# PROGRAMME DE PHYSIQUE

## SECTION PC

## SECONDE ANNÉE

L'enseignement de la physique dans la deuxième année des classes préparatoires de la section PC, s'inscrit dans la continuité des objectifs fixés par la formation multidisciplinaire de première année. Cette année est considérée comme un approfondissement et une consolidation des compétences acquis (l'observation, la modélisation, la validation, la création…).

Ces compétences sont construites à partir d'un ensemble de connaissances et de capacités défini par ce programme. L'acquisition de ces capacités constitue un objectif prioritaire pour le professeur.

Les compétences cherchées, nécessitent la pratique d'une démarche expérimentale. Cette démarche est d'une importance essentielle au même titre que la formation théorique.

Dans ce programme comme dans celui de première année, certaines notions sont abordées à partir de l'étude de documents scientifiques. L'objectif de cette approche documentaire est d'initier l'étudiant à compléter ses connaissances et ses savoirs faire par l'exploitation des ressources et de documents scientifiques variés, ce qu'il aura à pratiquer dans la suite de sa formation et de sa vie professionnelle.

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.

Le professeur peut avoir recourt à la simulation numérique à fin de contourner certaines difficultés pour la recherche de modèles plus fins (effets de non linéarités). Une collaboration avec les professeurs d'informatique est recommandée.

# Partie I : Formation disciplinaire

## I Mécanique des fluides

| **Notions et contenus** | **Capacités exigibles** |
|---|---|
| **1. Description d'un fluide en mouvement** | |
| 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.<br><br>Caractérisation d'un écoulement incompressible par la divergence du champ des vitesses. | 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.<br><br>Utiliser $div\,\vec{\mathrm{v}} = 0$ pour un écoulement incompressible. |
| Dérivée particulaire du vecteur-vitesse : terme local et terme convectif. | Associer $\frac{\partial \vec{\mathrm{v}}}{\partial t} = \vec{0}$ 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 $(\vec{\mathrm{v}}\overrightarrow{grad})\vec{\mathrm{v}}$.<br>Utiliser l'expression fournie de l'accélération convective en fonction de $\overrightarrow{grad}(\frac{\mathrm{v}^2}{2})$ et $\overrightarrow{rot}\vec{\mathrm{v}} \times \vec{\mathrm{v}}$. |
| Vecteur tourbillon.<br><br>Écoulement irrotationnel défini par la nullité du rotationnel du champ des vitesses en tout point ; potentiel des vitesses. | Illustrer sur des exemples simples la signification qualitative du vecteur tourbillon.<br>Utiliser $\overrightarrow{rot}\vec{\mathrm{v}} = \vec{0}$ pour un écoulement irrotationnel et en déduire l'existence d'un potentiel des vitesses. Savoir que le caractère irrotationnel dépend du référentiel. |
| **2. Actions de contact dans un fluide en mouvement** | |
| Forces de pression. Équivalent volumique. | Utiliser les relations $\overrightarrow{dF} = -p\overrightarrow{dS}$ et |

| | |
|---|---|
| | $\overrightarrow{dF} = -\overrightarrow{gradp}\, d\tau$ |
| Contraintes tangentielles dans un écoulement $\vec{v} = v_x(y)\overrightarrow{u_x}$ au sein d'un fluide newtonien ; viscosité.<br>Équivalent volumique des forces de viscosité dans un écoulement incompressible. | Utiliser l'expression fournie :<br>$$\overrightarrow{dF} = \eta \frac{\partial v_x}{\partial x} dS\vec{u}_x$$<br>Établir sur cet exemple l'expression $\overrightarrow{dF} = \eta\overrightarrow{\Delta v}d\tau$. Utiliser sa généralisation admise pour un écoulement incompressible quelconque. |
| Traînée d'une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme dans un fluide newtonien : nombre de Reynolds ; coefficient de traînée Cx ; graphe de Cx 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. |
| **3. Équations dynamiques locales** | |
| 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. |
| Cas particulier de la statique du fluide.<br><br>Résultante de forces de pression.<br><br>La poussée d'Archimède.<br><br>Facteur de Boltzmann. | Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas d'un fluide incompressible et homogène et dans le cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait.<br><br>Utiliser les symétries pour déterminer la direction d'une résultante de forces de pression.<br><br>Évaluer une résultante de forces de pression.<br><br>Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède.<br><br>S'appuyer sur la loi d'évolution de la densité moléculaire de l'air dans le cas de l'atmosphère isotherme pour illustrer la signification du facteur de Boltzmann. |
| Relation de Bernoulli pour un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et homogène dans le champ de pesanteur | Justifier et utiliser cette relation. Interpréter d'éventuels écarts observés en vérifiant les conditions de validité. |

