 : <ul style="list-style-type: none"> <li>- régime libre : modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités</li> <li>- régime forcé : résonances sur la corde de Melde.</li> </ul>	Décrire les modes propres.  En négligeant l'amortissement, associer mode propre et résonance en régime forcé.
<b>1.2. Ondes acoustiques dans les fluides</b>	
Mise en équations eulérienne des ondes acoustiques dans le cadre de	Classifier les ondes acoustiques par domaines fréquentiels.

l'approximation acoustique. Équation de d'Alembert pour la surpression.	Valider l'approximation acoustique en manipulant des ordres de grandeur. Écrire le système des trois équations locales utiles. Linéariser les équations et établir l'équation de propagation de la surpression dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes. Utiliser sa généralisation admise en faisant appel à l'opérateur laplacien.
Structure des ondes planes progressives harmoniques : caractère longitudinal, impédance acoustique.	Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques. Utiliser la notion d'impédance acoustique.
Densité volumique d'énergie acoustique, vecteur densité de courant énergétique. Intensité acoustique.	Utiliser les expressions admises du vecteur-densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde. Utiliser la notion d'intensité acoustique en décibel et citer quelques ordres de grandeur.
Ondes acoustiques sphériques harmoniques.	Utiliser une expression fournie de la surpression pour interpréter par un argument énergétique la décroissance en $1/r$ de l'amplitude.
<b>Effet Doppler longitudinal</b>	<b>Décrire et mettre en œuvre un protocole de détection « synchrone » pour mesurer une vitesse par décalage Doppler</b>
<b>1.3. Ondes électromagnétiques dans le vide</b>	
Équations de propagation de <b>E</b> et <b>B</b> dans une région sans charge ni courant.  Structure d'une onde plane progressive harmonique.  Aspects énergétiques.  Polarisation des ondes électromagnétiques planes progressives harmoniques : polarisation elliptique, circulaire et rectiligne.  <b>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.</b>	Établir et citer les équations de propagation.  Établir et décrire la structure d'une OPPH. Utiliser le principe de superposition d'OPPH.  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.  Relier l'expression du champ électrique à l'état de polarisation d'une onde.  <b>Reconnaître une lumière non polarisée. Distinguer une lumière non polarisée d'une lumière totalement polarisée.</b>

Le bloc 2 est consacré 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 (bloc 2.1) puis sur des paquets d'ondes harmoniques planes (bloc 2.2). S'agissant des paquets d'ondes, on se limite au cas où l'étalement est négligeable. 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.

<b>2. Phénomènes de propagation linéaires</b>	
<b>2.1 Ondes électromagnétiques dans les plasmas et dans les métaux</b>	
<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 (<math>\omega &lt; \omega_p</math>) ; absence de propagation de l'énergie en moyenne temporelle.</p> <p>Cas particulier d'un conducteur ohmique de conductivité réelle : effet de peau.</p>	<p>Décrire le modèle. Construire une conductivité complexe en justifiant les approximations.</p> <p>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 <math>\underline{k}</math> aux phénomènes de dispersion et d'absorption.</p> <p>Reconnaître une onde évanescente (onde stationnaire atténuée).</p> <p>Repérer une analogie formelle avec les phénomènes de diffusion. Connaître l'ordre de grandeur de l'épaisseur de peau du cuivre à 50Hz.</p>
<b>2.2 Paquets d'ondes</b>	
Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu non absorbant et faiblement dispersif : vitesse de phase et vitesse de groupe.	Déterminer la vitesse de groupe à partir de la relation de dispersion. Associer la vitesse de groupe à la propagation de l'enveloppe du paquet d'ondes.

Le bloc 3 est consacré à la réflexion et la transmission d'ondes à une interface plane sous incidence normale en acoustique et en électromagnétisme. Dans ce dernier cas, on se limite ici aussi aux 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.

