

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

- 2.1. *Solution générale en ondes progressives*
- 2.2. *Ondes progressives harmoniques*
 - Double périodicité
 - Notation complexe
 - Vecteur d'onde
 - Relation de dispersion
 - Vitesse de phase
- 2.3. *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
- 2.4. *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.
- **Capacité 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.
- 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 3D pour la surpression*
- 1.6. *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 possibles
 - 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**

CAPACITES EXIGIBLES :

- Classer les ondes sonores par domaines fréquentiels.
- Justifier les hypothèses de l'approximation acoustique par des ordres de grandeur.
- 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 définie comme le rapport de la surpression sur la vitesse ou le rapport de la surpression sur le débit volumique.
- 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.**