| | |
|---|---|
| uniforme dans un référentiel galiléen. | |
| **4. Bilans macroscopiques** | |
| 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. |

# II Electromagnétisme en régime dépendant du temps

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| **1. Postulats de l'électromagnétisme** | |
| Force de Lorentz. Équations locales de Maxwell. Formes intégrales. Compatibilité avec les cas particuliers de l'électrostatique et de la magnétostatique ; compatibilité avec la conservation de la charge.<br><br>Linéarité. | Utiliser les équations de Maxwell sous forme locale et intégrale. Faire le lien entre l'équation de Maxwell-Faraday et la loi de Faraday.<br><br>Utiliser une méthode de superposition. |
| **2. Aspects énergétiques** | |
| Vecteur de Poynting. Densité volumique d'énergie électromagnétique.<br>Équation locale de conservation de la puissance. | Utiliser les grandeurs énergétiques pour faire des bilans d'énergie électromagnétique.<br>Relier le vecteur de Poynting à l'intensité lumineuse. |
| **3. Validation de l'approximation des régimes quasi-stationnaires « magnétique »** | |
| Équations de propagation des champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ dans le vide. Caractère non instantané des interactions électromagnétiques. | Établir les équations de propagation. |
| ARQS « magnétique ». | Discuter la légitimité du régime quasistationnaire. 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. |

# III **Physique des ondes**

## 1. Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de d'Alembert

La première partie est consacrée à l'étude de phénomènes ondulatoires non dispersifs régis par l'équation d'onde de d'Alembert. Le choix est de privilégier les solutions d'ondes planes progressives harmoniques comme solutions particulières aux équations d'ondes.

L'objectif de la modélisation microscopique des solides, 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.

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| **1. Ondes mécaniques unidimensionnelles dans les solides déformables** | |
| Équation d'onde pour des ondes transversales sur une corde vibrante infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements transverses. | Établir l'équation d'onde en utilisant un système infinitésimal. |
| Modèle microscopique de solide élastique unidimensionnel (chaîne d'atomes élastiquement liés) : loi de Hooke.<br>Ondes acoustiques longitudinales dans une tige solide dans l'approximation des milieux continus. | Relier la raideur des ressorts fictifs à l'énergie de liaison et évaluer l'ordre de grandeur du module d'Young.<br>Établir l'équation d'onde en utilisant un système infinitésimal. |
| Équation de d'Alembert ; célérité.<br><br>Exemples de solutions de l'équation de d'Alembert :<br>- ondes progressives harmoniques<br>- ondes stationnaires harmoniques | Reconnaître une équation de d'Alembert. Associer qualitativement la célérité d'ondes mécaniques, la raideur et l'inertie du milieu support.<br>Différencier une onde stationnaire d'une onde progressive par la forme de leur représentation réelle.<br>Décrire une onde stationnaire observée par stroboscopie sur la corde de Melde.<br><br>Caractériser une onde stationnaire par l'existence de nœuds et de ventres.<br><br>Exprimer les fréquences des modes propres connaissant la célérité et la longueur de la corde.<br><br>Savoir qu'une vibration quelconque d'une corde accrochée entre deux extrémités fixes |

