



Classes préparatoires aux grandes écoles

Filière scientifique

Voie Technologie, physique et chimie (TPC)

Annexe 1

Programme de physique de 2nde année

Programme de physique — TPC2

Préambule

Objectifs de formation

Le programme de physique de la classe de TPC2 s'inscrit dans la continuité du programme de physique de la classe de TPC1 avec lequel il forme un ensemble cohérent et ambitieux de connaissances et capacités scientifiques qui préparent les étudiants à la poursuite d'études dans un cursus d'ingénieur, d'enseignant ou de chercheur. Il s'agit de consolider les compétences de chaque étudiant inhérentes à la pratique de la démarche scientifique : observer et s'approprier, analyser et modéliser, réaliser et valider, et enfin communiquer et valoriser ses résultats.

L'acquisition de ce socle de connaissances scientifiques par les étudiants constitue un objectif prioritaire pour le professeur. En tant que science expérimentale, la physique est une discipline qui développe la curiosité, la créativité et l'analyse critique. Il est donc naturel que l'expérience se situe au cœur de son enseignement, que ce soit en cours ou lors des séances de travaux pratiques. Les activités expérimentales habituent les étudiants à se confronter au réel, comme ils auront à le faire dans l'exercice de leur métier.

L'introduction de capacités numériques dans le programme prend en compte le caractère incontournable des sciences numériques dans la formation des scientifiques, notamment dans le domaine de la simulation, et vise également à développer chez les étudiants des compétences transférables dans d'autres champs que le seul champ disciplinaire de la physique.

La démarche de modélisation occupe également une place centrale dans le programme pour former les étudiants à établir, de manière autonome, un lien fait d'allers-retours entre le « monde » des objets, des expériences, des faits et celui des modèles, des concepts et des théories. Le professeur doit rechercher un point d'équilibre entre des approches complémentaires : conceptuelle et expérimentale, abstraite et concrète, théorique et appliquée, inductive et déductive, qualitative et quantitative.

La construction d'un modèle exige bien souvent une utilisation maîtrisée des mathématiques dont Galilée, fondateur de la physique expérimentale, soulignait déjà qu'elles sont le langage dans lequel est écrit le monde. De façon complémentaire, l'utilisation de l'outil numérique offre aujourd'hui aux étudiants la possibilité d'effectuer une modélisation plus poussée du monde réel que ne le permettent les outils mathématiques usuels.

Enfin, l'autonomie et la prise d'initiative sont spécifiquement développées à travers la pratique d'activités du type « résolution de problèmes » qui visent à exercer les étudiants à mobiliser des connaissances et des capacités pour répondre à un questionnement ou atteindre un but sans qu'aucune démarche de résolution ne soit fournie.

Organisation du programme

Le programme est globalement organisé en deux parties.

Dans la première partie, intitulée « **Formation expérimentale** », sont décrits les objectifs de formation sur le thème « Mesures et incertitudes » ainsi que les méthodes et les capacités expérimentales que les étudiants doivent maîtriser à la fin de la deuxième année de classe préparatoire TPC. Leur mise en œuvre s'appuie sur des problématiques concrètes qui mobilisent aussi les capacités expérimentales spécifiques, également exigibles, qui sont identifiées en gras dans la seconde partie du programme intitulée « **Contenus thématiques** ». La formation expérimentale doit reposer sur un apprentissage progressif et structuré de l'ensemble des capacités attendues, et s'effectue dans la continuité de la formation engagée en première année TPC1.

La seconde partie, intitulée « **Contenus thématiques** » est articulée autour de quatre thèmes fédérateurs : « **thème E – énergie : conversions et transferts** », « **thème M – mouvements et interactions** », « **thème S – ondes et signaux** » et « **thème T – phénomènes de transport** ». La présentation en deux colonnes « notions et contenus » et, en regard, « capacités exigibles » met en valeur les éléments clés constituant le socle de connaissances et de capacités dont l'assimilation par tous les étudiants est requise. Certains items de cette seconde partie, identifiés en caractères gras dans la colonne

« capacités exigibles », se prêtent particulièrement à une approche expérimentale. Ils doivent être abordés en priorité lors de séances de travaux pratiques où l'autonomie et l'initiative individuelle de l'étudiant doivent être privilégiées. La présence de capacités numériques explicitées atteste par ailleurs de la volonté de renforcer ce volet de la formation des étudiants; l'annexe dédiée à cette composante en précise les objectifs et les attendus en termes de contenus comme de capacités exigibles.

Trois annexes sont consacrées d'une part au matériel nécessaire à la mise en œuvre des programmes, d'autre part aux outils mathématiques et aux outils numériques que les étudiants doivent savoir mobiliser de façon autonome dans le cadre des enseignements de physique en fin d'année de TPC2.

Ce programme précise les objectifs de formation à atteindre pour tous les étudiants. Il n'impose en aucun cas une progression pour chacun des deux semestres. Celle-ci est laissée à la libre appréciation du professeur et relève de sa liberté pédagogique.

Les compétences travaillées dans le cadre de la démarche scientifique

L'ensemble des activités proposées en classe préparatoire aux grandes écoles – activités expérimentales, résolutions de problèmes, TIPE, etc. – permet de travailler les compétences de la démarche scientifique qui figurent dans le tableau ci-dessous. Chaque compétence est illustrée par un ensemble de capacités associées qui permettent d'en préciser le contour sans pour autant constituer une liste exhaustive. Certaines peuvent parfois relever de plusieurs compétences. L'ordre de présentation de ces compétences ne préjuge pas d'un ordre de mobilisation de ces dernières lors d'une activité.

Les différentes compétences doivent être acquises à l'issue des deux années de formation en CPGE. Elles nécessitent d'être régulièrement mobilisées par les étudiants et sont évaluées en s'appuyant, par exemple, sur l'utilisation de grilles d'évaluation.

Compétences	Exemples de capacités associées
S'approprier	<ul style="list-style-type: none"> — Rechercher, extraire et organiser de l'information ou des données en lien avec la situation étudiée. — Identifier la complémentarité d'informations présentées sous des formes différentes (texte, graphe, tableau,...) — Énoncer ou dégager une problématique scientifique en prenant en compte ses différents aspects (technique, scientifique, sociétal). — Représenter la situation par un schéma modèle. — Identifier les grandeurs pertinentes, leur attribuer un symbole. — Relier le problème à une situation modèle connue. — Acquérir de nouvelles connaissances en autonomie.
Analyser/Raisonner	<ul style="list-style-type: none"> — Formuler des hypothèses. — Décomposer un problème en plusieurs problèmes plus simples. — Proposer une stratégie pour répondre à une problématique. — Choisir, concevoir, justifier un protocole, un dispositif expérimental, un modèle, des lois physiques ou chimiques. — Estimer des ordres de grandeur. — Identifier les idées essentielles d'un document et leurs articulations. — Relier qualitativement ou quantitativement différents éléments d'un ou de plusieurs documents.

<p>Réaliser</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Mettre en œuvre les étapes d’une démarche, un protocole, un modèle. — Extraire une information d’un texte, d’un graphe, d’un tableau, d’un schéma, d’une photographie. — Schématiser un dispositif, une expérience, une méthode de mesure. — Utiliser le matériel et les produits de manière adaptée en respectant des règles de sécurité. — Construire des représentations graphiques à partir de données. — Mener des calculs analytiques ou à l’aide d’un langage de programmation, effectuer des applications numériques. — Conduire une analyse dimensionnelle.
<p>Valider</p>	<ul style="list-style-type: none"> — Exploiter des observations, des mesures en estimant les incertitudes. — Confronter les résultats d’un modèle à des résultats expérimentaux, à des données figurant dans un document ou dans de la bibliographie scientifique, à ses connaissances. — Discuter de la recevabilité d’une hypothèse, d’une information. — Analyser les résultats de manière critique. — Repérer les points faibles d’une argumentation (contradiction, partialité, incomplétude,...). — Proposer des améliorations de la démarche ou du modèle.
<p>Communiquer</p>	<ul style="list-style-type: none"> — À l’écrit comme à l’oral : <ul style="list-style-type: none"> ◦ présenter les étapes de sa démarche de manière synthétique, organisée et cohérente. ◦ rédiger une synthèse, une analyse, une argumentation. ◦ appuyer son propos sur des supports appropriés. ◦ utiliser un vocabulaire scientifique précis et choisir des modes de représentation adaptés (schémas, représentations graphiques, cartes mentales, etc.). ◦ citer l’origine des sources utilisées. — Écouter, confronter son point de vue.

Pour atteindre le plein niveau de maîtrise de ces compétences et de ces capacités, les étudiants doivent progressivement développer, dans les différentes activités proposées par le professeur, leur **autonomie**, leur **esprit d’initiative** et leur **esprit critique**. La mise en œuvre des programmes doit aussi être l’occasion d’aborder avec les étudiants des questions liées à la poursuite d’études scientifiques, à l’histoire de l’évolution des idées, des modèles et des théories en physique, des questions liées à la recherche scientifique actuelle, des enjeux de citoyenneté comme l’engagement, la responsabilité individuelle et collective, la sécurité pour soi et autrui, ou des enjeux environnementaux et climatiques.

