A-1.6 Propagation d'un signal

- Exemples de signaux.

  Signal sinusoïdal.

  Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.

- Approche qualitative de la superposition de deux signaux sinusoïdaux de fréquences voisines.

  Battements.

  Déterminer une différence de fréquences à partir d'enregistrements de battements ou d'observation sensorielle directe.

- **Propagation d'un signal dans un milieu illimité, non dispersif et transparent.**

  Onde progressive dans le cas d'une propagation unidimensionnelle linéaire non dispersive. Célérité, retard temporel.

  Écrire les signaux sous la forme $f(t - x/c)$ ou $g(t + x/c)$.

  Écrire les signaux sous la forme $f(x - ct)$ ou $g(x + ct)$.

  Prévoir dans le cas d'une onde progressive pure l'évolution temporelle à position fixée, et prévoir la forme à différents instants.

- Modèle de l'onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle. Vitesse de phase, déphasage, double périodicité spatiale et temporelle. Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique, mécanique et électromagnétique.

  Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de phase.

  Relier le déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation..

  Mesurer la célérité, la longueur d'onde et le déphasage dû à la propagation d'un phénomène ondulatoire.

- Milieux dispersifs ou non dispersifs.

  Définir un milieu dispersif.

  Citer des exemples de situations de propagation dispersive et non dispersive.

- **Phénomène d'interférences**

  Interférences de deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence.

  Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives.

  Déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage.

  Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser le phénomène d'interférences de deux ondes.

- Interférences entre deux ondes lumineuses de même fréquence.

  Exemple du dispositif des trous d'Young éclairé par une source monochromatique.

  Différence de chemin optique.

  Conditions d'interférences constructives ou destructives. Formule de Fresnel.

  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 d'intensité lumineuse.

- **Ondes stationnaires mécaniques.**

  Modes propres.

  Caractériser une onde stationnaire par l'existence de nœuds et de ventres.

  Exprimer les fréquences des modes propres connaissant la célérité et la longueur de la corde.

  Utiliser la propriété énonçant qu'une vibration quelconque d'une corde accrochée entre deux extrémités fixes se décompose en modes propres.

  Relier les notions sur les ondes stationnaires avec celles utilisées en musique.

B-1.8 Introduction au monde quantique

- **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.
  Établir par analogie avec la diffraction des ondes lumineuses, l'inégalité en ordre de grandeur : $\Delta p \Delta x \geq \hbar$.
- **Quantification de l'énergie**
  Modèle planétaire de Bohr. Limites. Exploiter l'hypothèse de quantification du moment cinétique orbital pour obtenir l'expression des niveaux d'énergie électronique de l'atome d'hydrogène.
- 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..

5-Ondes-1.1 Ondes mécaniques unidimensionnelles dans les solides déformables

- 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.
- Domaine d'élasticité d'un solide : module d'Young, loi de Hooke.
  Exploiter le modèle de la chaîne d'atomes élastiquement liés pour relier le module d'Young d'un solide élastique à ses caractéristiques microscopiques.
- Ondes mécaniques longitudinales dans une tige solide dans l'approximation des milieux continus.
  Établir l'équation d'onde décrivant les ondes mécaniques longitudinales dans une tige solide.
- Équation de d'Alembert ; célérité.
  Identifier l'équation de d'Alembert.
  Relier qualitativement la célérité d'ondes mécaniques, la raideur et l'inertie du milieu support.
- 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.

5-Ondes-1.2 Ondes acoustiques dans les fluides

- Approximation acoustique. Équation de d'Alembert pour la surpression.
  Classifier les ondes acoustiques par domaines fréquentiels.
  Valider l'approximation acoustique.
  Établir, par une approche eulérienne, l'équation de propagation de la surpression acoustique dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes.
  Utiliser l'opérateur laplacien pour généraliser l'équation d'onde.
- Célérité des ondes acoustiques.
  Exprimer la célérité des ondes acoustiques en fonction de la température pour un gaz parfait.
- 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.
- Densité volumique d'énergie acoustique, vecteur densité de courant énergétique. Intensité sonore. Niveau d'intensité sonore.
  Utiliser les expressions admises du vecteur densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde.
  Citer quelques ordres de grandeur de niveaux d'intensité sonore.
- Ondes acoustiques harmoniques sphériques.
  Utiliser une expression fournie de la surpression pour interpréter par un argument énergétique la décroissance en $1/r$ de l'amplitude.

