

LP14: ONDES ACOUSTIQUES

Thibault Hiron–Bédiée

Niveau : Deuxième année de CPGE/Licence

Prérequis : Notion d'angle solide, programme de mécanique du point de lycée général, notions de mécanique du solide.

Extrait du programme de CPGE

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Phénomènes de propagation non dispersifs : équation de d'Alembert	
1.1. Ondes mécaniques unidimensionnelles dans les solides déformables	
Équation d'onde pour des ondes transversales sur une corde vibrante infiniment souple dans l'approximation des petits mouvements transverses.	Établir l'équation d'onde en utilisant un système infinitésimal.
Modèle microscopique de solide élastique unidimensionnel (chaîne d'atomes élastiquement liés) : loi de Hooke. Ondes acoustiques longitudinales dans une tige solide dans l'approximation des milieux continus.	Relier la raideur des ressorts fictifs à l'énergie de liaison et évaluer l'ordre de grandeur du module d'Young. Établir l'équation d'onde en utilisant un système infinitésimal.
Équation de d'Alembert ; célérité. Exemples de solutions de l'équation de d'Alembert : — ondes progressives harmoniques — ondes stationnaires harmoniques	Reconnaître une équation de d'Alembert. Associer qualitativement la célérité d'ondes mécaniques, la raideur et l'inertie du milieu support. Différencier une onde stationnaire d'une onde progressive par la forme de leur représentation réelle. Utiliser qualitativement l'analyse de Fourier pour décrire une onde non harmonique.
Applications : — régime libre : modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités — régime forcé : résonances sur la corde de Melde.	Décrire les modes propres. En négligeant l'amortissement, associer mode propre et résonance en régime forcé.
1.2. Ondes acoustiques dans les fluides	
Mise en équations eulérienne des ondes acoustiques dans le cadre de l'approximation acoustique. Équation de d'Alembert pour la surpression.	Classifier les ondes domaines fréquentiels. Valider l'approximation acoustique en manipulant des ordres de grandeur. Écrire le système des trois équations locales utiles. Linéariser les équations et établir l'équation de propagation de la surpression dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes. Utiliser sa généralisation admise en faisant appel à l'opérateur laplacien.
Structure des ondes planes progressives harmoniques : caractère longitudinal, impédance acoustique.	Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques. Utiliser la notion d'impédance acoustique.

Densité volumique d'énergie acoustique, vecteur densité de courant énergétique. Intensité acoustique.	Utiliser les expressions admises du vecteur-densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde. Utiliser la notion d'intensité acoustique en décibel et citer quelques ordres de grandeur.
Ondes acoustiques sphériques harmoniques.	Utiliser une expression fournie de la surpression pour interpréter par un argument énergétique la décroissance en $1/r$ de l'amplitude.
Effet Doppler longitudinal	Décrire et mettre en œuvre un protocole de détection « synchrone » pour mesurer une vitesse par décalage Doppler
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.

Les programmes de PSI et de PC sont très similaires sur ce sujet. Plus de précisions techniques dans le programme PSI, mais détection synchrone présentée en manip' trouvée dans le programme PC.

Échographie traitée en PSI plutôt

Proposition de plan — On suit globalement le plan des bouquins de prépa :

Prérequis :

- thermodynamique de sup et spé,
- écoulement parfait d'un fluide
- diffusion thermique
- électromagnétisme dans le vide, ondes électromagnétiques

Dans un premier temps, je mets le plan tel que je l'ai présenté avec mes notes d'origine (légères).

Le plan proposé par Alain pour la première partie est en fin de fichier.

1 Mise en équation des ondes acoustiques dans les fluides

Être très méticuleux sur cette partie théorique au programme.

1.1 Approximation acoustique

Décomposition entre l'état au repos du fluide et la perturbation générée par l'onde sonore (donner des ordres de grandeur entre la pression atmo et la surpression pour 130 dB par exemple).

