L'arpenteur du Web

Ondes sonores, de l'écho au mur du son

par Guy BOUYRIE
33400 Talence
gbouyrie@gmail.com

L'ONDE SONORE est l'archétype de l'onde progressive mécanique. Dans nos programmes de lycée, c'est en seconde que l'on s'attache à la notion de fréquence du phénomène vibratoire associé à l'onde sonore et à la définition et mesure de la célérité du son. Les ondes acoustiques sont ici un des supports liés à la thématique de la vie quotidienne appelée dans le programme « diagnostic médical ». En première, ce sont les ondes lumineuses qui sont au cœur du programme de physique et il faut se placer au niveau de la terminale S ou STL pour identifier les ondes sonores comme des ondes progressives mécaniques et passer à l'analyse de leurs principales caractéristiques. Enfin, une part importante de l'enseignement de spécialité de sciences physiques est consacrée à l'acoustique musicale. C'est un domaine d'étude extrêmement vaste : c'est pourquoi, nous illustrerons ici, au moyen des ressources disponibles sur Internet, les principaux phénomènes observés lors de la propagation du son, dans l'air « libre » ou dans un volume fini, qui peuvent être évoqués dans la scolarité d'un lycéen scientifique : effet Doppler-Fizeau, « mur du son », écho, réfraction d'une onde sonore, interférences, absorption d'une onde sonore… Nous ne manquerons pas de faire appel à l'histoire des sciences pour montrer comment les modèles qui rendent compte du « son » ont pu évoluer. Nous examinerons sur d'autres articles de l'arpenteur du Web le cas des ondes ultrasonores avec leurs applications techniques, ainsi que toute la partie qui fait référence à l'acoustique musicale.

1. PROPAGATION DANS L'AIR ET CÉLÉRITÉ D'UNE ONDE SONORE

1.1. Du rayon lumineux au rayon acoustique

Depuis la plus haute antiquité, et en relation avec les informations que nous donnent nos sens de l'ouïe et de la vision, il a été tentant de faire une analogie entre la propagation d'un signal lumineux et celle d'une perturbation sonore. Ainsi, pendant longtemps, les savants qui ont mis en avant ce parallèle ont imaginé que la lumière comme le son suivent des « trajectoires » que l'on a désignées par « rayons lumineux » ou « rayons acoustiques », tantôt perçus comme « trajectoires de particules microscopiques » ou comme directions de propagation « d'une onde » et de « son énergie ».

Il a fallu attendre le XVII^{e} siècle pour mieux analyser l'influence du milieu sur la propagation du son et l'associer à une onde mécanique de pression.

- Consulter cette thèse en ligne pour une analyse historique très complète sur la représentation du son : François Baskevitch *Les représentations de la propagation du son, d'Aristote à l'Encyclopédie*
  https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00423362/document

Puis, loin d'être dépourvu d'imagination, comme il a également imaginé le télescope à miroir parabolique, Mersenne décline l'invention pour le son et propose des dispositifs censés amplifier par concentration des 'rayons sonores':

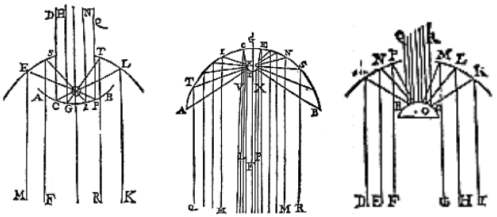


Figure 1 - Le phénomène de « l'écho » a été un « révélateur » du mode de propagation supposé être celui du « son ». Ainsi se construit la notion de « rayon acoustique », ici vue par Marin Mersenne en 1636.
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00423362/document

- Consulter aussi cette étude intéressante « Rayons sonores et ondes de lumière ? »
  http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/RaySon.xml

  Dans cette fiche, l'auteur, Gabrielle Bonnet, cherche à répondre à cette question :
  Les « rayons sonores » sont-ils semblables dans leur nature aux rayons lumineux ?
  Et, si oui, pourquoi n'utilise-t-on que rarement le mot de « rayons » pour le son ?

  Très rapidement, la nature « ondulatoire » du son n'a pas fait de doute : il n'est pas prévu dans cette fiche d'en faire la genèse, mais nous reviendrons sur la notion de « rayon acoustique » pour ses applications contemporaines.