Repères pour l’enseignement

Dans le cadre de la liberté pédagogique, le professeur organise son enseignement en respectant trois grands principes directeurs :

- privilégier la mise en activité des étudiants en évitant tout 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 favoriser la réflexion, le raisonnement, la participation et l’autonomie des étudiants. L’investigation expérimentale et la résolution de problèmes favorisent cette mise en activité ;
- recourir à la mise en contexte des contenus scientifiques : le questionnement scientifique peut être introduit à partir de phénomènes naturels, de procédés industriels ou d’objets technologiques. Le recours à des approches documentaires, pouvant être en langue anglaise, est un moyen pertinent pour diversifier les supports d’accès à l’information scientifique et technologique et ainsi former l’étudiant à mieux en appréhender la complexité. Lorsque

le thème traité s'y prête, l'enseignant peut le mettre en perspective avec l'histoire des sciences et des techniques, avec des questions d'actualité ou des débats d'idées;

- contribuer à la nécessaire mise en cohérence des différents enseignements scientifiques de physique, de chimie, de mathématiques et d'informatique ainsi que l'enseignement de sciences en langue vivante (ESLV).

Concernant l'évaluation, qui vise à mesurer le degré de maîtrise du socle ainsi défini et le niveau d'autonomie et d'initiative des étudiants, le professeur veillera soigneusement à identifier les compétences et les capacités mobilisées dans les activités proposées afin d'en élargir le plus possible le spectre.

Première partie

Formation expérimentale

Cette partie est spécifiquement dédiée à la mise en œuvre de la formation expérimentale des étudiants. Dans un premier temps, elle précise les connaissances et savoir-faire qui doivent être acquis dans le domaine de la **mesure** et de l'évaluation des **incertitudes**. Elle présente ensuite de façon détaillée l'ensemble des **capacités expérimentales** qui doivent être acquises et pratiquées en autonomie par les étudiants à l'issue de leur formation en deuxième année de classe préparatoire TPC. Enfin, elle aborde la question de la prévention du risque au laboratoire de physique. Une liste de matériel, que les étudiants doivent savoir utiliser avec l'aide d'une notice succincte, figure dans une annexe du présent programme.

1 Mesures et incertitudes

Les notions et capacités identifiées ci-dessous couvrent les deux années de formation en classe préparatoire aux grandes écoles; leur pleine maîtrise est donc bien un objectif de fin de seconde année. Elles sont communes aux enseignements de physique et de chimie et leur apprentissage s'effectue de manière coordonnée entre les professeurs concernés.

L'accent est mis sur la variabilité de la mesure d'une grandeur physique et sa caractérisation à l'aide de l'incertitude-type. La comparaison entre deux valeurs d'une même grandeur physique est conduite au moyen de l'écart normalisé, l'objectif principal étant de développer l'esprit critique des étudiants en s'appuyant sur un critère quantitatif. Le même esprit prévaut dans l'analyse des résultats d'une régression linéaire qui ne saurait s'appuyer sur l'exploitation non raisonnée du coefficient de corrélation (R^2).

Le recours à la simulation vise à illustrer, sur la base de mesures expérimentales, différents effets de la variabilité de la mesure d'une grandeur physique dans les cas des incertitudes-types composées et de la régression linéaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Variabilité de la mesure d'une grandeur physique. Incertitude. Incertitude-type.	Identifier les incertitudes liées, par exemple, à l'opérateur, à l'environnement, aux instruments ou à la méthode de mesure. Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une approche statistique (évaluation de type A). Procéder à l'évaluation d'une incertitude-type par une autre approche que statistique (évaluation de type B). Associer un intervalle de confiance à l'écart-type dans l'hypothèse d'une distribution suivant la loi normale.
Incertitudes-types composées.	Évaluer, à l'aide d'une relation fournie, l'incertitude-type d'une grandeur qui s'exprime en fonction d'autres grandeurs, dont les incertitudes-types sont connues, par une relation du type somme, différence, produit ou quotient. Comparer entre elles les différentes contributions lors de l'évaluation d'une incertitude-type composée. Capacité numérique : simuler, à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur, un processus aléatoire – simulation de Monte-Carlo – permettant de caractériser la variabilité de la valeur d'une grandeur composée.
Écriture du résultat d'une mesure.	Écrire, avec un nombre adapté de chiffres significatifs, le résultat d'une mesure.
Comparaison de deux valeurs; écart normalisé.	Comparer deux valeurs dont les incertitudes-types sont connues à l'aide de leur écart normalisé. Analyser les causes d'une éventuelle incompatibilité entre le résultat d'une mesure et le résultat attendu par une modélisation.
Régression linéaire.	Utiliser un logiciel de régression linéaire afin d'obtenir les valeurs des paramètres du modèle. Analyser les résultats obtenus à l'aide d'une procédure de validation : analyse graphique intégrant les barres d'incertitude ou analyse des écarts normalisés. Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation ou d'un tableur, simuler un processus aléatoire de variation des valeurs expérimentales de l'une des grandeurs – simulation de Monte-Carlo – pour évaluer l'incertitude sur les paramètres du modèle.

2 Mesures et capacités expérimentales

Cette partie présente l'ensemble des capacités expérimentales générales que les étudiants doivent acquérir durant les séances de travaux pratiques pendant la deuxième année de classes préparatoires TPC2. Les capacités présentées ci-dessous viennent compléter celles qui figurent dans le programme de physique de TPC1 et qui ont vocation à être consolidées en TPC2.

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. À ce titre, elle vient compléter la liste des thèmes d'étude – en gras dans la colonne « Capacités exigibles » de la partie « **Contenus thématiques** » – à partir desquels la problématique d'une séance peut être définie.

2.1 Mesures de grandeurs physiques

Les activités expérimentales doivent développer, tout au long de la formation des étudiants, la capacité à mettre en œuvre un dispositif de mesure d'une grandeur physique, à choisir le matériel adapté et à l'utiliser de façon autonome, éventuellement à l'aide d'une notice succincte.

Nature et méthodes	Capacités exigibles
Mesures de durées et de fréquences	
Mesurer indirectement une fréquence par comparaison avec une fréquence connue voisine, en utilisant une détection synchrone.	Réaliser une détection « synchrone » à l'aide d'un multiplexeur et d'un passe-bas simple adapté à la mesure.
Réaliser une analyse spectrale.	Choisir les paramètres d'une acquisition numérique destinée à une analyse spectrale afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon, tout en obtenant une bonne résolution spectrale.
Optique	
Analyser une lumière complètement polarisée.	Identifier de façon absolue l'axe d'un polariseur par une méthode mettant en œuvre la réflexion vitreuse. Identifier les lignes neutres d'une lame quart d'onde ou demi-onde, sans distinction entre axe lent et rapide. Modifier la direction d'une polarisation rectiligne.
Étudier la cohérence temporelle d'une source.	Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue par une démarche autonome non imposée. Obtenir une estimation semi-quantitative de la longueur de cohérence d'une radiation à l'aide d'un interféromètre de Michelson en lame d'air.
Mesurer une faible différence de longueurs d'onde : doublet spectral, modes d'une diode laser.	Réaliser la mesure d'un faible écart spectral avec un interféromètre de Michelson.

3 Prévention du risque au laboratoire

L'apprentissage et le respect des règles de sécurité dans tous les domaines recensés ci-après permettent aux étudiants de prévenir et de minimiser les risques lorsqu'ils évoluent au laboratoire de physique. Futurs ingénieurs, chercheurs, enseignants, ils doivent être sensibilisés au respect de la législation et à l'impact de leur activité sur l'environnement.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Prévention des risques au laboratoire Règles de sécurité au laboratoire.	Adopter une attitude responsable et adaptée au travail en laboratoire. Développer une attitude autonome dans la prévention des risques.
Risque électrique.	Adopter une attitude responsable lors de l'utilisation d'appareils électriques.
Risque optique.	Utiliser les sources laser et les diodes électroluminescentes de manière adaptée.

Risques liés à la pression et à la température.

Adopter une attitude responsable lors de manipulations de corps chauds ou de dispositifs engageant des hautes ou des basses pressions.