| | |
|---|---|
| | se décompose en modes propres.<br>Faire le lien avec le vocabulaire de la musique et savoir que le spectre émis par un instrument est en réalité plus complexe.<br><br>Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant d'analyser le spectre du signal acoustique produit par une corde vibrante.<br><br>Utiliser qualitativement l'analyse de Fourier pour décrire une onde non harmonique. |
| Applications :<br>- régime libre : modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités<br>- régime forcé : résonances sur la corde de Melde. | Décrire les modes propres.<br><br>En négligeant l'amortissement, associer mode propre et résonance en régime forcé. |
| **2. Ondes acoustiques dans les fluides** | |
| Mise en équations eulérienne des ondes acoustiques dans le cadre de l'approximation acoustique. Équation de d'Alembert pour la surpression. | Classifier les ondes acoustiques par domaines fréquentiels.<br>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. |
| Effet Doppler longitudinal | Décrire et mettre en œuvre un protocole de détection « synchrone » pour mesurer une vitesse par décalage Doppler |
| **3. Ondes électromagnétiques dans le vide** | |
| Équations de propagation de $\vec{E}$ et $\vec{B}$ dans une région sans charge ni courant.<br>Structure d'une onde plane progressive harmonique.<br>Aspects énergétiques. | Établir les équations de propagation.<br><br>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. |
| Polarisation des ondes électromagnétiques planes progressives harmoniques : polarisation elliptique, circulaire et rectiligne. | Relier l'expression du champ électrique à l'état de polarisation d'une onde. |
| 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. | Reconnaître une lumière non polarisée. Distinguer une lumière non polarisée d'une lumière totalement polarisée. |

## 2. Phénomènes de propagation dispersif

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. La modélisation du comportement des DLHI est hors programme. On se limite à des milieux non magnétiques.

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| **1 Ondes électromagnétiques dans les plasmas et dans les métaux** | |
| Interaction entre une onde plane progressive harmonique et un plasma localement neutre sans collisions. Conductivité imaginaire pure. Interprétation énergétique. | Décrire le modèle. Construire une conductivité complexe en justifiant les approximations. Associer le caractère imaginaire pur de la conductivité complexe à l'absence de puissance échangée en moyenne temporelle entre le champ et les porteurs de charges. |
| Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu localement neutre possédant une conductivité complexe : relation de dispersion, indice complexe. Dispersion, absorption. | Établir une relation de dispersion pour des ondes planes progressives harmoniques. Associer les parties réelle et imaginaire de k aux phénomènes de dispersion et d'absorption. |
| Cas particulier d'une propagation unidirectionnelle dans un plasma sans collisions : onde évanescente dans le domaine réactif ($\omega < \omega p$) ; absence de propagation de l'énergie en moyenne temporelle. | Reconnaître une onde évanescente (onde stationnaire atténuée). |
| Cas particulier d'un conducteur ohmique de conductivité réelle : effet de peau. | Repérer une analogie formelle avec les phénomènes de diffusion. Connaître l'ordre |

| | |
|---|---|
| | de grandeur de l'épaisseur de peau du cuivre à 50Hz. |
| **2. Paquets d'ondes** | |
| 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. |

**3. Interfaces entre deux milieux :**

La partie 3 est consacrée à la réflexion et à la transmission d'ondes à une interface plane sous incidence normale en acoustique et en électromagnétisme.

On se limite 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.

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| Réflexion, 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 vitesses, des surpressions et des puissances acoustiques surfaciques moyennes. | Expliciter des conditions aux limites à une interface.<br>Établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion.<br>Associer l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance. |
| Réflexion d'une onde plane progressive harmonique entre deux demi-espaces d'indices complexes $n_1$ et $n_2$ sous incidence normale : coefficients de réflexion et de transmission du champ électrique.<br>Cas d'une interface vide-plasma. Coefficients de réflexion et de transmission en puissance.<br>Cas d'une interface vide-conducteur ohmique de conductivité réelle constante.<br><br>Cas d'une interface vide-conducteur ohmique dans le domaine optique visible. | Exploiter la continuité (admise) du champ électromagnétique dans cette configuration pour obtenir l'expression du coefficient de réflexion en fonction des indices complexes.<br><br>Distinguer les comportements dans le domaine de transparence et dans le domaine réactif du plasma.<br>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.<br><br>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. |

# IV Optique

La diffraction sera traitée dans les TP-cours, exclusivement sous forme expérimentale.