  Nous nous en tiendrons à un aspect expérimental capital : la mesure de la vitesse de propagation du son.

1.2. Aspect historique : mesure de la vitesse de propagation du son dans l'air

Les premières mesures de la célérité du son reposent :

- *Sur le phénomène de l'écho :* connaissant la distance séparant un observateur d'un obstacle se comportant comme un « miroir » vis-à-vis des « rayons acoustiques », il suffit de mesurer le décalage temporel entre l'émission d'un signal sonore et celui relatif à sa réception par ce même observateur pour en déduire une estimation de la vitesse de propagation du son. On constate donc qu'elle a une valeur finie même si la nature exacte du phénomène à l'origine de la propagation du son reste méconnue.
- *Sur le retard observé lors de la propagation du son d'un point à un autre :* l'usage des armes à feu permet la mesure de ce retard en faisant l'hypothèse que la lumière émise lors de l'explosion de la poudre se propage quasiment instantanément.

C'est le protocole imaginé par Pierre Gassendi (1592-1655) en 1638 qui trouva $c_{son} \approx 438\ m \cdot s^{-1}$, en remarquant que cette vitesse est indépendante de la hauteur du son (et donc de sa fréquence). Ces mesures ont été répétées tout au long du XVII^e siècle et au début du XVIII^e siècle.

- Lire sur l'histoire de la mesure de la célérité du son :
  http://www.lerepairedessciences.fr/terminale_S/physique/chap1/histoire%20son.pdf

  Extrait : *« En 1738, l'Académie des sciences (française) chargea Jacques-Philippe Maraldi (1665-1729) et l'Abbé de La Caille (1713-1762) d'organiser des nouvelles expériences, que l'on retrouve citées dans les "Leçons de physique expérimentale" de l'Abbé Nollet. Ils firent certaines de leurs opérations sur une ligne de 14 636 toises (soit 28,5 km) à l'aide de coups de canon tirés la nuit (pour voir les flammes sortant de la bouche de l'arme) entre la tour de Montlhéry et la pyramide de Montmartre. Les principaux résultats furent :*
  1. *Le son parcourt 173 toises (soit 337,2 m) en une seconde.*
  2. *S'il fait un vent dont la direction soit perpendiculaire à celle du son, celui-ci a la même vitesse qu'il aurait par temps calme.*
  3. *Si le vent souffle dans la même direction que celle du son, il le retarde ou l'accélère selon sa propre vitesse.*
  4. *La vitesse du son est uniforme, c'est-à-dire que dans des laps de temps égaux et consécutifs, il parcourt des espaces semblables.*
  5. *L'intensité ou la force du son ne change rien à sa vitesse.*

  Enfin, dans le même ouvrage, l'Abbé Nollet démontre que le son décroît comme le carré de la distance qui augmente ».

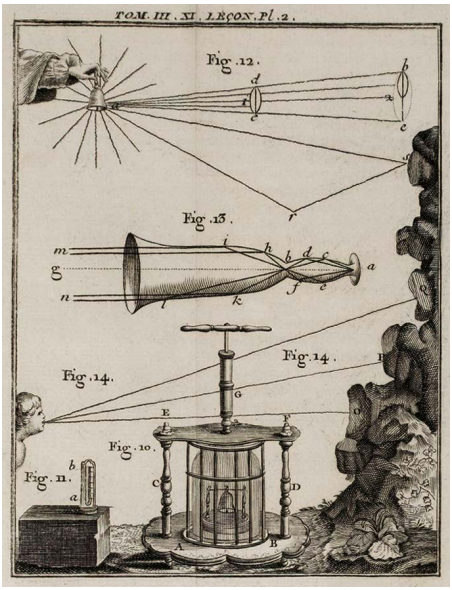
  Il est à noter que l'Abbé Nollet décrit dans son traité de *Leçons de physique expérimentale* de nombreuses expériences relatives à la propagation d'une onde sonore. On peut remarquer sur la planche représentée en figure 2 (cf. page ci-après) l'expérience de la cloche à vide sur la nécessité d'un milieu matériel pour qu'une onde sonore puisse se propager.