Deuxième partie

Contenus thématiques

Thème S – ondes et signaux	8
S.8 Filtrage linéaire	8
S.9 Optique ondulatoire	9
S.9.1 Modèle scalaire des ondes lumineuses	9
S.9.2 Superposition d'ondes lumineuses	10
S.9.3 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young	10
S.9.4 Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson	11
S.10 Électromagnétisme	11
S.10.1 Sources du champ électromagnétique	12
S.10.2 Electrostatique	12
S.10.3 Magnétostatique	13
S.10.4 Équations de Maxwell	14
S.11 Physique des ondes	15
S.11.1 Propagation unidimensionnelle - Équation de d'Alembert	15
S.11.2 Ondes acoustiques dans les fluides	16
S.11.3 Ondes électromagnétiques dans le vide	16
S.11.4 Phénomènes de propagation linéaires unidimensionnels	17
S.12 Introduction à la physique quantique	17
Thème M – mouvements et interactions	18
M.5 Moment cinétique	18
M.6 Mouvement d'un solide	18
M.7 Mécanique des fluides	19
M.7.1 Description d'un fluide en écoulement	20
M.7.2 Actions mécaniques dans un fluide en écoulement	20
M.7.3 Écoulement interne incompressible dans une conduite	20
M.7.4 Écoulement externe autour d'un obstacle	20
Thème E – énergie : conversions et transferts	21
E.6 Rayonnement thermique	21
E.7 Second principe de la thermodynamique	21
Thème T – phénomènes de transport	22
T.1 Diffusion de particules	22
T.2 Conduction thermique	22

Thème S – ondes et signaux

S.8 Filtrage linéaire

L'objectif principal de cette partie n'est pas de former les étudiants aux aspects techniques des calculs des fonctions de transfert et des tracés de diagrammes de Bode mais de mettre l'accent sur l'interprétation des propriétés du signal de sortie connaissant celles du signal d'entrée. Seule la détermination des fonctions de transfert du premier ordre est exigible des étudiants. La fonction de transfert d'un système linéaire du second ordre peut être exploitée, seulement dans le cadre expérimental, à condition d'être fournie ou déterminée expérimentalement.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Signaux périodiques.	Définir la valeur moyenne et la valeur efficace d'un signal périodique. Calculer la valeur efficace d'un signal sinusoïdal. Analyser la décomposition fournie d'un signal périodique en une somme de signaux sinusoïdaux.

Fonction de transfert harmonique. Diagramme de Bode.	Tracer le diagramme de Bode (amplitude et phase) associé à une fonction de transfert d'ordre 1. Utiliser les échelles logarithmiques et interpréter les comportements asymptotiques des diagrammes de Bode en amplitude d'après l'expression de la fonction de transfert. Mettre en œuvre un dispositif expérimental exploitant les propriétés de la fonction de transfert, fournie ou déterminée expérimentalement, d'un système linéaire d'ordre 1 ou 2.
Modèles de filtres linéaires passifs.	À partir d'une analyse spectrale, étudier le filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal par un système linéaire passif d'ordre 1 ou 2 dont la fonction de transfert est fournie ou déterminée expérimentalement.

S.9 Optique ondulatoire

Le programme d'optique de la classe de TPC2 s'inscrit dans la continuité de la partie « **S.1 Formation des images** » du programme de physique de TPC1. Dans une première partie, on introduit les éléments spécifiques à l'émission, la propagation et la détection des ondes lumineuses. Les parties suivantes traitent essentiellement des interférences lumineuses : 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 de la source conduit à montrer l'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 de la répartition de l'intensité lumineuse modélisant les figures observées : 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.

S.9.1 Modèle scalaire des ondes lumineuses

La partie « **S.9.1 Modèle scalaire des ondes lumineuses** » introduit les outils nécessaires à l'étude des phénomènes ondulatoires dans le domaine de l'optique. La réponse des récepteurs est supposée 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 employer indifféremment les termes « intensité » et « éclaircissement » sans chercher à les distinguer à ce niveau de formation. Le théorème de Malus (orthogonalité des rayons lumineux et des surfaces d'onde dans l'approximation de l'optique géométrique) est admis. Dans le cadre de l'optique, on qualifie une onde de plane ou sphérique par référence à la forme géométrique des surfaces d'onde.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modèle de propagation dans l'approximation de l'optique géométrique Vibration lumineuse.	Associer la grandeur scalaire de l'optique à une composante d'un champ électrique.
Chemin optique. Retard de phase dû à la propagation.	Exprimer le retard de phase en un point en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique.
Surfaces d'onde. Théorème de Malus. Onde plane, onde sphérique; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	Utiliser l'égalité des chemins optiques sur les rayons d'un point objet à son image. Associer une description de la formation des images en termes de rayons lumineux et en termes de surfaces d'onde.
Modèle d'émission Largeur spectrale. Cohérence temporelle.	Classer différentes sources lumineuses (lampe spectrale basse pression, laser, source de lumière blanche...) en fonction du temps de cohérence de leurs diverses radiations. Citer quelques ordres de grandeur des longueurs de cohérence temporelle associées à différentes sources. Relier, en ordre de grandeur, le temps de cohérence et la largeur spectrale de la radiation considérée.

Réception d'une onde lumineuse Récepteurs. Intensité lumineuse.	Comparer le temps de réponse d'un récepteur usuel (œil, photodiode, capteur CCD) aux temps caractéristiques des vibrations lumineuses. Relier l'intensité lumineuse à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique. Mettre en œuvre un capteur optique.
---	---

S.9.2 Superposition d'ondes lumineuses

Dans la partie « **S.9.2 Superposition d'ondes lumineuses** », le professeur est invité à s'appuyer sur des situations concrètes, des illustrations expérimentales et des simulations afin de donner du sens aux différentes notions présentées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques non synchrones ou incohérentes entre elles.	Justifier l'additivité des intensités.
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel. Contraste.	Établir la formule de Fresnel. Identifier une situation de cohérence entre deux ondes et utiliser la formule de Fresnel. Associer un bon contraste à des ondes d'intensités voisines.
Superposition de N ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique dans le cas $N \gg 1$: cas particulier du réseau de fentes par transmission.	Expliquer qualitativement l'influence de N sur l'intensité et la finesse des franges brillantes observées. Établir et utiliser la relation donnant la direction des maxima d'intensité derrière un réseau de fentes rectilignes parallèles. Étudier le spectre d'une source lumineuse à l'aide d'un réseau et d'un goniomètre.

S.9.3 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young

Dans la partie « **S.9.3 Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young** », 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
Dispositif-modèle des trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif (source ponctuelle à grande distance finie; observation à grande distance finie). Champ d'interférences. Ordre d'interférences. Franges d'interférences.	Définir, déterminer et utiliser l'ordre d'interférences. Justifier la forme des franges observées sur un écran éloigné parallèle au plan contenant les trous d'Young.
Du dispositif-modèle au dispositif réel. Fentes d'Young. Montage de Fraunhofer.	Expliquer qualitativement l'intérêt pratique du dispositif des fentes d'Young comparativement aux trous d'Young. Exprimer l'ordre d'interférences sur l'écran dans le cas d'un dispositif des fentes d'Young utilisé en configuration de Fraunhofer.
Perte de contraste par élargissement spatial de la source.	Utiliser le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $ \Delta p > 1/2$, où Δp est évalué sur la moitié de l'étendue spatiale de la source, pour interpréter des observations expérimentales.

Perte de contraste par élargissement spectral de la source.	Utiliser le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $ \Delta p > 1/2$, où Δp est évalué sur la moitié de l'étendue spectrale de la source, pour interpréter des observations expérimentales. Relier la longueur de cohérence temporelle, la largeur spectrale et la longueur d'onde en ordres de grandeur.
Observations en lumière blanche (blanc d'ordre supérieur, spectre cannelé).	Déterminer les longueurs d'onde des cannelures.

S.9.4 Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson

Dans le prolongement de la partie précédente, la partie « **S.9.4 Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : l'interféromètre de Michelson** » vise à mettre en lumière l'intérêt des dispositifs interférentiels par division d'amplitude, en s'appuyant sur l'exemple de l'interféromètre de Michelson. L'accent est ainsi mis sur l'importance expérimentale de ces dispositifs, notamment dans le domaine de la métrologie. Lors de la modélisation de l'interféromètre de Michelson, la séparatrice est supposée d'épaisseur négligeable.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Interféromètre de Michelson équivalent à une lame d'air éclairée par une source spatialement étendue. Localisation des franges. Franges d'égale inclinaison.	Justifier les conditions d'observation des franges d'égale inclinaison, le lieu de localisation des franges étant admis. Établir et utiliser l'expression de l'ordre d'interférences en fonction de l'épaisseur de la lame, l'angle d'incidence et la longueur d'onde. Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation adaptées à l'utilisation d'un interféromètre de Michelson en lame d'air. Mesurer l'écart en longueur d'onde d'un doublet et la longueur de cohérence d'une radiation. Interpréter des observations faites en lumière blanche avec l'interféromètre de Michelson en configuration lame d'air.
Interféromètre de Michelson équivalent à un coin d'air éclairé par une source spatialement étendue. Localisation des franges. Franges d'égale épaisseur.	Justifier les conditions d'observation des franges d'égale épaisseur, le lieu de localisation des franges étant admis. Utiliser l'expression donnée de la différence de marche en fonction de l'épaisseur pour exprimer l'ordre d'interférences. Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation adaptées à l'utilisation d'un interféromètre de Michelson en coin d'air. Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson. Interpréter des observations faites en lumière blanche avec l'interféromètre de Michelson en configuration coin d'air.

