

# PHYSIQUE DES ONDES (1)

## Capacités exigibles à rédiger

### 0. PCSI : ondes – quantique

- (1) Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique et électromagnétique. Écrire et interpréter les signaux sous la forme  $f(t - x/c)$  ou  $g(t + x/c)$ . Prévoir dans le cas d'une onde progressive pure l'évolution temporelle à position fixée, et prévoir la forme à différents instants. Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.
- (2) Interférence de deux ondes sinusoïdales synchrones : déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage. Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives.
- (3) Interférence de deux ondes lumineuses sinusoïdales synchrones : exemple du dispositif des trous d'Young éclairé par une source lumineuse monochromatique. Relier le déphasage entre les deux ondes à la différence de chemin optique. Établir l'expression littérale de la différence de chemin optique entre les deux ondes. Exploiter la formule de Fresnel fournie pour décrire la répartition de l'intensité lumineuse.
- (4) Superposition de deux ondes sinusoïdales de fréquences voisines : déterminer une différence relative de fréquence à partir d'enregistrements de battements ou d'observation sensorielle directe.
- (5) Ondes stationnaires mécanique sur une corde vibrante : caractériser une onde stationnaire par l'existence de nœuds et de ventres de vibration. Exprimer les fréquences des modes propres connaissant la célérité des ondes et la longueur de la corde.
- (6) Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques. 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. Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes.
- (7) Dualité onde-corpuscule. Lumière : relations de Planck-Einstein pour l'énergie/fréquence et la quantité de mouvement (impulsion)/longueur d'onde d'un photon. Matière : relations de de Broglie pour l'énergie/fréquence et l'impulsion/longueur d'onde d'un quanton.
- (8) À l'aide d'une analogie avec la diffraction des ondes lumineuses, établir l'inégalité en ordre de grandeur :  $\Delta p \Delta x \geq \hbar$  (inégalité de Heisenberg spatiale). Exploiter l'inégalité de Heisenberg spatiale pour mettre en évidence une énergie minimale de confinement. Obtenir les niveaux d'énergie (d'une particule libre confinée à 1D) par analogie avec les modes propres d'une corde vibrante. Établir le lien qualitatif entre confinement spatial et quantification.

## 1. Propagation non dispersive 1D

- (9) Corde vibrante : établir l'équation d'onde en utilisant des systèmes infinitésimaux. Définir une onde longitudinale et une onde transversale. Identifier une équation de d'Alembert. Exprimer la célérité en fonction des paramètres du milieu.
- (10) Décrire le modèle du câble coaxial sans pertes modélisé comme un milieu continu caractérisé par une inductance linéique et une capacité linéique. Établir les équations de propagation.
- (11) Définir une onde progressive et une onde stationnaire. Établir la relation de dispersion à partir de l'équation de d'Alembert. Utiliser la notation complexe. Définir le vecteur d'onde, la vitesse de phase pour une onde progressive sinusoïdale. Retrouver la distance égale à  $\frac{\lambda}{2}$  entre deux nœuds consécutifs ou entre deux ventres consécutifs pour une onde stationnaire sinusoïdale. Décomposer une onde stationnaire en ondes progressives, une onde progressive en ondes stationnaires.
- (12) Justifier et exploiter des conditions aux limites. Définir et décrire les modes propres. Construire une solution quelconque par superposition de modes propres. Associer mode propre en régime libre et résonance en régime forcé.
- (13) Établir l'expression de l'impédance caractéristique d'un câble coaxial. Étudier la réflexion en amplitude de tension pour une impédance terminale nulle, infinie ou résistive.

## 2. Dispersion et atténuation

- (14) Identifier et illustrer le caractère linéaire d'une équation aux dérivées partielles de propagation sur un exemple au choix. Établir la relation de dispersion. Lier la partie réelle de  $\underline{k}$  à la vitesse de phase, la partie imaginaire de  $\underline{k}$  à une dépendance spatiale de l'amplitude. Définir la notion de milieu dispersif.
- (15) Calculer 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. Énoncer et exploiter la relation entre les ordres de grandeur de la durée temporelle d'un paquet d'onde et la largeur fréquentielle de son spectre.
- (16) Établir la relation de dispersion des ondes thermiques en géométrie unidirectionnelle. Mettre en évidence le déphasage lié à la propagation d'une onde thermique. Établir une distance caractéristique d'atténuation d'une onde thermique.

## 3. Ondes acoustiques

- (17) Classer les ondes sonores par domaines fréquentiels. Justifier les hypothèses de l'approximation acoustique par des ordres de grandeur. En comparant l'amplitude du déplacement à la longueur d'onde, montrer que l'accélération de la particule de fluide s'écrit  $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$  lorsque  $v \ll c$ .

- (18) Écrire les trois équations locales linéarisées. Déterminer l'équation de propagation de la surpression dans une situation unidirectionnelle en coordonnées cartésiennes. Utiliser sa généralisation admise à trois dimensions avec l'opérateur laplacien. Exprimer la célérité en fonction de la température pour un gaz parfait. Citer les ordres de grandeur de la célérité pour l'air et pour l'eau.
- (19) Commenter l'expression de la surpression  $p(r, t) \propto \frac{1}{r} \cos\left(\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right)$  générée par une sphère pulsante. En relation avec la diffraction, discuter la validité du modèle de l'onde plane en comparant la dimension latérale à la longueur d'onde.
- (20) Onde sonore plane progressive : décrire le caractère longitudinal de l'onde sonore ; établir et utiliser l'impédance acoustique (relation de structure). Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques.
- (21) Utiliser les expressions admises du vecteur densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde. Définir l'intensité acoustique en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  et le niveau sonore en décibels. Citer quelques ordres de grandeur (minimum d'audition, seuil de douleur, conversation).
- (22) Expliciter les conditions aux limites à une interface. Établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion en amplitude de surpression, en amplitude de vitesse ou en puissance. Relier l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance. Décrire la mise en œuvre des ondes ultrasonores pour l'échographie médicale.
- (23) Décrire et mettre en œuvre une détection hétérodyne pour mesurer une vitesse par décalage Doppler.