
Correction LP14 : Ondes acoustiques

Agrégation de physique – 2017-2018

Alain Miffre - Guillaume Laibe

La leçon présentée a permis de dégager les principales caractéristiques des ondes sonores. Toutefois, des éléments importants auraient dû être mieux explicités ; en particulier, du lien gagnerait à être conduit via l'expérience et non seulement par de longs développements formels, qui plus est lorsqu'ils sont peu utilisés. Nous reprenons ci-après les points essentiels de la discussion de manière à vous permettre de progresser.

1 Remarques générales

- Dans cette leçon, on doit entendre des sons, des bruits, de la musique ! On doit traiter des ordres de grandeurs ainsi que des analyses aux dimensions, notamment sur la célérité des ondes acoustiques dans les différents milieux et bien sûr le décibel. On doit rattacher les différentes propriétés des ondes acoustiques à des exemples de la vie quotidienne et donner des références historiques.
- Il est positif de débiter la leçon par une expérience. Toutefois, il est vivement déconseillé d'un point de vue pédagogique de vouloir mettre en évidence la propagation d'une onde sonore en montrant la vibration d'une flamme induite par un haut-parleur. Un étudiant serait en droit de se demander si l'origine de phénomène n'est pas thermique (cf. l'effet de thermophorèse). Une manière plus directe de faire cette mise en évidence pourrait consister à faire vibrer une peau de percussion ou de montrer le cri d'une grenouille et la vibration simultanée de sa gorge. Si l'expérience de la flamme est présentée, il convient de faire varier la fréquence et l'amplitude de la vibration.
- On doit distinguer dès le début de la leçon « onde acoustique » (la propagation d'une onde de pression dans un fluide) et « entendre » (qui requiert l'ensemble de la chaîne de transmission, incluant l'oreille et le cerveau).
- Il est fondamental de justifier le choix d'une transformation adiabatique pour le fluide (les échanges d'énergie sous forme de chaleur par diffusion avec le milieu environnant n'ont pas le temps de se faire lors de la détente/compression d'une particule de fluide qui oscille). Il convient donc de noter χ_S et non χ le coefficient de compressibilité *adiabatique*. Historiquement, cette distinction a fait débat, notamment entre Newton et Laplace. Signalons que ce point n'est pas anodin puisqu'il engendre une variation de la célérité de l'ordre $\sim \sqrt{\gamma}$. À titre de remarque, il existe des situations (notamment en astrophysique) où ces échanges thermiques se font très rapidement. On doit alors utiliser χ_T le coefficient de compressibilité *isotherme*.
- L'approximation du gaz parfait marche très bien pour l'air à température ambiante.
- Comme pour toute onde linéaire, la célérité $c_s \equiv \sqrt{\chi_s^{-1}/\rho}$ se met sous la forme de la racine d'une raideur (ici, l'inverse d'une compressibilité) sur une inertie (la densité du fluide). Il est conseillé de faire apparaître de manière très claire le lien entre célérité des ondes acoustiques et rigidité du milieu.
- Comme il est montré dans la leçon, c_s dépend de la température. Pour comparer une mesure de c_s à la valeur théorique $\sqrt{\gamma RT/M}$, il convient de mesurer la température ambiante avec un dispositif approprié. La présence d'humidité dans l'air peut être source d'erreurs systématiques.

- En première approximation, l'air est composé de 79% de diazote et 21% de dioxygène.
- Une impédance se met généralement sous la forme d'un rapport cause/conséquence. Ainsi, l'impédance acoustique peut-elle éventuellement introduite par analogie avec l'impédance électrique $Z = U/I$. Parler d'impédance sous-entend une dépendance en fréquence, dont il faut avoir conscience pour la discuter au moment des questions (référence bibliographique : regarder la loi de masse en acoustique).
- L'invariance par renversement d'espace $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$ et de temps $t \rightarrow -t$ se traduit par la dépendance en ω^2 et k^2 de la relation de dispersion. L'existence de la seconde viscosité est à connaître.
- L'atténuation du son a deux origines différentes. Le premier effet est un effet géométrique lié à la dilution de l'énergie dans l'espace. Les sources sonores émettent souvent des ondes sphériques (cf. un avion). Pour que l'énergie rayonnée se conserve sur une sphère de rayon r , le vecteur de Poynting doit-être en $1/r^2$, et les amplitudes de la surpression et de la survitesse en $1/r$. On note que pour un bruit de type « coup de bélier » dans une canalisation ou pour une route très fréquentée, la géométrie est cylindrique (Π en $1/r$, δp et δv en $1/\sqrt{r}$). Une telle atténuation ne peut être rendue avec une solution en ondes planes. Le deuxième effet est la dissipation microscopique, qui a elle-même trois origines : la viscosité, la diffusion thermique et le retard microscopique de compression. On peut établir un parallèle entre l'absorption des ondes sonores et la loi de Beer-Lambert en électromagnétisme.
- Corollaire : lorsque l'on quantifie la puissance rayonnée par une source (ex : un marteau-piqueur), on doit préciser la distance à la source.