S.10 Électromagnétisme

Cette partie s'inscrit dans le prolongement de l'introduction à l'électromagnétisme vue en première année, où étaient décrites sur un plan qualitatif les sources des champs électrique et magnétique. Le programme de seconde année apporte les éléments constitutifs de la théorie de Maxwell des phénomènes électromagnétiques. Il importe que les étudiants soient formés à exploiter des cartes de champ fournies, exploiter des propriétés de symétrie, manipuler les équations locales et intégrales. Le cours d'électromagnétisme donne aussi l'occasion de manipuler des modèles (dipôles, conden-

sateur plan, solénoïde long, etc.). Toute modélisation d'une distribution de courants électriques par une distribution de courants électriques superficiels est exclue. Le modèle du plan infini uniformément chargé en surface est la seule distribution de charges électriques en surface étudiée, en lien avec le modèle du condensateur plan. 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. 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.

S.10.1 Sources du champ électromagnétique

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Description microscopique et mésoscopique des sources du champ électromagnétique Densité volumique de charges. Charge traversant un élément de surface fixe et vecteur densité de courant électrique. Intensité du courant électrique.</p>	<p>Exprimer la densité volumique de charge et le vecteur densité de courant 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 du vecteur densité de courant électrique.</p>
<p>Conservation de la charge électrique Équation locale de conservation de la charge électrique.</p>	<p>Établir l'équation traduisant la conservation de la charge électrique dans le seul cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Citer et utiliser une généralisation admise en géométrie quelconque utilisant l'opérateur divergence, son expression étant fournie. Exploiter le caractère conservatif du vecteur densité de courant électrique en régime stationnaire; relier cette propriété à la loi des nœuds de l'électrocinétique.</p>
<p>Conduction électrique dans un conducteur ohmique Loi d'Ohm locale. Conductivité électrique.</p>	<p>Établir l'expression de la conductivité électrique à l'aide d'un modèle microscopique, l'action de l'agitation thermique et des défauts du réseau étant décrite par une force de frottement fluide linéaire. Établir l'expression de la résistance électrique d'une portion de conducteur filiforme.</p>
<p>Effet thermique du courant électrique : loi de Joule locale.</p>	<p>Exprimer la puissance volumique dissipée par effet Joule dans un conducteur ohmique.</p>

S.10.2 Électrostatique

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

Notions et contenus	Capacités exigibles
<p>Champ électrostatique Loi de Coulomb. Champ et potentiel électrostatiques créés par une charge électrique ponctuelle. Principe de superposition.</p>	<p>Exprimer le champ et le potentiel électrostatiques créés par une distribution discrète de charges électriques. Citer quelques ordres de grandeur de champs électrostatiques.</p>
<p>Symétries.</p>	<p>Exploiter les propriétés de symétrie des sources (translation, rotation, symétrie plane, conjugaison de charges électriques) pour prévoir des propriétés du champ électrostatique créé.</p>

Circulation du champ électrostatique. Potentiel électrostatique. Équations locales.	Relier l'existence d'un potentiel électrostatique à la nullité du rotationnel du vecteur champ électrostatique. Justifier l'orthogonalité des lignes de champ avec les surfaces équipotentielles et leur orientation dans le sens des potentiels décroissants.
Théorème de Gauss et équation locale de Maxwell-Gauss.	Choisir une surface adaptée et utiliser le théorème de Gauss.
Lignes de champ électrostatique. Équipotentielles.	Justifier qu'une carte de lignes de champ puisse ou non être celle d'un champ électrostatique. Repérer, sur une carte de champ électrostatique, d'éventuelles sources du champ et leur signe. Associer l'évolution de la norme du champ électrostatique à l'évasement des tubes de champ loin des sources. Relier équipotentielles et lignes de champ électrostatique. Évaluer la norme du champ électrostatique à partir d'un réseau de lignes équipotentielles.
Distribution dipolaire de charges électriques Modèle du dipôle électrostatique. Moment dipolaire. Potentiel et champ créés par un dipôle électrostatique.	Citer les conditions de l'approximation dipolaire. Établir l'expression du potentiel électrostatique. Comparer la décroissance du champ et du potentiel avec la distance dans le cas d'une charge ponctuelle et dans le cas d'un dipôle électrostatique. Tracer l'allure des lignes de champ électrostatique engendrées par un dipôle électrostatique.
Actions subies par un dipôle placé dans un champ électrostatique d'origine extérieure : résultante et moment.	Utiliser les expressions fournies de la résultante et du moment des actions subies par un dipôle placé dans un champ électrostatique d'origine extérieure.
Énergie potentielle d'un dipôle électrostatique rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure.	Utiliser l'expression fournie de l'énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure. Prévoir qualitativement l'évolution d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique d'origine extérieure.
Interactions ion-molécule et molécule-molécule.	Expliquer qualitativement la solvatation des ions dans un solvant polaire.
Dipôle induit. Polarisabilité.	Associer la polarisabilité et le volume de l'atome en ordre de grandeur.
Modèle du condensateur plan sans effet de bord Plan infini uniformément chargé en surface.	Établir l'expression du champ créé par un plan infini uniformément chargé en surface.
Condensateur plan. Capacité. Densité volumique d'énergie électrostatique.	Établir l'expression du champ créé par un condensateur plan. Déterminer l'expression de la capacité d'un condensateur plan. Déterminer l'expression de la densité volumique d'énergie électrostatique dans le cas du condensateur plan à partir de celle de l'énergie du condensateur.

S.10.3 Magnétostatique

L'étude du champ magnétique en régime stationnaire prend appui sur les équations locales : la loi de Biot et Savart ne figure pas au programme. L'objectif réside davantage dans l'étude des propriétés des champs magnétiques que dans leur calcul : les calculs de champ magnétique doivent donc se limiter à des situations d'intérêt pratique évident. Enfin, la notion de potentiel-vecteur est hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Champ magnétostatique Équations locales de la magnétostatique et formes intégrales : flux conservatif et théorème d'Ampère.	Choisir un contour fermé et 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) pour prévoir des propriétés du champ créé.
Propriétés topographiques.	Justifier qu'une carte de lignes de champ puisse ou non être celle d'un champ magnétostatique. Repérer, sur une carte de champ magnétostatique, d'éventuelles sources du champ et leur sens. Associer l'évolution de la norme d'un champ magnétique à l'évasement des tubes de champ.
Exemples de champs magnétostatiques Modèle du câble rectiligne infini. Solénoïde long sans effets de bords. Inductance propre. Densité volumique d'énergie magnétique.	Déterminer le champ créé par un câble rectiligne infini. Établir et citer l'expression du champ à l'intérieur d'un solénoïde long, la nullité du champ extérieur étant admise. Établir les expressions de l'inductance propre et de l'énergie d'une bobine modélisée par un solénoïde long. Associer l'énergie d'une bobine à une densité volumique d'énergie magnétique.
Dipôles magnétostatiques Moment magnétique d'une boucle de courant plane.	Relier le moment magnétique d'un atome d'hydrogène à son moment cinétique.
Actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure : résultante et moment.	Utiliser les expressions fournies de la résultante et du moment des actions subies par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.
Énergie potentielle d'un dipôle magnétique rigide placé dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.	Utiliser l'expression fournie de l'énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ magnétostatique d'origine extérieure. Prévoir qualitativement l'évolution d'un dipôle rigide dans un champ magnétostatique d'origine extérieure.

S.10.4 Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell, sous leur forme générale, sont énoncées en tant que postulat fondamental de l'électromagnétisme. La notion de potentiel-vecteur est hors-programme mais on insiste sur le fait que le champ électrique ne dérive pas en général d'un potentiel scalaire. L'étude détaillée des ondes électromagnétiques qui prolonge cette partie est vue dans la partie S.11.3. On ne mentionne ici les phénomènes de propagation, et en particulier le caractère non instantané des interactions magnétiques, que pour les négliger dans le cadre des régimes lentement variables. Le cadre adopté est celui de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) magnétique, pour lequel les effets des distributions de courants électriques dominent ceux des distributions de charges électriques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Équations de Maxwell Force de Lorentz. Équations locales de Maxwell. Formes intégrales. Linéarité.	Utiliser les équations de Maxwell sous forme locale ou intégrale. Relier l'équation de Maxwell-Faraday et la loi de Faraday. Établir l'équation locale de la conservation de la charge à partir des équations de Maxwell. Utiliser une méthode de superposition.
Aspects énergétiques Vecteur de Poynting. Densité volumique d'énergie électromagnétique. Équation locale de Poynting.	Utiliser les grandeurs énergétiques pour conduire des bilans d'énergie électromagnétique. Associer le vecteur de Poynting et l'intensité lumineuse utilisée dans le domaine de l'optique.
Approximation des régimes quasi-stationnaires magnétique Caractère non instantané des interactions électromagnétiques. Célérité de la lumière dans le vide.	Calculer la valeur approchée de la durée de propagation dans le vide d'une onde électromagnétique sur une distance donnée, et inversement.