5-Ondes-1.3 Ondes électromagnétiques dans le vide

- Équations de propagation d'un champ électromagnétique dans une région sans charge ni courant.
  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 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.
  Interpréter le flux du vecteur de Poynting en termes particulaires. 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

5-Ondes-6.2,1 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 propa-

gation en utilisant des ondes de la forme $\exp \pm j(kx - \omega t)$.

Distinguer différents types de comportements selon la valeur de la pulsation.

- Dispersion, absorption.

  Associer les parties réelle et imaginaire de $\underline{k}$ aux phénomènes de dispersion et d'absorption

- Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu non absorbant et faiblement dispersif : vitesse de phase et vitesse de groupe.

  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.

  Déterminer la vitesse de groupe d'un paquet d'ondes à partir de la relation de dispersion.

  Associer la vitesse de groupe à la propagation de l'enveloppe du paquet d'ondes.

5-Ondes-6.2,2 **Ondes électromagnétiques dans les milieux matériels**

- Propagation d'une onde électromagnétique plane harmonique unidirectionnelle dans un conducteur ohmique de conductivité réelle.

  Effet de peau dans un conducteur ohmique.

  Identifier une analogie avec un phénomène de diffusion.

  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.

- Propagation d'une onde électromagnétique plane harmonique transverse et unidirectionnelle dans un plasma dilué.

  Conductivité électrique complexe.

  Justifier la neutralité électrique locale du plasma en présence d'une onde transverse.

  Établir l'expression de la conductivité électrique complexe du plasma.

  Interpréter énergétiquement le caractère imaginaire pur de la conductivité électrique complexe du plasma.

- Relation de dispersion. Pulsation plasma.

  Domaine de transparence.

  Domaine réactif, onde évanescente. Établir la relation de dispersion des ondes planes progressives harmoniques transverses.

  Exprimer la vitesse de phase et la vitesse de groupe d'un paquet d'ondes dans le domaine de transparence du plasma.

  Interpréter la pulsation plasma comme une pulsation de coupure.

  Citer les caractéristiques d'une onde stationnaire évanescente.

  Justifier que, dans le domaine réactif, une onde électromagnétique harmonique ne transporte aucune puissance en moyenne.

5-Ondes-6.3 **Interfaces entre deux milieux**

- 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.

  Établir les expressions des coefficients de transmission et de réflexion.

  Associer l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance.

- Réflexion d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique polarisée rectilignement à l'interface entre entre milieux d'indices complexes $\underline{n}_1$ et $\underline{n}_2$ dans le cas d'une incidence normale : coefficients de réflexion et de transmission du champ électrique.

Exploiter la continuité admise du champ électromagnétique dans cette configuration pour obtenir l'expression du coefficient de réflexion en fonction des indices complexes.

Utiliser les expressions des coefficients de réflexion et de transmission du champ électrique dans des situations variées.

Établir et interpréter les expressions des coefficients de réflexion et de transmission en puissance dans le cas d'une interface entre deux milieux diélectriques linéaires, homogènes, isotropes et transparents. .