Attention aux hypothèses suivantes :

- on néglige l'atténuation, ce qui est valable dès que la propagation a lieu sur une distance grande devant la longueur d'onde ;
- on considère l'écoulement comme parfait (on néglige la viscosité)
- on suppose le fluide barotrope, c'est-à-dire que ses propriétés ne dépendent pas de la profondeur, ou en d'autres termes que l'on néglige l'effet de la pesanteur. Cette hypothèse est une très bonne approximation dans l'air (masse volumique faible) et tout aussi valable dans les liquides tant qu'on reste dans une zone d'épaisseur raisonnable.

Bien présenté dans [2, p. 928]

Garder les limitations sur la longueur d'onde et la vitesse pour plus tard (cf [1, p. 934])

1.2 Mise en équation eulérienne

[1]

1.2.1 Les équations locales

[3]

Utilisation d'équations liant pression et vitesse vues précédemment.

Introduire chaque équation sans les approximations dans un endroit du tableau et mettre de côté.

1.2.2 Linéarisation des équations

[1]

Retour sur l'approximation acoustique, bien insister sur les rapports d'OG, justifier $v \ll c$

1.3 Équation de propagation

[2] Présenter directement le cas tridimensionnel (traité aussi dans [3])

1.4 Célérité des ondes acoustiques

[1] et [2] en soutien pour l'aspect Laplace etc.

Particulièrement, remarque [1, p. 939]

mentionner la longueur d'onde, les interférences, la cohérence, la diffraction etc...

1.5 Effet Doppler longitudinal : détection synchrone

Présenter le phénomène à l'aide de [1] puis réaliser la mesure avec [4, V.1]

2 Ondes planes progressives harmoniques

2.0.1 Notations complexes

Partir directement de l'équation de d'Alembert

Montrer la relation de dispersion

2.0.2 Notion d'impédance

Faire apparaître le système d'équations couplées (équation 26.11 dans [1])

2.1 Aspects énergétiques

Vecteur de Poynting acoustique

2.1.1 Densité volumique d'énergie sonore

On admet les expressions et on démontre l'équation de continuité ([2])

2.1.2 Intensité acoustique

Utiliser données et graphes de [1, pp. 951 et 952]

À voir en fonction du temps. Il est probable que seule la détection synchrone soit réellement présentable dans le temps imparti !

2.2 Interface entre deux milieux : Écographie médicale

Partie 7 et étude documentaire [2]

3 Cas des ondes sphériques

3.1 Ondes sphériques

3.2 Cas des instruments de musique : modes propres

[1] et question 59 dans [5] Le cas du saxophone est peut-être un peu plus original avec la section conique, sans doute plus intéressant à présenter que l'échographie médicale ?

Conclusion

Suite du cours chapine d'oscillateurs couplés et ondes sonores dans les solides.

Références

- [1] Physique PC-PC*, TOUT-EN-UN, 5e édition, 2020, **Dunod**
- [2] Physique PSI-PSI*, TOUT-EN-UN, 5e édition, 2020, **Dunod**
- [3] Physique PSI-PSI*, RÉFÉRENCE PRÉPAS, Nouvelle édition, 2009 **Tec & Doc**
- [4] Mesure de fréquences temporelles, *Fascicule TP, Rennes 1* **Philippe Nouet**
- [5] Les Mille et Une Questions en PRÉPA, 2014 **ellipses**

Plan proposé par Alain

4 Propagation des ondes sonores

4.1 Mise en équation

4.1.1 Équations locales

4.1.2 Approximation acoustique

4.1.3 Linéarisation

4.2 Équation de propagation

Travailler sur la pression plutôt que sur la vitesse

Justifier le caractère longitudinal avec Euler (\vec{v}_1 selon $\overrightarrow{\text{grad}p_1}$)

4.3 Célérité

Alléger cette partie d'un point de vue calculatoire et discuter le lien entre c et T et M .

4.4 Effet Doppler

5 OPP

On reprend le déroulé présenté

Remarques d'Alain : c'est une leçon plus de méca flux que de physique des ondes : on travaille énormément sur les équation de la Mφ

Attention, on a 5 équations pour 5 grandeurs variables quand on fait la linéarisation (car \vec{v} compte pour trois).

χ_s est une généralisation : on applique de la thermo à l'ensemble du fluide. (OG des temps justifie le côté adiabatique notamment)