  Les déterminations suivantes, basées sur le même principe que l'expérience de Pierre Gassendi, deviennent plus précises, en tenant compte du degré d'hygrométrie de l'air, de la température et de la pression atmosphérique.

- Consulter :
  http://indianapublicmedia.org/amomentofscience/measuring-the-speed-of-sound/ (en anglais)
  http://www.cochlea.eu/son

1.3. Le son, onde de compression et vitesse de propagation dans l'air

Une onde sonore est une onde de compression qui va donc entraîner, de proche en proche, des variations locales de la pression du fluide dans lequel elle se propage. Ces variations locales de pression constituent la pression acoustique. Ce fait est connu depuis le XVII^e siècle, notamment dans les travaux d'Isaac Newton.



En 1738, l'Académie des Sciences*, pour terminer avec préciſion une queſtion qui peut être d'une application utile, ſoit pour la Géographie, ſoit pour la sûreté de la navigation, chargea MM. de Turi, Maraldi, & l'Abbé de la Caille, de faire à cet égard les expériences néceſſaires, & avec les précautions les plus convenables au ſujet. Ces Académiciens firent leurs opérations ſur une ligne de 14636 toiſes qui avoit pour termes la tour de Montlhery, & la pyramide de Montmartre ; & voici quels en furent les principaux réſultats.

1°. Le ſon parcourt 173 toiſes meſure de Paris en une ſeconde de temps, de jour ou de nuit, par un temps ſerein ou par un temps pluvieux. Le mouvement de la lumiere n'a donc point de part à la propagation du ſon ; & les vapeurs mêlées avec les particules de l'air n'interrompent point le mouvement de vibration.

Figure 2 - Propagation et mesure de la vitesse du son
selon *Les leçons de physique expérimentale* (tome 3) par l'Abbé Nollet (mars 1745)
http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k10401708/f466.double.r=abb%C3%A9%20nollet

- Extrait d'un cours dispensé à l'École supérieure des arts et médias (ESAM) de Caen et Cherbourg : http://www.esam-c2.fr/

  « Lors de la propagation d'une onde acoustique dans l'air, les molécules d'air en mouvement modifient légèrement la pression localement. Cette variation de pression est appelée pression acoustique p. Ainsi, en un point de l'espace, la pression totale devient : $P_{tot} = P_0 + p$, où P_0 désigne la pression atmosphérique "statique". La pression acoustique engendre une force supplémentaire sur le tympan qui met en vibration le tympan, lequel transmet des signaux vibratoires au cerveau *via* l'oreille moyenne et l'oreille interne.

  Remarque : La pression atmosphérique est une pression qu'on appelle "absolue", donc toujours positive, alors que la pression acoustique est une fluctuation autour de la pression atmosphérique, et est donc alternativement positive (surpression) ou négative (dépression) ».

- Exemples non exhaustifs d'animations pour les élèves de lycée :
  http://ostralo.net/3_animations/swf/onde_sonore_plane.swf
  http://www.animations.physics.unsw.edu.au/waves-sound/
  Un ensemble (en anglais) très riche !

http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html
Université de Pennsylvanie :

- L'onde sonore se propage à une vitesse c_{son} qui, dans un gaz, a pour expression : $c_{son} = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ où P est la pression du gaz, ρ est la masse volumique de ce gaz, R la constante des gaz parfaits, M la masse molaire du gaz et T la température absolue en kelvins.

  Le coefficient $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ intervient dans cette expression du fait que les compressions et détentes successives du gaz liées à la propagation du son sont adiabatiques (Newton avait fait l'hypothèse de compressions et détentes isothermes ce qui conduisait à une estimation de la célérité du son plus basse que la valeur expérimentale qui était, à l'époque il est vrai, déterminée avec une grande incertitude).

  De façon surprenante, la vitesse du son ne dépend que de la température et pas de la pression du gaz ! On obtient alors la célèbre relation empirique :

  $$\boxed{c_{son\ air}\left(\mathrm{m \cdot s^{-1}}\right) \approx 331{,}5 + 0{,}607 \times \theta\ (°\mathrm{C})}.$$

  Pour déterminer la valeur de c_{son} dans l'air, on est donc ramené à toutes les problématiques abordées précédemment sur la mesure de la pression atmosphérique.