<b>3. Interfaces entre deux milieux</b>	
Réflexion, transmission d'une onde acoustique plane progressive sous incidence normale sur une interface plane infinie entre	<p>Expliciter des conditions aux limites à une interface.</p> <p>Établir les expressions des coefficients de</p>

deux fluides : coefficients de réflexion et de transmission en amplitude des vitesses, des surpressions et des puissances acoustiques surfaciques moyennes.	transmission et de réflexion. Associer l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance.
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. Cas d'une interface vide-plasma. Coefficients de réflexion et de transmission en puissance.  Cas d'une interface vide-conducteur ohmique de conductivité réelle constante.  Cas d'une interface vide-conducteur ohmique dans le domaine optique visible.  <b>Polarisation par réflexion vitreuse sous incidence oblique.</b>	Exploiter la continuité (admise) du champ électromagnétique dans cette configuration pour obtenir l'expression du coefficient de réflexion en fonction des indices complexes.  Distinguer les comportements dans le domaine de transparence et dans le domaine réactif du plasma.  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.  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.  <b>Identifier l'incidence de Brewster et utiliser cette configuration pour repérer la direction absolue d'un polariseur.</b>

Le bloc 4 est consacré à une introduction à la physique du laser. Après une approche descriptive des milieux amplificateurs de lumière (4.1), une description de l'oscillateur optique que constitue le laser est effectuée (4.2) à partir de la mise en œuvre expérimentale d'un oscillateur électronique : il s'agit ici de transférer les idées abordées sur l'exemple de l'oscillateur à pont de Wien à la modélisation de l'objet optique en identifiant les points clés de l'analogie. Le bloc 4.3 est une introduction descriptive simplifiée à l'optique des faisceaux spatialement limités, dont l'un des objectifs est de pouvoir déterminer la puissance surfacique disponible, à partir de la prévision des dimensions de la tache de section minimale dans des configurations optiques élémentaires. On se limite au mode fondamental gaussien.

<b>4. Introduction à la physique du laser</b>	
<b>4.1. Milieu amplificateur de lumière</b>	
Absorption, émission stimulée, émission spontanée.  Coefficients d'Einstein.  Amplificateur d'ondes lumineuses.	Distinguer les propriétés d'un photon émis par émission spontanée ou stimulée.  Associer l'émission spontanée à la durée de vie d'un niveau excité. Utiliser les coefficients d'Einstein dans le seul cas d'un système à deux niveaux non dégénérés.  Justifier la nécessité d'une inversion de population.
<b>4.2. Obtention d'un oscillateur</b>	
<b>Mise en œuvre électronique d'un oscillateur</b>	<b>Identifier l'étage d'amplification.</b>

<p><b>sur l'exemple de l'oscillateur à pont de Wien.</b></p> <p>Milieu amplificateur à l'intérieur d'un résonateur optique : le laser.</p>	<p>Exprimer la condition de bouclage sur un filtre sélectif.  <b>Mettre en évidence le rôle des non-linéarités.</b></p> <p>Exprimer la condition d'oscillation.</p> <p>Associer la puissance émise à la limitation du gain par une non-linéarité.</p>
<p><b>4.3. Propriétés optiques d'un faisceau spatialement limité</b></p>	
<p><b>Approche descriptive :</b></p> <p>Rôle de la diffraction dans l'ouverture angulaire du faisceau à grande distance.</p> <p>Description simplifiée d'un faisceau de profil gaussien : longueur de Rayleigh <math>L_R</math>.</p> <p>Utilisation d'une lentille pour transformer un faisceau cylindrique en faisceau conique et réciproquement</p>	<p>Relier l'ouverture angulaire <math>\lambda/a</math> et le rayon minimal <math>a</math>.</p> <p>Utiliser l'expression fournie du profil radial d'intensité en fonction de la distance axiale. Construire l'allure d'un faisceau de profil gaussien à partir de l'enveloppe d'un faisceau cylindrique de rayon <math>a</math> et d'un faisceau conique centré sur l'orifice de sortie du laser, et de demi-ouverture angulaire <math>\lambda/a</math>.</p> <p>Exploiter la convergence angulaire du faisceau issue de l'optique géométrique, la loi du retour inverse, et le lien entre l'ouverture angulaire <math>\lambda/a</math> et le rayon minimal <math>a</math> pour obtenir la dimension et la position de la section minimale.</p> <p>Montrer que le rayon minimal est de l'ordre de <math>\lambda</math>.</p> <p>Utiliser un élargisseur de faisceau pour réduire l'ouverture angulaire.</p>