La réponse des récepteurs est 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 le mot « éclairement » sans chercher à les distinguer à ce niveau de formation.

La loi de Malus est admise.

Dans le cadre de l'optique, on qualifiera de plane ou sphérique une onde par référence à la forme des surfaces d'ondes.

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

| | |
|---|---|
| c) Récepteurs. Intensité. | Relier l'intensité à la moyenne temporelle du carré de la grandeur scalaire de l'optique.<br><br>Citer le temps de réponse de l'œil.<br>Choisir un récepteur en fonction de son temps de réponse et de sa sensibilité fournis. |
| **2. Superposition d'ondes lumineuses** | |
| Superposition de deux ondes quasimonochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel<br>$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} cos\phi$<br><br>Contraste. | Établir la formule de Fresnel. Citer la formule de Fresnel et justifier son utilisation par la cohérence des deux ondes.<br><br><br>Associer un bon contraste à des intensités $I_1$ et $I_2$ voisines. |
| Superposition de deux ondes incohérentes entre elles.<br>Battement | Justifier et utiliser l'additivité des intensités. |
| Superposition de N ondes quasimonochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique dans le cas N >> 1. | Utiliser un grapheur pour discuter l'influence de N sur la finesse sans calculer explicitement l'intensité sous forme compacte.<br>Utiliser la construction de Fresnel pour établir la condition d'interférences constructives et la demi-largeur 2π/N des franges brillantes. |

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

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| **3. Exemple de dispositif interférentiel par division du front d'onde : trous d'Young** | |
| 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.<br><br>Variations de p avec la position du point d'observation ; franges d'interférences.<br><br>Comparaison entre deux dispositifs expérimentaux : trous d'Young et fentes | Savoir que les franges ne sont pas localisées.<br>Définir, déterminer et utiliser l'ordre d'interférences.<br><br>Interpréter la forme des franges observées sur un écran éloigné parallèle au plan contenant les trous d'Young.<br><br>Confronter les deux dispositifs : analogies et différences. |

| | |
|---|---|
| d'Young.<br><br>Variation de p par rajout d'une lame à faces parallèles sur un des trajets.<br><br>Variations de p avec la position d'un point source ; perte de contraste par élargissement spatial de la source.<br><br>Variations de p avec la longueur d'onde. Perte de contraste par élargissement spectral de la source.<br><br>Observations en lumière blanche (blanc d'ordre supérieur, spectre cannelé). | <br><br>Interpréter la modification des franges.<br><br>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.<br><br>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.<br><br>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. |
| Diffraction : principe de Huygens-Fresnel. | Savoir que l'intensité diffractée par une fente est anisotrope. Cette anisotropie dépend du rapport $\lambda/a$, elle peut moduler l'intensité des maxima. |

Dans cette partie, l'étude de l'interféromètre de Michelson en lame d'air permet de confronter théorie et expérience.

L'étude de l'interféromètre de Michelson en coin d'air est abordée de manière exclusivement expérimentale.

Pour la modélisation d'un interféromètre de Michelson on suppose la séparatrice infiniment mince.

