Validation des compétences

Notions et contenus	Capacités exigibles = « Je dois être capable de… »

Physique des ondes

1. Phénomènes de propagation non dispersifs : Equation de D'Alembert

Propagation unidimensionnelle

Ondes transversales sur une corde vibrante infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements transverses.	Établir l'équation d'onde en utilisant des systèmes infinitésimaux.
Équation de d'Alembert.	Identifier une équation de d'Alembert. Exprimer la célérité en fonction des paramètres du milieu.
Exemples de solutions de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle. Ondes progressives harmoniques. Ondes stationnaires harmoniques.	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. Décomposer une onde stationnaire en ondes progressives, une onde progressive en ondes stationnaires.
Conditions aux limites. Régime libre : modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. Régime forcé : résonances de la corde de Melde.	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 et résonance en régime forcé.
Ondes de tension et de courant dans un câble coaxial sans pertes modélisé comme un milieu continu caractérisé par une inductance linéique et une capacité linéique. Impédance caractéristique. Réflexion en amplitude sur une impédance terminale	Décrire le modèle. Établir les équations de propagation. 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.**

Ondes sonores dans les fluides

Approximation acoustique.	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 $v \ll c$. Écrire les trois équations locales linéarisées.
Équation de d'Alembert pour la surpression.	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.
Célérité.	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.
Densité volumique d'énergie sonore, vecteur densité de courant énergétique. Intensité acoustique, niveau 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. Définir l'intensité acoustique en $W.m^{-2}$ et le niveau sonore en décibels. Citer quelques ordres de grandeur (minimum d'audition, seuil de douleur, conversation).
Ondes planes progressives harmoniques. Impédance acoustique définie comme le rapport de la surpression sur le débit volumique ou comme le rapport de la surpression sur la vitesse.	En relation avec la diffraction, discuter la validité du modèle de l'onde plane en comparant la dimension latérale à la longueur d'onde. Décrire le caractère longitudinal de l'onde sonore. Établir et utiliser l'impédance acoustique. Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques.
Onde sonore sphérique.	Commenter l'expression de la surpression $p(r,t) \alpha \frac{1}{r} \cos\left(\omega\left(t-\frac{r}{c}\right)\right)$ générée par une sphère pulsante.
Effet Doppler	**Mettre en œuvre une détection hétérodyne pour mesurer une vitesse par décalage Doppler.**

Vecteur de Poynting de l'énergie électromagnétique dans un milieu quelconque

Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting. Équation locale de Poynting.	Identifier les différents termes de l'équation locale de Poynting. Interpréter le vecteur de Poynting comme le vecteur densité de flux de puissance électromagnétique.

Ondes électromagnétiques dans le vide

Propagation de $\vec{E}$ et $\vec{B}$ dans une région sans charge ni courant.	Citer les domaines du spectre des ondes électromagnétiques et leur associer des applications.

	Établir les équations de propagation.
Structure d'une onde plane progressive harmonique.	Utiliser la notation complexe. Représenter le trièdre $(\vec{u}, \vec{E}, \vec{B})$. Établir la relation entre les amplitudes des champs. Associer la direction du vecteur de Poynting et la direction de propagation de l'onde. Associer 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…) et les relier aux ordres de grandeur des champs électriques associés. Utiliser le principe de superposition d'ondes planes progressives harmoniques.
Polarisation rectiligne.	Identifier l'expression d'une onde électromagnétique plane progressive polarisée rectilignement. **Utiliser des polariseurs et étudier quantitativement la loi de Malus.**

2. Phénomènes de propagation linéaires : Absorption et dispersion

Relation de dispersion

Forme générique des solutions progressives sinusoïdales : $y = y_0 e^{i(\omega t \pm \underline{k} x)}$	Identifier le caractère linéaire d'une équation aux dérivées partielles de propagation. Établir la relation de dispersion. Lier la partie réelle de *k* à la vitesse de phase, la partie imaginaire de *k* à une dépendance spatiale de l'amplitude.

Paquet d'ondes

Superposition de deux ondes de fréquences proches dans un milieu non absorbant et dispersif.	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. **Capacite numérique : à l'aide d'un langage de programmation, simuler la propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu dispersif et visualiser le phénomène d'étalement.**
Domaine spectral d'un paquet d'onde de durée finie.	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.

Ondes électromagnétiques dans des milieux conducteurs

Cas d'un conducteur ohmique de conductivité réelle : effet de peau. Modèle du conducteur parfait en présence d'un champ électromagnétique variable.	Repérer une analogie formelle avec les phénomènes de diffusion. Établir la relation de dispersion. Associer l'atténuation de l'onde à une dissipation d'énergie. Citer l'ordre de grandeur de l'épaisseur de peau du cuivre à 50 Hz. Justifier que les champs électrique et magnétique sont nuls dans le conducteur.
Interaction entre une onde plane progressive harmonique et un plasma localement neutre peu dense. Conductivité imaginaire pure. Interprétation énergétique. Équation de propagation dans le plasma. Onde plane progressive harmonique dans le plasma. Onde évanescente dans le domaine réactif ; absence de propagation de l'énergie.	Décrire le modèle de la conduction électrique dans un plasma. Construire une conductivité complexe en justifiant les approximations. Associer le caractère imaginaire pur de la conductivité complexe à l'absence de puissance échangée entre le champ et les porteurs. Établir la relation de dispersion dans le plasma. Identifier une onde évanescente (onde stationnaire spatialement amortie). Expliquer la notion de fréquence de coupure et donner son ordre de grandeur dans le cas de l'ionosphère.

3. Interfaces entre deux milieux

Cas des ondes sonores

Réflexion, transmission d'une onde sonore 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 sonores.	Expliciter des 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.

Cas des ondes électromagnétiques

Relations de passage du champ électromagnétique en présence d'une distribution surfacique de charge ou de courant.	Interpréter le vecteur densité de courant surfacique comme un modèle pour décrire un déplacement de charges à travers un domaine d'épaisseur faible devant l'échelle de description. Utiliser les relations de passage fournies.
Réflexion d'une onde électromagnétique polarisée rectilignement sur un conducteur parfait, en incidence normale.	Exploiter la continuité de la composante tangentielle du champ électrique pour justifier l'existence d'une onde réfléchie et calculer celle-ci. Calculer le champ magnétique dans le vide, en déduire le courant surfacique sur le conducteur. Calculer le coefficient de réflexion en puissance. Déterminer la pression de radiation à l'aide de l'expression fournie de la force de Laplace.