Les blocs précédents ont permis d'introduire les outils et concepts de base associés à la physique des ondes, particulièrement tant qu'elle est régie par des équations d'onde linéaires. S'il est un domaine où cette notion de linéarité joue un rôle central, c'est bien celui de la mécanique quantique. Le bloc 5 présente quelques unes des notions associées à une description ondulatoire de ce domaine. La démarche adoptée, volontairement limitée, est centrée sur les conséquences approfondies des notions introduites en première année que sont la dualité onde-corpuscule et l'inégalité de Heisenberg spatiale, les objectifs étant désormais quantitatifs. Il s'agit, sur des systèmes unidimensionnels et des situations physiques simplifiées d'envisager quelques conséquences qui découlent de cette description ondulatoire : l'effet tunnel et ses applications sont ainsi discutés comme aboutissement naturel des notions abordées dans ce bloc. Cette partie est ancrée dans le réel : on insistera sur le fait que les situations envisagées décrivent des systèmes physiques réels effectivement unidimensionnels ; d'autre part l'étude documentaire de la microscopie à effet tunnel montre qu'on peut accéder effectivement à la mesure d'une fonction d'onde.

Toute discussion autour de la mesure et de ses effets sur un système est exclue, de même que toute introduction au spin. L'accent est mis avant tout sur la mise en équation des situations physiques proposées à l'aide des outils de la physique des ondes, et la discussion graphique des résultats qui en découlent. Tout développement des calculs intermédiaires est donc naturellement proscrit et les expressions sur lesquelles s'appuient les discussions qualitatives doivent être fournies.

Le courant de probabilité est introduit dans un contexte restreint avec pour seul objectif d'exprimer le coefficient de transmission d'une barrière de potentiel.

<p><b>5. Approche ondulatoire de la mécanique quantique</b></p>	
<p><b>5.1. Amplitude de probabilité</b></p>	
<p>Fonction d'onde <math>\psi(x,t)</math> associée à une particule dans un problème unidimensionnel. Densité linéique de probabilité.</p> <p>Principe de superposition. Interférences.</p>	<p>Normaliser une fonction d'onde. Faire le lien qualitatif avec la notion d'orbitale en chimie.</p> <p>Relier la superposition de fonctions d'ondes à la description d'une expérience d'interférences entre particules.</p>
<p><b>5.2. Équation de Schrödinger pour une particule libre</b></p>	
<p>Équation de Schrödinger.</p> <p>États stationnaires.</p> <p>Paquet d'ondes associé à une particule libre. Relation <math>\Delta k_x \Delta x \geq 1/2</math></p> <p>Courant de probabilité associé à une particule libre.</p>	<p>Utiliser l'équation de Schrödinger fournie.</p> <p>Identifier les états stationnaires aux états d'énergie fixée. Établir et utiliser la relation : <math>\psi(x,t) = \varphi(x) \exp(-iEt/\hbar)</math> 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.</p> <p>Utiliser l'équation de Schrödinger pour la partie spatiale <math>\varphi(x)</math>. En exploitant l'expression classique de l'énergie de la particule libre, associer la relation de dispersion obtenue et la relation de de Broglie.</p> <p>Identifier vitesse de groupe et vitesse de la particule. Faire le lien avec l'inégalité de Heisenberg spatiale.</p> <p>Utiliser l'expression admise <math>\mathbf{J} =  \psi ^2 \frac{\hbar \mathbf{k}}{m}</math> et l'interpréter comme produit densité*vitesse.</p>
<p><b>5.3. Équation de Schrödinger dans un potentiel <math>V(x)</math> uniforme par morceaux</b></p>	
<p>Quantification de l'énergie dans un puits de potentiel rectangulaire de profondeur infinie.</p> <p>Énergie de confinement quantique.</p>	<p>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.</p> <p>Associer le confinement d'une particule</p>