5-Ondes-6.4 Introduction à la physique du laser

- 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 par émission stimulée.
  Justifier qualitativement la nécessité d'une inversion de population pour parvenir à amplifier une onde électromagnétique dans un laser..
- Description simplifiée d'un faisceau de profil gaussien : waist, longueur de Rayleigh, ouverture angulaire
  . Justifier qualitativement l'inadéquation du modèle de l'onde plane pour décrire un faisceau laser.
  Utiliser l'expression fournie du profil radial d'intensité.
  Construire l'allure d'un faisceau de profil gaussien à partir de l'enveloppe d'un faisceau cylindrique et d'un faisceau conique.
  Exploiter qualitativement le phénomène de diffraction pour relier le waist et l'ouverture angulaire du faisceau à grande distance.
- Transformation à l'aide d'une lentille d'un faisceau cylindrique en faisceau conique et réciproquement.
  Élargisseur de faisceau.
  Déterminer la dimension et la position de la section minimale du faisceau émergeant d'une lentille éclairée par un faisceau cylindrique..

5-Ondes-6.5 Approche ondulatoire de la mécanique quantique

- **Amplitude de probabilité** : fonction d'onde $\psi(x,t)$ associée à une particule dans un problème unidimensionnel.
  Densité linéique de probabilité de présence.
  Normaliser une fonction d'onde.
  Relier qualitativement la fonction d'onde à la notion d'orbitale en chimie.
- Principe de superposition. Interférences.
  Relier la superposition de fonctions d'ondes à la description d'une expérience d'interférences entre particules.
- **Équation de Schrödinger pour une particule libre**.
  Utiliser l'équation de Schrödinger fournie.
- États stationnaires.
  Associer les états stationnaires aux états d'énergie déterminée.
  Établir et utiliser la relation : $\psi(x,t) = \varphi(x)\exp(-\mathrm{iEt}/\hbar)$ pour la fonction d'onde d'un état stationnaire et l'associer à la relation de Planck-Einstein.
  Distinguer l'onde associée à un état stationnaire en mécanique quantique

d'une onde stationnaire au sens usuel de la physique des ondes.

- Paquet d'ondes associé à une particule libre.
  Relation $\Delta k_x \Delta x \geq 1/2$.
  Utiliser l'équation de Schrödinger pour déterminer la partie spatiale $\varphi(x)$ des fonctions d'onde stationnaires décrivant une particule libre. Identifier la vitesse d'une particule libre et la vitesse du paquet d'ondes la décrivant.
  Exploiter l'inégalité de Heisenberg pour relier l'étendue spatiale et l'étendue spectrale du paquet d'ondes décrivant une particule libre.
- Courant de probabilité associé à une particule libre.
  Utiliser l'expression admise $\overrightarrow{J} = |\psi|^2 \dfrac{\hbar \overrightarrow{k}}{m}$ du courant de probabilité associé à une particule libre et l'interpréter comme produit densité*vitesse.
- **Équation de Schrödinger dans un potentiel $V(x)$ uniforme par morceaux.**
  Quantification de l'énergie dans un puits de potentiel rectangulaire de profondeur infinie.
  Établir les expressions des énergies des états stationnaires.
  Retrouver qualitativement l'énergie minimale à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale.
- Énergie de confinement quantique.
  Associer le confinement d'une particule quantique à une augmentation de l'énergie cinétique.
- Évolution temporelle d'une particule confinée dans une superposition d'états.
  Mettre en évidence les oscillations d'une particule dont la fonction d'onde s'écrit comme la superposition de deux états stationnaires et relier la fréquence d'oscillation à la différence des énergies.
- Quantification de l'énergie des états liés un puits de profondeur finie.
  Élargissement effectif du puits par les ondes évanescentes.
  Décrire la forme des fonctions d'onde dans les différents domaines.
  Utiliser les conditions aux limites admises : continuité de φ et $d\varphi/dx$.
  Associer la quantification de l'énergie au caractère lié de la particule.
  Mener une discussion graphique.
  Interpréter qualitativement, à partir de l'inégalité de Heisenberg spatiale, l'abaissement des niveaux d'énergie par rapport au puits de profondeur infinie.
- **Effet tunel.**
  Coefficient de transmission associé à une particule libre incidente sur une barrière de potentiel.
  Citer quelques applications de l'effet tunnel.
  Définir le coefficient de transmission comme un rapport de courants de probabilités.
  Utiliser une expression fournie du coefficient de transmission à travers une barrière de potentiel.