- Calculateur en ligne :
  http://www.engineeringtoolbox.com/air-speed-sound-d_603.html
  http://www.engineeringtoolbox.com/speed-sound-d_519.html
  Sa mesure est désormais un classique des travaux pratiques de lycée : elle repose essentiellement sur la détermination du décalage temporel qui existe à l'arrivée d'une onde sonore au niveau de deux capteurs fixés sur un banc d'optique par exemple et placés à des distances différentes de la source.

- Consulter ainsi la base de données BupDoc avec le mot-clé « son » pour obtenir un grand nombre d'articles qui portent sur la détermination expérimentale de la célérité du son ;
  http://udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/selections.php

- Regarder ces vidéos d'expériences prises dans YouTube qui concernent des ondes sonores :
  https://www.youtube.com/watch?v=aKTMHy32NIA
  https://www.youtube.com/watch?v=pP7OzWjylZw
  le « clap » sonore
  https://www.youtube.com/watch?v=ITlc1wRpKBY
  (émission en continu et mesure de longueur d'onde)

- Pour réviser en anglais :
  Un exemple de cours en ligne, qui, à l'instar des MOOCs, demande une inscription

en ligne :
http://study.com/academy/lesson/what-is-sound-definition-wave-parameters-pitch-volume.html

2. L'EFFET DOPPLER

2.1. Historique

En 1842, l'Autrichien Christian Doppler (1803-1853) montre que la fréquence d'une oscillation sonore change quand la source ou l'observateur sont en mouvement. Il essaye ensuite, sans succès, d'appliquer son principe aux ondes lumineuses pour expliquer les différentes couleurs des étoiles et, en particulier, la différence de couleur de certaines étoiles doubles. En effet, son interprétation impliquait que les étoiles puissent se déplacer avec des vitesses proches de celle de la lumière !

En 1845, le Hollandais Christoph Buys Ballot (1817-1890) démontre la validité du principe de Doppler pour les ondes sonores en constatant le changement de ton entendu quand des musiciens jouant des instruments à vent, embarqués sur un train sur la ligne Utrecht-Amsterdam, s'approchent et puis s'éloignent de la gare, d'après :
http://www.obs-hp.fr/lumiere/histoire_doppler-fizeau.html

2.2. Mise en évidence

Pour une mise en évidence probante, consulter cet excellent site pédagogique qui offre de nombreuses ressources pour l'enseignant (cf. figure 3, page ci-contre) :
http://phymain.unisciel.fr/effet-doppler-avec-un-diapason/

2.3. Effet Doppler : ressources sur la toile

- Un dossier très complet pour les élèves de terminale S est disponible dans les ressources pédagogiques de l'académie de Versailles :
  http://www.phychim.ac-versailles.fr/spip.php?article683
- L'équivalent chez les Anglo-saxons :
  http://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-3/The-Doppler-Effect
  http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/aqa/origins/redshiftrev2.shtml
  http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/doppler.htm
- Réviser les relations qui sont appliquées à l'effet Doppler :
  http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/dopp.html
- Pour les élèves de terminale S, des exemples de vidéos de cours, mais peuvent-elles remplacer leur professeur ?
  – des images de synthèse bien réalisées :
  https://www.youtube.com/watch?v=OYXE5svkiBQ



Figure 3 - Mise en évidence de l'effet Doppler pour une onde sonore
http://phymain.unisciel.fr/effet-doppler-avec-un-diapason/

– ce qu'un élève peut voir sur un tableau numérique !
https://www.youtube.com/watch?v=4WdTP0881KQ
– le multimédia au service des élèves !
https://www.youtube.com/watch?v=VSAUwoOPZgs
– demandez les formules !
https://www.youtube.com/watch?v=pfBnJoizEWQ

2.4. Quelques résultats : l'effet Doppler longitudinal non relativiste

◆ Cas d'une source sonore, de fréquence propre f_0, qui se rapproche, ou s'éloigne, à la vitesse v, d'un observateur fixe :

❶ Si la source se rapproche de l'observateur, celui-ci perçoit une fréquence apparente f' telle que :

$$f' = f_0 \times \frac{1}{1 - \frac{v}{c_{son}}} \qquad (1)$$

où c_{son} est la célérité des ondes acoustiques dans le milieu considéré.