2 Structure de la leçon

- On regrette l'approche formelle de la leçon ainsi que les nombreux calculs inutiles. En particulier, la partie sur le développement en ondes planes n'a pas apporté beaucoup de contenu physique. Ainsi, les liens proposés étaient bien souvent liés à un calcul. Mettre du lien physique convient mieux : par exemple, on peut contextualiser la leçon par rapport au décibel ou encore à la célérité des ondes acoustiques en fonction du milieu étudié. Surtout, comme suite au fait que la leçon s'apparente presque à un montage, il est vivement conseillé d'utiliser l'expérience de mesure de la célérité des ondes sonores pour problématiser. Pour conclure que la célérité des ondes sonores est la vitesse de propagation de l'énergie, partir de la relation de dispersion est plus efficace et permet de gagner du temps, lequel peut être avantageusement réinvesti sur les expériences quantitatives.
- Par ailleurs, les expériences doivent être présentées correctement : quelle est la question à laquelle on veut répondre, quel dispositif est mis en place pour y répondre, quelles sont les précautions expérimentales qui s'imposent, comment la mesure est-elle réalisée, quel est le résultat obtenu et son incertitude associée et enfin, quelle est la réponse à la question de départ. Par ailleurs, les expériences doivent être présentées *face* au jury.
- Dans un premier temps, on pourrait contextualiser la leçon en mentionnant le fait de produire et contrôler un son (musique) ou au contraire, parler des nuisance sonores, interpréter leur nature et comprendre comment s'en affranchir. Ceci nécessite une modélisation précise. On mentionnera que l'on étudie un milieu homogène et isotrope (différent du solide cristallin) et inviscide.
- Dans un deuxième temps, on dérivera les propriétés des ondes acoustiques et réalisant la linéarisation des équations (approximation acoustique). En particulier, on justifiera précisément le choix d'une évolution isentropique pour le fluide. On détermine la célérité des ondes et on commente le résultat (indépendance de c_s par rapport λ , dépendances en \sqrt{M} et \sqrt{T}^{-1} ...). Par construction, l'équation obtenue est une équation de propagation *linéaire*, qui autorise la décomposition des solutions en modes de Fourier (cf le spectre d'un instrument de musique) et pour laquelle le principe de superposition par rapport aux sources s'applique. Ordres de grandeur et

expériences de rigueur. On traitera les aspects énergétiques et on commentera les faibles valeurs de la surpression.

- Enfin, on peut se servir de l'équation d'onde pour déduire les propriétés du son qui en découlent. On parle de structure en onde sphérique (atténuation géométrique). On donne des illustrations de la refraction, reflexion, transmission, interférences, diffraction du son. On peut éventuellement conclure sur un exemple d'atténuation microscopique du son.

3 Questions

- *À combien de chiffres significatifs connaît-on le coefficient thermodynamique γ ?* Le coefficient γ a ceci de particulier qu'il vaut $7/5 = 1.4$ exactement (et non $\gamma \sim 1.40\dots$). C'est une valeur *théorique* qui vient de la physique statistique (gaz diatomique à température ambiante).
- *Comment expliquer l'origine du son d'une guitare ?* La vibration des cordes excite la vibration de l'air environnant. La couche d'air au-dessus de la rosace excite la caisse qui joue le rôle de résonateur. La puissance sonore est évacuée par rayonnement : c'est le son que l'on entend.
- *Vous avez montré que c_s dépendait de M et de T . Connaissez-vous une illustration de ces deux dépendances dans la vie quotidienne ?* L'effet Donald Duck en se mettant de l'hélium dans la bouche pour M et la réfraction par effet mirage au dessus d'un lac gelé pour T .
- *Connaissez-vous des exemples de la vie quotidienne pour chacun des aspects ondulatoires du son ?* Par exemple : cf. ci-dessus pour la refraction, la focalisation dans la « whispering gallery » (e.g. cathédrale St Paul) pour la reflexion, les casques anti-bruit d'avion pour les interférences, la répartition du son par une porte entrouverte pour la diffraction.
- *Comment marche un mur antibruit ?* Par une association des différentes propriétés ondulatoires du son. Une partie de l'onde est réfléchiée. Une autre partie est concentrée dans les structures du mur pour être atténuée. Ces structures associent réfraction et absorption pour se comporter comme des résonateurs de Helmholtz. Une partie de l'énergie est diffractée. Néanmoins, la taille, la forme et la composition du mur sont optimisées pour minimiser ces effets.
- *Que se passe-t-il si le fluide a une petite vitesse $v_0 \ll c_s$?* L'onde est advectée par le fluide à la vitesse v_0 .
- *Qu'est ce qu'un gaz parfait ?* Un gaz constitué de particules élémentaires ponctuelles, indiscernables et sans interaction.