ARQS magnétique.	Discuter l'approximation des régimes quasi-stationnaires. Simplifier et utiliser les équations de Maxwell et l'équation de conservation de la charge dans l'approximation du régime quasi-stationnaire magnétique. Étendre le domaine de validité des expressions des champs magnétiques obtenues en régime stationnaire.
------------------	---

S.11 Physique des ondes

Le programme de physique des ondes de TPC2 s'inscrit dans le prolongement de la partie relative à la propagation d'un signal du programme de physique de TPC1. Il s'agit désormais de mettre tout d'abord en place l'équation d'onde de d'Alembert dans des contextes différents (en mécanique, en électrocinétique, en acoustique, en électromagnétisme) et de présenter ensuite des phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants, la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu conducteur ohmique en constituant un exemple.

S.11.1 Propagation unidimensionnelle - Équation de d'Alembert

La mise en équation des petits mouvements transverses d'une corde vibrante et de la propagation d'un signal électrique dans un câble coaxial permet de montrer l'universalité de l'équation de d'Alembert. L'influence des propriétés physiques (inertie et élasticité) sur la célérité des ondes mécaniques dans un milieu élastique est discutée au regard de l'étude menée pour la corde vibrante.

La corde vibrante constitue un support privilégié et explicite pour mettre en évidence la notion de mode propre de vibration. Le câble coaxial offre l'occasion de mettre en évidence des grandeurs physiques couplées et d'aborder, dans le cadre expérimental, les phénomènes de réflexion d'une onde sur une discontinuité d'impédance.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Ondes mécaniques Ondes transversales sur une corde vibrante.	Établir l'équation d'onde décrivant les ondes transversales sur une corde vibrante infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements transverses.
Équation de d'Alembert; célérité.	Identifier l'équation de d'Alembert et en extraire l'expression de la célérité. Relier qualitativement la célérité d'une onde mécanique, la raideur et l'inertie du milieu support, par analogie avec la célérité des ondes transversales sur une corde vibrante.
Ondes progressives, ondes progressives harmoniques; ondes stationnaires.	Différencier une onde stationnaire d'une onde progressive. Utiliser qualitativement l'analyse de Fourier pour décrire une onde non harmonique.
Modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. Résonances d'une corde de Melde.	Décrire les modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. Interpréter quantitativement les résonances observées avec la corde de Melde en négligeant l'amortissement.
Ondes électrocinétiques Ondes de tension et de courant dans un câble coaxial.	Établir les équations de propagation dans un câble coaxial sans pertes modélisé comme un milieu continu caractérisé par une inductance linéique et une capacité linéique.
Impédance caractéristique.	Établir l'expression de l'impédance caractéristique d'un câble coaxial.
Réflexion en amplitude sur une impédance terminale.	Étudier la réflexion en amplitude de tension d'une onde électrique à l'extrémité d'un câble coaxial pour une impédance terminale nulle, infinie ou résistive.

S.11.2 Ondes acoustiques dans les fluides

L'équation de d'Alembert pour la surpression acoustique est établie par application du théorème de la quantité de mouvement à une tranche de gaz dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes, dans le cadre du modèle du gaz parfait et de l'approximation acoustique. L'expression de la célérité des ondes acoustiques dans un fluide compressible est construite par analyse dimensionnelle puis admise sans démonstration supplémentaire. La notion d'impédance acoustique est introduite afin de caractériser les phénomènes de réflexion et de transmission des ondes acoustiques à l'interface entre deux fluides.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Approximation acoustique.	Classer les ondes acoustiques par domaines fréquentiels. Valider l'approximation acoustique.
Équation de d'Alembert pour la surpression acoustique dans un gaz.	Établir, par application du théorème de la quantité de mouvement à une tranche de gaz, l'équation de propagation de la surpression acoustique au sein d'un gaz, supposé parfait, dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes.
Célérité des ondes acoustiques.	Exprimer la célérité des ondes acoustiques en fonction de la température pour un gaz parfait. Construire, par analyse dimensionnelle, l'expression de la célérité des ondes acoustiques dans un fluide en fonction de sa masse volumique et de sa compressibilité isentropique.
Ondes planes progressives harmoniques : caractère longitudinal, impédance acoustique.	Exploiter la notion d'impédance acoustique pour faire le lien entre les champs de surpression et de vitesse d'une onde plane progressive harmonique. Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques.
Intensité sonore (puissance acoustique surfacique moyenne). Niveau d'intensité sonore.	Citer quelques ordres de grandeur de niveaux d'intensité sonore.
Réflexion et transmission d'une onde acoustique plane progressive sous incidence normale sur une interface plane infinie entre deux fluides : coefficients de réflexion et de transmission en amplitude des surpressions et des puissances acoustiques surfaciques moyennes.	Expliciter des conditions aux limites à une interface. Établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion. Associer l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance.
Effet Doppler.	Mettre en œuvre une détection synchrone pour mesurer une vitesse par décalage Doppler.

S.11.3 Ondes électromagnétiques dans le vide

La mise en équation de la propagation des ondes électromagnétiques dans une région vide de charges et de courant s'appuie sur les équations de Maxwell introduites dans la partie « S.10.4 - Équations de Maxwell ».

Notions et contenus	Capacités exigibles
Équations de propagation d'un champ électromagnétique dans une région sans charge ni courant électriques.	Établir et citer les équations de propagation d'un champ électromagnétique dans le vide.
Structure d'une onde plane progressive harmonique.	Établir et exploiter la structure d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique. Utiliser la superposition d'ondes planes progressives harmoniques pour justifier les propriétés d'ondes électromagnétiques planes progressives non harmoniques.
Aspects énergétiques.	Relier la direction du vecteur de Poynting et la direction de propagation de l'onde électromagnétique. Interpréter le flux du vecteur de Poynting en termes particuliers. Citer quelques ordres de grandeur de flux énergétiques surfaciques moyens et les relier aux ordres de grandeur des champs électriques associés.

Polarisation des ondes électromagnétiques planes progressives harmoniques : polarisation elliptique, circulaire et rectiligne. Loi de Malus.	Relier l'expression du champ électrique à l'état de polarisation de l'onde. Utiliser la loi de Malus. Reconnaître une lumière polarisée rectilignement. Distinguer une lumière non polarisée 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.
---	--

S.11.4 Phénomènes de propagation linéaires unidimensionnels

Cette partie permet de présenter des phénomènes de propagation régis par des équations aux dérivées partielles linéaires à coefficients constants. Elle peut, par exemple et sans obligation, s'appuyer sur une modélisation du câble coaxial différente et complémentaire de celle vue dans la partie « **S.11.1 Propagation unidimensionnelle - Équation de d'Alembert** ». Les solutions envisagées sont exprimées sous la forme d'ondes harmoniques planes, écrites en représentation complexe. En ce qui concerne les ondes électromagnétiques, seule la propagation dans un milieu conducteur ohmique entre dans le cadre du programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Dispersion et absorption Propagation unidimensionnelle d'une onde harmonique dans un milieu linéaire.	Identifier le caractère linéaire d'une équation aux dérivées partielles. Établir la relation de dispersion caractéristique d'un phénomène de propagation en utilisant des ondes de la forme $\exp(\pm i(kx - \omega t))$. Distinguer différents types de comportements selon la valeur de la pulsation.
Dispersion, absorption.	Définir un milieu dispersif. Citer des exemples de situations de propagation dispersive et non dispersive. Associer les parties réelle et imaginaire de \underline{k} aux phénomènes de dispersion et d'absorption. Étudier la propagation d'une onde électrique dans un câble coaxial.
Ondes électromagnétiques dans un conducteur ohmique Propagation d'une onde électromagnétique plane harmonique unidirectionnelle dans un conducteur ohmique de conductivité réelle. Effet de peau dans un conducteur ohmique.	Établir la relation de dispersion des ondes électromagnétiques dans un conducteur ohmique à basses fréquences. Associer l'atténuation de l'onde dans le milieu conducteur à une dissipation d'énergie. Estimer l'ordre de grandeur de l'épaisseur de peau du cuivre à différentes fréquences.

S.12 Introduction à la physique quantique

La partie « **S.12 - Introduction à la physique quantique** » est résolument pensée autour de la présentation d'expériences réalisées depuis le début du xx^e siècle. Cette partie vise à questionner la représentation classique du monde proposée dans les autres parties du programme. Les concepts essentiels abordés sont la dualité onde-particule, l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde, l'inégalité de Heisenberg spatiale et la quantification de l'énergie dans les atomes. Pour illustrer ce dernier point, l'approche historique suivie par Bohr, articulant l'existence affirmée d'états stationnaires de l'atome d'hydrogène, de transitions énergétiques quantiques et le principe de correspondance, permet de réinvestir les compétences acquises par les étudiants en mécanique du point matériel pour montrer comment le modèle planétaire de Bohr, malgré ses limites, permet d'interpréter les observations expérimentales et la formule de Rydberg. Cette approche donne également l'occasion d'insister sur la démarche de modélisation à l'œuvre en physique.