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

# V. Introduction à la physique du laser

| **1. Milieu amplificateur de lumière** | |
|---|---|
| Absorption, émission stimulée, émission spontanée. | Distinguer les propriétés d'un photon émis par émission spontanée ou stimulée. |
| Coefficients d'Einstein. | 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. |
| Amplificateur d'ondes lumineuses. | Justifier la nécessité d'une inversion de population. |
| **2. Obtention d'un oscillateur** | |
| Mise en œuvre électronique d'un oscillateur sur l'exemple de l'oscillateur à pont de Wien. | Exprimer la condition de bouclage sur un filtre sélectif.<br>Exprimer la condition d'oscillation. |
| Milieu amplificateur à l'intérieur d'un résonateur optique : le laser. | Associer la puissance émise à la limitation du gain par une non-linéarité. |
| **3. Propriétés optiques d'un faisceau spatialement limité** | |
| Approche descriptive :<br>Rôle de la diffraction dans l'ouverture angulaire du faisceau à grande distance. | Relier l'ouverture angulaire λ/a et le rayon minimal a. |
| Description simplifiée d'un faisceau de profil gaussien : longueur de Rayleigh LR. | Utiliser l'expression fournie du profil radial d'intensité en fonction de la distance axiale.<br>Construire l'allure d'un faisceau de profil gaussien à partir de l'enveloppe d'un |

| | |
|---|---|
| Utilisation d'une lentille pour transformer un faisceau cylindrique en faisceau conique et réciproquement | faisceau cylindrique de rayon a et d'un faisceau conique centré sur l'orifice de sortie du laser, et de demi-ouverture angulaire $\lambda/a$.<br><br>Exploiter la convergence angulaire du faisceau issue de l'optique géométrique, la loi du retour inverse, et le lien entre l'ouverture angulaire $\lambda/a$ et le rayon minimal a pour obtenir la dimension et la position de la section minimale. Montrer que le rayon minimal est de l'ordre de λ. Utiliser un élargisseur de faisceau pour réduire l'ouverture angulaire. |

# VI. Approche ondulatoire de la physique quantique

| Notions et contenus | Capacités exigibles |
|---|---|
| **1. Introduction au monde quantique** | |
| Dualité onde-particule pour la lumière et la matière.<br>Relations de Planck-Einstein et de Louis de Broglie. | Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.<br><br>**Approche documentaire :** décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.<br><br>**Approche documentaire :** décrire un exemple d'expérience illustrant la notion d'ondes de matière. |
| Interprétation probabiliste associée à la fonction d'onde : approche qualitative. | Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes. |
| Inégalité (indétermination) de Heisenberg spatiale. | À l'aide d'une analogie avec la diffraction des ondes lumineuses, établir l'inégalité en ordre de grandeur :<br>$\Delta p\ \Delta x \geq \hbar$. |

| | |
|---|---|
| **2. Amplitude de probabilité** | |
| Fonction d'onde ψ(x,t) associée à une particule dans un problème unidimensionnel. Densité linéique de | Normaliser une fonction d'onde. Faire le lien qualitatif avec la notion d'orbitale en chimie. |

| | |
|---|---|
| probabilité.<br><br>Principe de superposition. Interférences. | <br><br>Relier la superposition de fonctions d'ondes à la description d'une expérience d'interférences entre particules. |
| **3. Équation de Schrödinger pour une particule libre** | |
| Équation de Schrödinger.<br>États stationnaires.<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>Paquet d'ondes associé à une particule libre.<br>Relation $\Delta k_x \, \Delta x \geq 1/2$<br><br><br><br>Courant de probabilité associé à une particule libre. | Utiliser l'équation de Schrödinger fournie pour une particule non relativiste. Identifier les états stationnaires aux états d'énergie fixée.<br>Établir et utiliser la relation :<br>$\psi(x,t) = \phi(x) \exp(-iEt/\hbar)$ et l'associer à la relation de Planck-Einstein.<br>Distinguer l'onde associée à un état stationnaire en mécanique quantique d'une onde stationnaire au sens usuel de la physique des ondes.<br>Utiliser l'équation de Schrödinger pour la partie spatiale $\phi(x)$.<br>En exploitant l'expression classique de l'énergie de la particule libre, associer la relation de dispersion obtenue et la relation de de Broglie.<br><br>Identifier vitesse de groupe et vitesse de la particule. Faire le lien avec l'inégalité de Heisenberg spatiale.<br><br>Utiliser l'expression admise $J = \lvert\Psi\rvert^2 \frac{\hbar k}{m}$ et l'interpréter comme produit densité*vitesse. |
| **4. Équation de Schrödinger dans un potentiel V(x) uniforme par morceaux** | |
| Quantification de l'énergie dans un puits de potentiel rectangulaire de profondeur infinie.<br><br><br><br><br><br><br>Énergie de confinement quantique. | 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.<br>Retrouver qualitativement l'énergie minimale à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale.<br><br>Associer le confinement d'une particule quantique à une augmentation de l'énergie cinétique. |
| Quantification de l'énergie des états liés dans un puits de profondeur finie.<br>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 $\phi$ et $d\phi/dx$.<br>Associer la quantification de l'énergie au caractère lié de la particule. Mener une |