	quantique à une augmentation de l'énergie cinétique.
Quantification de l'énergie des états liés dans un puits de profondeur finie. Élargissement effectif du puits par les ondes évanescentes.	Mettre en place les éléments du modèle : forme des fonctions d'onde dans les différents domaines. Utiliser les conditions aux limites admises : continuité de $\varphi$ et $d\varphi/dx$ . Associer la quantification de l'énergie au caractère lié de la particule. Mener une discussion graphique.  Interpréter qualitativement, à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale, l'abaissement des niveaux d'énergie par rapport au puits de profondeur infinie.
<b>5.4. Effet tunnel</b>	
Notions sur l'effet tunnel.  Coefficient de transmission associé à une particule libre incidente sur une barrière de potentiel.	Associer l'existence d'une probabilité de traverser une barrière de potentiel et l'existence de deux ondes évanescentes dans la zone classiquement interdite.  Exprimer le coefficient de transmission comme un rapport de courants de probabilités.  <b>Approche documentaire de la radioactivité alpha:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- utiliser une expression fournie du coefficient de transmission pour analyser des documents scientifiques ;</li> <li>- expliquer le rôle de l'effet tunnel dans la radioactivité alpha.</li> </ul> <b>Approche documentaire de la microscopie à effet tunnel :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- utiliser une expression fournie du coefficient de transmission pour analyser des documents scientifiques ;</li> <li>- expliquer la sensibilité à la distance de cette méthode d'observation des surfaces.</li> </ul>
<b>Approche descriptive :</b> Double puits symétrique.  Étude des deux premiers états stationnaires : symétrique et antisymétrique.  Évolution temporelle d'une superposition de ces deux états.	Exploiter les diagrammes d'énergie et faire le lien avec la chimie.  Sur l'exemple de la molécule d'ammoniac, utiliser le principe de superposition pour relier la fréquence des oscillations d'une particule initialement confinée dans un des puits à la différence des énergies.

## Appendice 1 : matériel

Cette liste complète celle donnée en appendice 1 du programme de physique de PCSI. 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

### 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 PC sont d'une part ceux qui figurent dans l'appendice 2 du programme de PCSI 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 PCSI 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 PCSI en admettant la décomposition d'une fonction non périodique du temps en une somme continue de fonctions sinusoïdales. De même qu'en PCSI où le calcul des coefficients d'un développement en série de Fourier est exclu, on ne cherche pas en PC 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  $\Delta k_x$ ) et l'étendue caractéristique d'un signal non périodique ( $\Delta t$  ou  $\Delta x$ ).

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
<b>1. Calcul différentiel</b>	
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
<b>2. Analyse vectorielle</b>	
a) gradient	Relier le gradient à la différentielle d'un champ scalaire à $t$ fixé. Exprimer les

b) divergence	composantes du gradient en coordonnées cartésiennes. 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) opérateur <b>b.grad</b>	Exprimer la différentielle d'un champ de vecteurs à t fixé. Exprimer les composantes de <b>(b.grad)a</b> en coordonnées cartésiennes.
e) laplacien d'un champ scalaire	Définir $\Delta f = \text{div}(\text{grad } f)$ . Exprimer le laplacien en coordonnées cartésiennes.
f) laplacien d'un champ de vecteurs	Exprimer le laplacien d'un champ de vecteurs en coordonnées cartésiennes.
g) 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
<b>2. Analyse de Fourier</b>	
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 $\Delta k_x$ ) et l'étendue caractéristique d'un signal non périodique ( $\Delta t$ ou $\Delta x$ ).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3. Equations aux dérivées partielles</b>	
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
<b>1. Analyse de pertinence</b>	
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
<b>2. Calcul numérique</b>	
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
<b>3. Outils de communication</b>	
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
<b>4. Analyse dimensionnelle</b>	
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 $E=A^\alpha B^\beta C^\chi$ par analyse dimensionnelle.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5. Analyse d'ordre de grandeur</b>	
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.