La réflexion sur les thèmes abordés ici est avant tout qualitative ; toute dérive calculatoire exploitant les concepts propres à la physique quantique doit être soigneusement évitée.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Dualité onde-particule pour la lumière et la matière Photon : énergie et impulsion.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.
Onde de matière associée à une particule. Relation de de Broglie.	Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence le comportement ondulatoire de la matière. Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.
Introduction au formalisme quantique Fonction d'onde : introduction qualitative, interprétation probabiliste.	Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes.
Inégalité de Heisenberg spatiale.	Exploiter l'inégalité en ordre de grandeur $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$.
Quantification de l'énergie Modèle planétaire de Bohr. Limites.	Interpréter la formule de Rydberg à l'aide du modèle de Bohr.
Modèle du puits de potentiel unidimensionnel de profondeur infinie.	Exploiter l'inégalité de Heisenberg spatiale pour mettre en évidence l'existence d'une énergie minimale de confinement. Obtenir les niveaux d'énergie par analogie avec les modes propres d'une corde vibrante. Établir le lien qualitatif entre confinement spatial et quantification.

Thème M – mouvements et interactions

En TPC2, le thème « **Mouvements et interactions** » est structuré en trois parties : moment cinétique, mouvement d'un solide et mécanique des fluides. L'accent est porté sur les lois de conservation du moment cinétique, de l'énergie mécanique et de la quantité de mouvement comme outils d'étude des mouvements.

M.5 Moment cinétique

La partie « **M.5 Moment cinétique** » est l'occasion d'introduire les notions de moment cinétique et de moment d'une force. L'un des objectifs visés est que les étudiants disposent de représentations concrètes qui permettent de donner du sens aux grandeurs vectorielles et scalaires utilisées ; c'est notamment pour cela que le bras de levier est introduit. Comme souligné précédemment, l'accent est mis sur l'identification des situations où le moment cinétique est conservé.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un point et par rapport à un axe orienté.	Relier la direction et le sens du vecteur moment cinétique aux caractéristiques du mouvement. Utiliser le caractère algébrique du moment cinétique scalaire.
Moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté.	Exprimer le moment d'une force par rapport à un axe orienté en utilisant le bras de levier.
Théorème du moment cinétique en un point fixe dans un référentiel galiléen. Conservation du moment cinétique.	Identifier les cas de conservation du moment cinétique.

M.6 Mouvement d'un solide

Concernant le solide en rotation autour d'un axe fixe dans la partie « **M.6 Mouvement d'un solide** », il s'agit de définir le mouvement en remarquant que tout point du solide décrit un cercle autour de l'axe avec une même vitesse angulaire et de déterminer la vitesse de chaque point en fonction de celle-ci et de la distance à l'axe de rotation.

Des exemples de dynamique du solide sont introduits (translation et rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen), avec toutefois des limitations strictes : l'étude générale d'un mouvement composé d'une translation dans un référentiel galiléen et d'une rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel barycentrique ne figure pas au programme.

L'étude du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe gardant une direction fixe dans un référentiel galiléen mais pour lequel l'axe de rotation est en mouvement est exclue.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Description du mouvement d'un solide dans deux cas particuliers Définition d'un solide.	Différencier un solide d'un système déformable.
Translation.	Reconnaître et décrire une translation rectiligne ainsi qu'une translation circulaire.
Rotation autour d'un axe fixe.	Décrire la trajectoire d'un point quelconque du solide et exprimer sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.
Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide mobile autour d'un axe fixe Moment cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe : moment d'inertie.	Exploiter, pour un solide, la relation entre le moment cinétique scalaire, la vitesse angulaire de rotation et le moment d'inertie fourni. Relier qualitativement le moment d'inertie à la répartition des masses.
Couple.	Définir un couple.
Liaison pivot.	Définir une liaison pivot et justifier le moment qu'elle peut produire.
Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.	Exploiter le théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.
Approche énergétique du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe orienté, dans un référentiel galiléen Énergie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Utiliser l'expression de l'énergie cinétique, l'expression du moment d'inertie étant fournie.
Théorème de l'énergie cinétique pour un solide en rotation autour d'un axe fixe.	Établir, dans ce cas, l'équivalence entre le théorème scalaire du moment cinétique et celui de l'énergie cinétique.
Pendule pesant.	Établir l'équation du mouvement. Établir une intégrale première du mouvement. Réaliser l'étude énergétique d'un pendule pesant et mettre en évidence une diminution de l'énergie mécanique. Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, mettre en évidence le non isochronisme des oscillations.

M.7 Mécanique des fluides

La partie « **M.7 Mécanique des fluides** » vient compléter les parties « **E.3 Statique des fluides** » et « **E.4 Bilans énergétiques pour un fluide en écoulement stationnaire** » vues en TPC1. En particulier, l'enseignement de mécanique des fluides en TPC2 peut donner l'occasion de réactiver les connaissances et les capacités des étudiants relatives à la relation de Bernoulli qui figure dans le programme de physique de TPC1.

Les grandeurs pertinentes caractérisant un écoulement sont d'abord introduites. La notion de dérivée particulière ainsi que les équations locales d'Euler et de Navier-Stokes ne sont pas au programme.

Deux modèles d'écoulements de fluides réels sont proposés : les écoulements de Couette plan et de Poiseuille d'un fluide newtonien. Le champ des vitesses est, dans les deux cas, déterminé à l'aide d'un bilan de quantité de mouvement qui permet de réinvestir les capacités déjà développées en mécanique et de faire intervenir les actions mécaniques dans un fluide en écoulement qui sont détaillées ci-après. Le nombre de Reynolds est introduit lors de l'examen de l'écoulement de Poiseuille ; il est présenté comme le nombre sans dimension pilotant la transition d'un écoulement laminaire vers un écoulement turbulent.

L'étude de l'écoulement externe autour d'un obstacle, et en particulier autour d'une aile d'avion, vient clore la partie « **M.7 Mécanique des fluides** ».

M.7.1 Description d'un fluide en écoulement

Notions et contenus	Capacités exigibles
Particule de fluide.	Définir la particule de fluide comme un système mésoscopique de masse constante.
Champ eulérien des vitesses.	Distinguer vitesse microscopique et vitesse mésoscopique. Définir une ligne de courant, un tube de courant. Interpréter un document (photographie ou vidéo d'un écoulement, schéma) et identifier quelques caractéristiques de l'écoulement (lignes de courant, profil de vitesse, stationnarité du champ de vitesse, etc.).
Masse volumique μ .	Citer des ordres de grandeur des masses volumiques de l'eau et de l'air dans les conditions usuelles.
Débit de masse, débit de volume.	Calculer un débit de masse ou de volume.
Écoulement stationnaire.	Établir et exploiter la conservation du débit de masse le long d'un tube de courant.
Écoulement incompressible.	Établir et exploiter la conservation du débit de volume le long d'un tube de courant.

M.7.2 Actions mécaniques dans un fluide en écoulement

Notions et contenus	Capacités exigibles
Forces de pression.	Exprimer la force de pression exercée par un fluide sur une surface élémentaire.
Contraintes tangentielles dans un écoulement $\vec{v} = v_x(y)\vec{u}_x$ au sein d'un fluide newtonien; viscosité dynamique.	Utiliser l'expression fournie $d\vec{F} = \pm\eta \frac{\partial v_x}{\partial y} dS \vec{u}_x$. Citer des ordres de grandeur de viscosité dynamique de différents fluides : air, eau et lubrifiant. Exploiter la condition d'adhérence à l'interface fluide-solide.

M.7.3 Écoulement interne incompressible dans une conduite

Notions et contenus	Capacités exigibles
Écoulement de Couette plan.	Établir l'expression du profil de vitesse pour l'écoulement de Couette plan d'un fluide newtonien à partir d'un bilan de quantité de mouvement.
Écoulement de Poiseuille.	Établir l'expression du profil de vitesse pour l'écoulement de Poiseuille d'un fluide newtonien, en régime laminaire, dans une conduite cylindrique à partir d'un bilan de quantité de mouvement.
Loi de Poiseuille.	Établir l'expression de la loi de Poiseuille donnant le débit de volume en fonction de la différence de pression entre l'entrée et la sortie d'une conduite cylindrique.
Résistance hydraulique. Associations en série et en parallèle de deux résistances hydrauliques.	Modéliser une association série ou parallèle de résistances hydrauliques par une résistance hydraulique équivalente.
Nombre de Reynolds. Notion d'écoulement laminaire ou turbulent.	Calculer un ordre de grandeur de la valeur du nombre de Reynolds de l'écoulement et l'interpréter compte tenu d'une valeur fournie du nombre de Reynolds critique.