| | |
|---|---|
| | discussion graphique.<br>Interpréter qualitativement, à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale, l'abaissement des niveaux d'énergie par rapport au puits de profondeur infinie. |
| **5. Effet tunnel** | |
| Notions sur l'effet tunnel.<br><br><br>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.<br>Exprimer le coefficient de transmission comme un rapport de courants de probabilités.<br>**Approche documentaire de la radioactivité alpha:**<br>- utiliser une expression fournie du coefficient de transmission pour analyser des documents scientifiques ;<br>- expliquer le rôle de l'effet tunnel dans la radioactivité alpha.<br><br>**Approche documentaire de la microscopie à effet tunnel :**<br>- utiliser une expression fournie du coefficient de transmission pour analyser des documents scientifiques ;<br>- expliquer la sensibilité à la distance de cette méthode d'observation des surfaces. |
| **Approche descriptive** : Double puits symétrique.<br>Étude des deux premiers états stationnaires : symétrique et antisymétrique.<br>Évolution temporelle d'une superposition de ces deux états. | Exploiter les diagrammes d'énergie et faire le lien avec la chimie.<br>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. |

# VII. Thermodynamique

Les principes de la thermodynamique peuvent être écrits sous forme infinitésimale $dU + dE_c = \delta W + \delta Q$ 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 <u>on néglige la convection</u>. La mise en équation de la diffusion thermique est limitée au cas des solides. Par ailleurs on néglige le rayonnement thermique qui fait l'objet d'une approche documentaire. 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. 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.

| **1. Systèmes ouverts en régime stationnaire** | |
|---|---|
| Premier et deuxième principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire, dans le seul cas d'un écoulement unidimensionnel dans la section d'entrée et la section de sortie. | Établir les relations $\Delta h+\Delta e = w_u+q$ et $\Delta s=s_e+s_c$ et les utiliser pour étudier des machines thermiques réelles à l'aide de diagrammes thermodynamiques (T,s) et (P,h). |
| **2. Diffusion de particules** | |
| Vecteur densité de flux de particules $j_N$. | Exprimer le nombre de particules traversant une surface en utilisant le vecteur $j_N$ |
| 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. |
| **3. Diffusion thermique** | |
| Vecteur densité de flux thermique $j_Q$ | Exprimer le flux thermique à travers une surface en utilisant le vecteur $j_Q$. |
| 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. |
| **4. Rayonnement thermique** | |
| 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. |

# Partie II : Formation expérimentale

Cette partie présente l'ensemble des capacités expérimentales nouvelles que les étudiants doivent acquérir au cours de la deuxième année des classes préparatoires de la section PC durant les séances de travaux pratiques.
Les étudiants doivent avoir conscience de la variabilité des résultats obtenus lors d'un processus de mesure, en connaître les origines, comprendre et s'approprier ainsi de l'évaluation des incertitudes.
L'étudiant doit être capable d'exprimer le résultat d'une mesure par une valeur et une incertitude associée à un niveau de confiance.

