PHYSIQUE DES ONDES 1

PO1 : PROPAGATION NON DISPERSIVE A 1 DIMENSION.

CORDE VIBRANTE ET CABLE COAXIAL.

1. Equation de d'Alembert 1D

1.1. *Ondes transversales sur une corde infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements*

- Equations de couplage
- Equation de d'Alembert 1D ; célérité des ondes transversales.

1.2. *Ondes de tension et de courant dans un câble coaxial sans pertes*

- Equations de couplage
- Equations de d'Alembert 1D ; célérité des ondes de tension et de courant.

2. Solutions progressives et stationnaires de l'équation de d'Alembert 1D

1.1. *Solution générale en ondes progressives*

1.2. *Ondes progressives harmoniques*

- Double périodicité
- Notation complexe
- Vecteur d'onde
- Relation de dispersion
- Vitesse de phase

1.3. *Solutions en ondes stationnaires*

- Construction d'une onde stationnaire harmonique par réflexion totale d'une onde progressive harmonique
- Nœuds et ventres de vibration
- Recherche des solutions stationnaires par séparation des variables

1.4. *Equivalence a priori des deux familles de solutions*

3. Conditions aux limites : modes propres et résonances.

3.1. *Régime libre : modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités.*

- Recherche des solutions stationnaires harmoniques compatibles avec les CL : modes propres.
- Construction d'une vibration arbitraire par superposition de modes propres. Rôle des conditions initiales.

3.2. *Régime sinusoïdal forcé : résonances de la corde de Melde.*

4. Impédance et phénomène de réflexion

4.1. *Impédance caractéristique d'un câble coaxial parcouru par une onde* *progressive*

4.2. *Réflexion en amplitude sur une impédance terminale*

- Régime sinusoïdal forcé : court-circuit, circuit ouvert, impédance adaptée.
- Impulsions : court-circuit, circuit ouvert, impédance adaptée.

CAPACITES EXIGIBLES :

- 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.
- 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.
- 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.
- Retrouver la distance égale à $\frac{\lambda}{2}$ entre deux nœuds consécutifs ou entre deux ventres consécutifs.
- Décomposer une onde stationnaire en ondes progressives, une onde progressive en ondes stationnaires.
- 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.
- 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.**

PO2 : PHENOMENES LINEAIRES DE PROPAGATION 1D

DISPERSION ET ATTENUATION

1. Phénomènes linéaires de propagation : dispersion et atténuation.

1.1. *Equation aux dérivées partielles linéaire*

- Exemple : Câble coaxial résistif

1.2. *Solution générique en ondes planes progressives sinusoïdales (OPPH*)*

1.3. *Relation de dispersion*

1.4. *Sens physique des parties réelle et imaginaire de $\underline{k}$: dispersion et atténuation.*

- Vitesse de phase
- Profondeur d'atténuation

2. Propagation d'un paquet d'onde dans un milieu dispersif non atténuant. Vitesse de groupe

2.1. *Exemple de milieu dispersif non atténuant : ligne LC idéale infinie.*
2.2. *Première approche : superposition de deux OPPH de fréquences voisines. Vitesse de propagation de l'enveloppe.*
2.3. *Définition d'un paquet d'ondes. Lien avec la transformée de Fourier.*
2.4. *Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu dispersif non atténuant. Vitesse de groupe.*
- Simulation numérique :

3. Ondes thermiques dans le sous-sol

3.1. *Modèle d'étude des fluctuations de température dans le sous-sol*
3.2. *Relation de dispersion des ondes thermiques*
3.3. *Effet de peau thermique : profondeur de peau ; retard de propagation.*
3.4. *Ordres de grandeur. Conséquences pratiques.*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Identifier le caractère linéaire d'une équation aux dérivées partielles de propagation.
- 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.
- 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.
- 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.

PO3 : PROPAGATION NON DISPERSIVE A 3 DIMENSIONS

ONDES SONORES DANS LES FLUIDES

1. Equation de d'Alembert 3D

1.1. *Spectre sonore et ultrasonore*
1.2. *Grandeurs décrivant une onde sonore. Approximation acoustique.*
1.3. *Les 3 équations locales linéarisées*
- Loi de la quantité de mouvement linéarisée

- Equation de continuité linéarisée
- Equation d'évolution thermodynamique linéaire

1.4. *Les 2 équations linéaires couplant l'onde de vitesse et la surpression.*
1.5. *L'équation de d'Alembert 1D pour la surpression*
1.6. *L'équation de d'Alembert 3D pour la surpression*
1.7. *Célérité : ordres de grandeur. Cas des gaz.*

2. Ondes sonores planes progressives harmoniques

2.1. *Onde sonore sphérique harmonique rayonnée par une sphère pulsante*
2.2. *Modèle de l'onde plane progressive harmonique dans la zone de rayonnement*
2.3. *Intérêt du modèle comme solution élémentaire de l'équation de d'Alembert 3D*
2.4. *Utilisation de la notation complexe*
2.5. *Caractère longitudinal de l'onde sonore plane progressive*
2.6. *Impédance acoustique pour une onde plane progressive*
- Définitions
- Cas d'une onde plane progressive et d'une onde plane régressive
- Ordres de grandeur

2.7. *Bilan : structure d'une onde sonore plane progressive.*

3. Aspects énergétiques de la propagation des ondes sonores

3.1. *Puissance transportée par une onde sonore. « Vecteur de Poynting » sonore*
3.2. *Densité volumique d'énergie cinétique*
3.3. *Densité volumique d'énergie potentielle. Equation locale de conservation de l'énergie sonore.*
3.4. *Cas d'une onde plane progressive harmonique*
3.5. *Intensité acoustique. Niveau sonore. Ordres de grandeur.*
3.6. *Retour sur l'approximation acoustique*

4. Ondes sonores et interfaces

4.1. *Conditions aux limites à l'interface entre deux fluides*
4.2. *Onde sonore plane progressive harmonique tombant sous incidence normale sur une interface plane. Nécessité d'une onde réfléchie.*
4.3. *Les 3 ondes : incidente ; réfléchie ; transmise.*
4.4. *Coefficients de réflexion et transmission en amplitude pour les vitesses et les surpressions.*
4.5. *Coefficients de réflexion et transmission des puissances sonores. Adaptation des impédances acoustiques.*
4.6. *Effet Doppler*
- Source mobile, détecteur fixe.
- Source fixe, réflexion sur une cible mobile.
- **Mesure de vitesse par détection hétérodyne**

4.7. ***Approche documentaire*** *: imagerie médicale par échographie ultrasonore.*

CAPACITES EXIGIBLES :

- 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* << *c*.
- 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.
- 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.
- Décrire le caractère longitudinal de l'onde sonore.
- Établir et utiliser l'impédance acoustique.
- Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques.
- 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).
- 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.
- **Mettre en œuvre une détection hétérodyne pour mesurer une vitesse par décalage Doppler.**
- **Approche documentaire :** décrire la mise en œuvre des ondes ultrasonores pour l'échographie médicale.