M.7.4 Écoulement externe autour d'un obstacle

Notions et contenus	Capacités exigibles
Force de traînée subie par une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme dans un fluide newtonien. Coefficient de traînée C_x ; graphe de C_x en fonction du nombre de Reynolds. Notion de couche limite.	Évaluer un nombre de Reynolds pour choisir un modèle de traînée linéaire ou un modèle de traînée quadratique.
Force de traînée et de portance d'une aile d'avion à haut nombre de Reynolds.	Définir et orienter les forces de portance et de traînée. Exploiter les graphes de C_x et de C_z en fonction de l'angle d'incidence.

Thème E – énergie : conversions et transferts

E.6 Rayonnement thermique

Dans la partie « **E.6 Rayonnement thermique** », une étude qualitative du rayonnement du corps noir est proposée sans qu'aucune formule ne soit exigible. Celle-ci permet également d'aborder de manière quantitative l'effet de serre.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi du déplacement de Wien. Loi de Stefan-Boltzmann. Effet de serre. Albédo.	Exploiter les expressions fournies des lois du déplacement de Wien et de Stefan-Boltzmann. Analyser quantitativement l'effet de serre en s'appuyant sur un bilan énergétique dans le cadre d'un modèle à une couche.

E.7 Second principe de la thermodynamique

L'étude du second principe de la thermodynamique s'inscrit dans la continuité du programme de thermodynamique de première année. L'expression de la fonction d'état entropie est systématiquement donnée et sa construction n'est pas une capacité visée. On cite, sans développement quantitatif, son interprétation en termes de désordre statistique, c'est-à-dire de perte d'information sur la connaissance de l'état microscopique d'un système, de façon à faciliter une interprétation intuitive des bilans d'entropie. Le professeur peut profiter de cette partie pour établir le lien entre l'inégalité de Clausius, admise en première année, et l'entropie créée. Les diagrammes (T, s) sont explicitement hors programme.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Fonction d'état entropie; entropie massique et entropie molaire.	Interpréter qualitativement une augmentation de l'entropie d'un système isolé comme une perte d'information sur la connaissance de l'état du système à l'échelle microscopique.
Entropie d'un gaz parfait, d'une phase condensée peu dilatable et peu compressible.	Exploiter l'expression fournie de la variation d'entropie entre deux états d'équilibre thermodynamique d'un gaz parfait ou d'une phase condensée peu dilatable et peu compressible.
Second principe de la thermodynamique pour un système fermé. Entropie échangée, entropie créée, bilan d'entropie.	Exploiter les propriétés d'extensivité et de fonction d'état de l'entropie. Formuler un bilan d'entropie sous forme infinitésimale ou intégrale. Associer la création d'entropie au caractère irréversible de la transformation.
Loi de Laplace.	Connaître la loi de Laplace et ses conditions d'application.
Cas particulier d'un changement d'état du corps pur.	Connaître et utiliser la relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie massiques associées à un changement d'état du corps pur : $\Delta h_{12}(T) = T \Delta s_{12}(T)$.

Thème T – phénomènes de transport

Cette partie est consacrée à la présentation du transport de matière diffusif et de la conduction thermique, avec une approche symétrique. L'énoncé des lois phénoménologiques de Fick et Fourier s'appuie sur la notion de vecteur densité de courant de particules ou d'énergie, qui sont utilisés afin d'établir l'expression des flux correspondant à travers une surface orientée plane, cylindrique ou sphérique, adaptée à la géométrie considérée. Afin d'éviter toute dérive calculatoire, toute situation où le champ de température ou la densité de particules dépend du temps est exclue, à l'exception des régimes quasi-stationnaires. Les régimes variables dans le temps peuvent cependant être approchés qualitativement à partir de la loi d'échelle exprimant l'échelle spatiale caractéristique, la durée caractéristique et le coefficient de diffusion, construite par analyse dimensionnelle du coefficient de diffusion. L'objectif principal de formation visé consiste en l'écriture de bilans de particules ou d'énergie en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.

Pour introduire ces notions, le professeur s'appuie sur des situations concrètes et motivantes pour les étudiants. L'étude de la conduction thermique entre deux systèmes de températures différentes permet de donner une assise théorique à la puissance thermique proportionnelle à leur écart de température, vue en première année.

T.1 Diffusion de particules

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modèle phénoménologique de transport de matière Flux convectif et flux diffusif de particules.	Distinguer un transport de matière diffusif d'un transport convectif.
Vecteur densité de courant de particules. Loi phénoménologique de Fick. Flux de particules.	Utiliser la loi de Fick pour établir l'expression d'un flux de particules à travers une surface orientée plane, cylindrique ou sphérique adaptée à la géométrie considérée.
Coefficient de diffusion. Loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusion.	Citer l'ordre de grandeur du coefficient de diffusion dans un gaz dans les conditions usuelles. Exploiter la loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusion.
Bilan de particules en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.	Établir un bilan de particules, éventuellement en présence de sources internes. Exploiter la conservation du flux de particules en régime stationnaire et en l'absence de sources internes.

T.2 Conduction thermique

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modèle phénoménologique de la conduction thermique Vecteur densité de courant d'énergie. Loi phénoménologique de Fourier. Flux (ou puissance) thermique. Conductivité thermique.	Utiliser la loi de Fourier pour établir l'expression d'un flux thermique à travers une surface orientée plane, cylindrique ou sphérique adaptée à la géométrie considérée. Citer l'ordre de grandeur de la conductivité thermique de l'air, de l'eau, d'un béton et d'un métal, à température et pression ambiantes.
Coefficient de diffusivité thermique. Loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusivité thermique.	Exploiter la relation fournie exprimant le coefficient de diffusivité thermique en fonction de la conductivité thermique, de la masse volumique et de la capacité thermique massique. Exploiter la loi d'échelle liant les échelles caractéristiques spatiales et temporelles et le coefficient de diffusivité thermique.
Bilan d'énergie en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.	Établir un bilan d'énergie, éventuellement en présence de sources internes. Exploiter la conservation du flux thermique en régime stationnaire et en l'absence de sources internes.

Résistance thermique.	<p>Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique.</p> <p>Établir l'expression d'une résistance thermique dans le cas d'un modèle unidimensionnel.</p> <p>Utiliser les lois d'associations de résistances thermiques.</p>
	<p>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.</p>

Annexe 1 : matériel

La liste ci-dessous regroupe 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 cette liste lors d'épreuves d'évaluation n'est pas exclue, mais elle doit obligatoirement s'accompagner d'une introduction guidée suffisamment détaillée.

1. Domaine optique

- Goniomètre
- Viseur à frontale fixe
- Lunette auto-collimatrice
- Laser à gaz
- Lampes spectrales
- Source de lumière blanche à condenseur
- Lames demi-onde, lames quart d'onde
- Interféromètre de Michelson

2. Domaine électrique

- Oscilloscope numérique
- Carte d'acquisition et logiciel dédié
- Générateur de signaux basse fréquence
- Multimètre numérique
- Multiplieur analogique
- Émetteur et récepteur acoustique (domaine audible et domaine ultrasonore)
- Microcontrôleur
- Câble coaxial avec bouchons d'impédances adaptées

3. Domaines mécanique et thermodynamique

- Dynamomètre
- Capteur de pression
- Accéléromètre
- Stroboscope
- Webcam avec logiciel dédié
- Appareil photo numérique ou caméra numérique
- Thermomètre ou thermocouple
- Caméra thermique ou capteur infra-rouge

Annexe 2 : outils mathématiques

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

Outils mathématiques	Capacités exigibles
1. Équations algébriques	
Systèmes linéaires de n équations à p inconnues.	Identifier les variables (inconnues) nécessaires à la modélisation du problème sous forme d'un système d'équations linéaires. Donner l'expression formelle des solutions dans le seul cas $n = p = 2$.
Équations non linéaires.	Représenter graphiquement une équation de la forme $f(x) = g(x)$. Interpréter graphiquement la ou les solutions.
2. Équations différentielles	