| Nature et méthodes | Capacités exigibles |
|---|---|
| **1. Mesures de longueurs et d'angles** | |
| Caractéristiques spatiales d'un émetteur (ondes lumineuses, ondes acoustiques, ondes centimétriques…) | Construire l'indicatrice de rayonnement.<br>Étudier la dépendance par rapport à la distance au récepteur. |
| **2. Electricité** | |
| Mise en œuvre électronique d'un oscillateur sur l'exemple de l'oscillateur à pont de Wien. | Exprimer la condition de bouclage sur un filtre sélectif.<br>Mettre en évidence le rôle des non linéarités.<br>Exprimer la condition d'oscillation.<br><br>Associer la puissance émise à la limitation du gain par une non-linéarité. |
| Élaborer un signal électrique analogique modulé en fréquence | Utiliser la fonction de commande externe de la fréquence d'un GBF par une tension (VCF). |
| Mesure indirecte des fréquences et des périodes: par comparaison avec une fréquence connue voisine, en utilisant une détection« synchrone ».<br><br>Analyse spectrale. | Réaliser une détection « synchrone » élémentaire à l'aide d'un multiplieur et d'un passe-bas simple adapté à la mesure. |
| **3. Optique** | |
| Analyser une lumière complètement polarisée.<br>Polarisation par réflexion vitreuse sous incidence oblique. | Identifier l'incidence de Brewster et utiliser cette configuration pour repérer la direction absolue d'un polariseur.<br>Identifier les lignes neutres d'une lame quart d'onde ou demi-onde, sans distinction entre axe lent et rapide.<br>Modifier la direction d'une polarisation rectiligne.<br>Obtenir une polarisation circulaire à partir d'une polarisation rectiligne, sans |

| | |
|---|---|
| | prescription sur le sens de rotation.<br>Mesurer un pouvoir rotatoire naturel. |
| Dispositif des fentes d'Young.<br><br><br><br>Interféromètre de Michelson<br>Étudier la cohérence temporelle d'une source.<br><br><br><br><br><br>Mesurer une faible différence de nombre d'onde : doublet spectral. Battement<br><br><br><br><br><br><br><br><br><br><br>Interféromètre de Michelson équivalent à un coin d'air éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (constatée) des franges. Franges d'égale épaisseur. | Effet d'élargissement de la source<br>Observations en lumière blanche (blanc d'ordre supérieur, spectre cannelé).<br><br>Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue par une démarche autonome non imposée.<br><br><br><br>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.<br>Réaliser la mesure avec un interféromètre de Michelson.<br>Déterminer une différence relative de fréquence à partir d'enregistrements de battements ou d'observation sensorielle directe.<br><br>Décrire et mettre en œuvre les conditions d'éclairage et d'observation.<br>Observations en lumière blanche.<br>Déterminer les longueurs d'ondes des cannelures. |
| Diffraction à l'infini.<br><br><br><br>Principe de Huygens-Fresnel. Diffraction à l'infini d'une onde plane par une pupille rectangulaire fine.<br><br><br><br><br><br><br>Réseau d'extension infinie de coefficient de transmission t(X) sinusoïdal et de pas supérieur à la longueur d'onde. Plan de Fourier. | Réaliser un montage utilisant deux lentilles convergentes, pour l'observation de la figure de diffraction de Fraunhofer.<br><br>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.<br><br><br><br>Interpréter les observations dans le plan de Fourier. |

| | |
|---|---|
| Réseau d'extension latérale infinie de N traits parallèles équidistants. Fréquence spatiale. | Relier une fréquence spatiale du spectre de la mire à la position d'un point du plan de Fourier. Relier l'amplitude de l'onde en ce point à la composante du spectre de Fourier correspondant. Interpréter les observations dans le plan de Fourier. |
| Filtrage optique | Utiliser l'analyse de Fourier pour interpréter les effets d'un filtrage de fréquences spatiales dans le plan de Fourier |
| **4. Mécanique** | |
| Mesurer un coefficient de tension superficielle. | |
| *Décrire une onde stationnaire observée par stroboscopie sur la corde de Melde.* | Détermination des modes propres, mesure de la célérité de propagation des ondes pour différentes tensions appliquées et cordes. |
| *Mesure du décalage des fréquences acoustiques : effe*t Doppler. | Décrire et mettre en œuvre un protocole de détection « synchrone » pour mesurer une vitesse par décalage Doppler |

## LISTE DE MATERIEL

Cette liste regroupe le matériel que les étudiants doivent savoir utiliser.

**1. Domaine optique**

- Goniomètre
- Viseur à frontale fixe
- Lunette auto-collimatrice
- Spectromètre à fibre optique
- Polariseur dichroïque
- Laser à gaz
- Lampes spectrales
- Source de lumière blanche à condenseur
- Lames quart d'onde, lames demi-onde
- Réseau de coefficient de transmission sinusoïdal
- Interféromètre de Michelson motorisé
- Capteur CCD

**2. Domaine électrique**

- Oscilloscope numérique avec analyseur de spectre
- Carte d'acquisition et logiciel dédié
- Générateur de signaux Basse Fréquence avec fonction de commande externe de la fréquence par une tension
- Multimètre numérique
- Multiplieur analogique
- Émetteur et récepteur acoustique (domaine audible et domaine ultrasonore)

**3. Domaines mécanique et thermodynamique**

- Dynamomètre

- Vibreur pour la corde de Melde
- Capteur de pression
- Accéléromètre
- Stroboscope
- Webcam avec logiciel dédié
- Appareil photo numérique ou caméra numérique avec cadence de prise de vue supérieure à 100 images par seconde.
- Thermomètre, thermocouple, thermistance, capteur infra-rouge
- Calorimètre

# Partie III : Formation documentaire

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 savoirs faire par l'exploitation de ressources et de documents scientifiques variés (texte, vidéo, photo...). Cette approche permet d'acquérir des éléments de culture dans le domaine de la physique moderne.

Les approches documentaires essentielles sont les suivants :

- Reconnaître un facteur de Boltzmann ; comparer $k_B T$ aux écarts d'énergie dans un contexte plus général.
- Décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon
- Décrire un exemple d'expérience illustrant la notion d'ondes de matière.
- La radioactivité alpha: expliquer le rôle de l'effet tunnel dans la radioactivité alpha.
- Utiliser une expression fournie du coefficient de transmission de l'effet tunnel pour analyser des documents scientifiques
- la microscopie à effet tunnel : utiliser une expression fournie du coefficient de transmission pour analyser des documents scientifiques. Expliquer la sensibilité à la distance de cette méthode d'observation des surfaces.

Voici certains sites sur lesquels on trouve quelques sujets :

http://physiquecarnotsupiv.blog.free.fr/index.php?post/2013/09/10/Approche-documentaire

https://www.ac-paris.fr/portail/jcms/p1_639585/presentation-approches-documentaires-cpge

http://eduscol.education.fr/physique-chimie/enseigner/ressources-par-niveau-et-programme/post-bac/cpge/cpge-2e-annee.html

# Répartition horaire

| Cours | TD | TP | Total |
|---|---|---|---|
| 5 | 2 | 2 | 8 |

Le cours de physique en seconde année de la section PC s'appuie sur un programme vaste, destiné à fournir une formation très complète intégrant presque tous les grands domaines de la physique. Elle se compose de cinq grandes parties :

- **Mécanique : 5 semaines**
  - Cinématique des fluides
  - Dynamique et statique des fluides

- **Electromagnétisme : 2 semaines**
  - Equations de Maxwell

- **Optique ondulatoire : 4 semaines**
  - Ondes lumineuses
  - Dispositifs interférentiels

- **Physique des ondes : 11 semaines**
  - Equation de D'Alembert unidimensionnelle
  - Ondes sonores dans les fluides
  - Ondes électromagnétiques dans le vide
  - Phénomènes de propagation linéaires
  - Physique quantique et Laser

- **Thermodynamique : 4 semaines**
  - Systèmes ouverts en régime stationnaire
  - Diffusion de particules
  - Diffusion thermique