Équations différentielles linéaires à coefficients constants.	Identifier l'ordre. Mettre l'équation sous forme canonique.
Équations différentielles linéaires du premier ordre à coefficients constants : $y' + ay = f(x)$.	Trouver la solution générale de l'équation sans second membre (équation homogène). Trouver l'expression des solutions lorsque $f(x)$ est constante ou de la forme $A \cos(\omega x + \varphi)$ (en utilisant la notation complexe).
Équations différentielles linéaires du deuxième ordre à coefficients constants : $y'' + ay' + by = f(x)$.	Utiliser l'équation caractéristique pour trouver la solution générale de l'équation sans second membre. Prévoir le caractère borné ou non de ses solutions (critère de stabilité). Trouver l'expression des solutions lorsque $f(x)$ est constante ou de la forme $A \exp(\lambda x)$ avec λ complexe. Trouver la solution de l'équation complète correspondant à des conditions initiales données. Représenter graphiquement cette solution.
Autres équations différentielles d'ordre 1 ou 2.	Obtenir une intégrale première d'une équation de Newton $x'' = f(x)$ et l'exploiter graphiquement. Séparer les variables d'une équation du premier ordre à variables séparables. Faire le lien entre les conditions initiales et le graphe de la solution correspondante.
3. Fonctions	
Fonctions usuelles.	Exponentielle, logarithme népérien et décimal, cosinus, sinus, tangente, puissance réelle ($x \rightarrow x^a$).
Dérivée. Notation $\frac{dx}{dt}$.	Utiliser la formule de Taylor à l'ordre un ou deux; interpréter graphiquement.
Développements limités.	Connaître et utiliser les développements limités à l'ordre 1 des fonctions $(1+x)^a$, e^x et $\ln(1+x)$, et à l'ordre 2 des fonctions $\cos(x)$ et $\sin(x)$.
Primitive et intégrale.	Interpréter l'intégrale comme une somme de contributions infinitésimales, en lien avec la méthode des rectangles en mathématiques.
Valeur moyenne.	Exprimer la valeur moyenne sous forme d'une intégrale. Connaître la valeur moyenne sur une période des fonctions \cos , \sin , \cos^2 et \sin^2 .
Représentation graphique d'une fonction.	Déterminer un comportement asymptotique; rechercher un extremum local. Utiliser des échelles logarithmiques; identifier une loi de puissance à une droite en échelle log-log.
Développement en série de Fourier d'une fonction périodique.	Utiliser un développement en série de Fourier fourni par un formulaire.
4. Géométrie	
Vecteurs et système de coordonnées.	Exprimer les coordonnées d'un vecteur dans une base orthonormée. Utiliser les systèmes de coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques.
Projection d'un vecteur et produit scalaire.	Interpréter géométriquement le produit scalaire et connaître son expression en fonction des coordonnées dans une base orthonormée. Utiliser la bilinéarité et le caractère symétrique du produit scalaire.
Produit vectoriel.	Interpréter géométriquement le produit vectoriel et connaître son expression en fonction des coordonnées dans une base orthonormée directe. Utiliser la bilinéarité et le caractère antisymétrique du produit vectoriel. Faire le lien avec l'orientation des trièdres.
Transformations géométriques.	Utiliser les symétries par rapport à un plan, les translations et les rotations de l'espace. Utiliser leur effet sur l'orientation de l'espace.

Courbes planes.	Reconnaître l'équation cartésienne d'une droite, d'un cercle. Utiliser la représentation polaire d'une courbe plane; utiliser un grapheur pour obtenir son tracé.
Longueurs, aires et volumes classiques.	Citer les expressions du périmètre d'un cercle, de l'aire d'un disque, de l'aire d'une sphère, du volume d'une boule, du volume d'un cylindre.
5. Trigonométrie	
Angle orienté.	Définir une convention d'orientation des angles d'un plan (euclidien) et lire des angles orientés. Relier l'orientation d'un axe de rotation à l'orientation positive des angles d'un plan perpendiculaire à cet axe.
Fonctions cosinus, sinus et tangente.	Utiliser le cercle trigonométrique et l'interprétation géométrique des fonctions cosinus, sinus et tangente comme aide-mémoire : relation $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$, relations entre fonctions trigonométriques et toutes relations du type $\cos(\pi \pm x)$ et $\cos(\pi/2 \pm x)$, parités, périodicité, valeurs des fonctions pour les angles usuels. Citer les formules d'addition et de duplication des cosinus et sinus; utiliser un formulaire dans les autres cas.
Nombres complexes et représentation dans le plan. Somme et produit de nombres complexes.	Calculer et interpréter géométriquement la partie réelle, la partie imaginaire, le module et l'argument d'un nombre complexe.
6. Analyse vectorielle	
Gradient d'un champ scalaire.	Citer l'expression du gradient en coordonnées cartésiennes; utiliser un formulaire fourni en coordonnées cylindriques ou sphériques. Utiliser le fait que le gradient d'une fonction f est perpendiculaire aux surfaces iso- f et orienté dans le sens des valeurs de f croissantes.
Divergence d'un champ de vecteurs.	Citer et utiliser le théorème de Green-Ostrogradski. Exprimer l'opérateur divergence en coordonnées cartésiennes.
Rotationnel d'un champ de vecteurs.	Citer et utiliser le théorème de Stokes. Exprimer l'opérateur rotationnel en coordonnées cartésiennes.
Opérateur $\vec{b} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}$.	Exprimer l'opérateur $\vec{b} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}$ en coordonnées cartésiennes.
Laplacien d'un champ scalaire.	Définir l'opérateur laplacien à l'aide des opérateurs divergence et gradient. Exprimer l'opérateur laplacien en coordonnées cartésiennes.
Laplacien d'un champ de vecteurs.	Exprimer le laplacien d'un champ de vecteurs en coordonnées cartésiennes.
Cas des champs proportionnels à $\exp(\pm i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t))$.	Exprimer l'action des opérateurs d'analyse vectorielle sur un tel champ à l'aide du vecteur $i\vec{k}$.

7. Équations aux dérivées partielles	
Exemples d'équations aux dérivées partielles : équation de Laplace, équation de d'Alembert.	Identifier une équation aux dérivées partielles connue. Transposer une solution familière dans un domaine de la physique à un autre domaine. Obtenir des solutions de forme donnée par substitution. Utiliser des conditions initiales et des conditions aux limites
8. Analyse de Fourier	
Synthèse spectrale d'une fonction périodique.	Utiliser un développement en série de Fourier fourni. Utiliser un raisonnement par superposition.

Annexe 3 : outils numériques

La prise en compte de capacités de codage en langage Python dans la formation des étudiants inclut l'utilisation de fonctions extraites de diverses bibliothèques. Elle vise à une meilleure appréhension des principes mis en œuvre par les différents logiciels de traitement des données dont l'utilisation est par ailleurs toujours recommandée. Elle a aussi pour objectif de mobiliser ces capacités dans un contexte concret, celui de la physique. Cette formation par le codage permet également de développer des capacités utiles à la physique comme le raisonnement, la logique ou la décomposition d'un problème complexe en étapes plus simples.

Le tableau ci-dessous explicite ces outils ainsi que les capacités exigibles en fin de seconde année.

Domaines numériques	Capacités exigibles
1. Outils graphiques	
Représentation graphique d'un nuage de points.	Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque <code>matplotlib</code> pour représenter un nuage de points.
Représentation graphique d'une fonction.	Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque <code>matplotlib</code> pour tracer la courbe représentative d'une fonction.
Courbes planes paramétrées.	Utiliser les fonctions de base de la bibliothèque <code>matplotlib</code> pour tracer une courbe plane paramétrée.
2. Équations algébriques	
Résolution d'une équation algébrique ou d'une équation transcendante : méthode dichotomique.	Déterminer, en s'appuyant sur une représentation graphique, un intervalle adapté à la recherche numérique d'une racine par une méthode dichotomique. Mettre en œuvre une méthode dichotomique afin de résoudre une équation avec une précision donnée. Utiliser la fonction <code>bisect</code> de la bibliothèque <code>scipy.optimize</code> (sa spécification étant fournie).
Systèmes linéaires de n équations indépendantes à n inconnues.	Définir les matrices A et B à la représentation matricielle $AX = B$ du système à résoudre. Utiliser la fonction <code>solve</code> de la bibliothèque <code>numpy.linalg</code> (sa spécification étant fournie).
3. Intégration – Dérivation	
Calcul approché d'une intégrale sur un segment par la méthode des rectangles.	Mettre en œuvre la méthode des rectangles pour calculer une valeur approchée d'une intégrale sur un segment.
Calcul approché du nombre dérivé d'une fonction en un point.	Utiliser un schéma numérique pour déterminer une valeur approchée du nombre dérivé d'une fonction en un point.
4. Équations différentielles	
Équations différentielles d'ordre 1.	Mettre en œuvre la méthode d'Euler explicite afin de résoudre une équation différentielle d'ordre 1.
Équations différentielles d'ordre supérieur ou égal à 2	Transformer une équation différentielle d'ordre n en un système différentiel de n équations d'ordre 1. Utiliser la fonction <code>odeint</code> de la bibliothèque <code>scipy.integrate</code> (sa spécification étant fournie).

5. Probabilité - statistiques	
Variable aléatoire.	<p>Utiliser les fonctions de base des bibliothèques <code>random</code> et/ou <code>numpy</code> (leurs spécifications étant fournies) pour réaliser des tirages d'une variable aléatoire.</p> <p>Utiliser la fonction <code>hist</code> de la bibliothèque <code>matplotlib.pyplot</code> (sa spécification étant fournie) pour représenter les résultats d'un ensemble de tirages d'une variable aléatoire.</p> <p>Déterminer la moyenne et l'écart-type d'un ensemble de tirages d'une variable aléatoire.</p>
6. Traitement de données numériques	
Régression linéaire.	<p>Utiliser la fonction <code>polyfit</code> de la bibliothèque <code>numpy</code> (sa spécification étant fournie) pour exploiter des données.</p> <p>Utiliser la fonction <code>random.normal</code> de la bibliothèque <code>numpy</code> (sa spécification étant fournie) pour simuler un processus aléatoire.</p>