On a encore, en exprimant les longueurs d'onde de ces ondes mécaniques pro-

gressives :

$$\lambda' = \lambda_0 \times \left(1 - \frac{v}{c_{son}}\right). \quad (1)$$

On observe donc $f' > f_0$ et $\lambda' < \lambda_0$.

❷ Si la source s'éloigne de l'observateur, celui-ci perçoit une fréquence apparente f'' telle que :

$$f'' = f_0 \times \frac{1}{1 + \frac{v}{c_{son}}} \quad (2)$$

où c_{son} est la célérité des ondes acoustiques dans le milieu considéré. On a encore, en exprimant les longueurs d'onde de ces ondes mécaniques progressives :

$$\lambda'' = \lambda_0 \times \left(1 + \frac{v}{c_{son}}\right). \quad (2)$$

On observe donc $f'' < f_0$ et $\lambda'' > \lambda_0$.

Pour obtenir les relations (1) ou (2), on suppose classiquement que l'observateur fixe « verrait » dans l'espace, soit en arrière, soit en avant de l'émetteur, une « onde » se propageant à la vitesse invariante c_{son} qui remplirait l'espace avec une longueur d'onde apparente $\lambda' = \lambda_0 - v \cdot T_0$ (sachant que la période $T_0 = \frac{1}{f_0}$) si la source se rapproche de l'observateur et donc en avant de la source, $\lambda'' = \lambda_0 + v \cdot T_0$ si au contraire la source s'éloigne de l'observateur et donc si l'on regarde en arrière de la source.

◆ Cas d'un observateur qui se rapproche ou s'éloigne, à une vitesse v, d'une source sonore fixe de fréquence propre f_0 :

❸ Si la source se rapproche de l'observateur, celui-ci perçoit une fréquence apparente telle que :

$$f' = f_0 \times \left(1 + \frac{v}{c_{son}}\right). \quad (3)$$

On a encore, en exprimant les longueurs d'onde des ondes acoustiques :

$$\lambda' = \lambda_0 \times \frac{1}{1 + \frac{v}{c_{son}}}. \quad (3)$$

On observe donc $f' > f_0$ ou encore $\lambda' < \lambda_0$.

❹ Si la source s'éloigne de l'observateur, celui-ci perçoit une fréquence apparente telle que :

$$f'' = f_0 \times 1 - \frac{v}{c_{son}}. \quad (4)$$

On a donc, en exprimant les longueurs d'onde des ondes acoustiques :

$$\lambda'' = \lambda_0 \times \frac{1}{1 - \frac{v}{c_{son}}}. \quad (4)$$

On observe donc $f'' < f_0$ ou encore $\lambda'' > \lambda_0$.

Pour obtenir les relations (3) et (4), tout se passe comme si l'observateur « coupait » une onde qui remplit l'espace avec une longueur d'onde λ_0, avec la vitesse apparente $(c_{son} + v)$, d'où $c_{son} \cdot T_0 = (c_{son} + v) \cdot T'$ si l'observateur se rapproche de l'émetteur, et avec la vitesse apparente $(c_{son} - v)$, d'où $c_{son} \cdot T_0 = (c_{son} - v) \cdot T''$ si l'observateur s'éloigne de l'émetteur. Selon ce point de vue, la vitesse de l'onde acoustique n'est donc pas un invariant : on fait appel à la composition galiléenne des vitesses.

♦ En conclusion

Observons qu'en mécanique classique, il n'y a pas symétrie des points de vue selon que l'on assigne le déplacement à l'émetteur ou à l'observateur. Ce ne sera pas le cas avec la lumière en physique relativiste qui respecte l'équivalence des points de vue lors de ces déplacements relatifs entre émetteur et récepteur.

Remarquons encore que dans le cas où $v \ll c_{son}$, les relations (1) et (3), ou (2) et (4), sont équivalentes au premier ordre, ce qui permet de poser la relation générale admise en terminale S :

$$\boxed{\frac{\Delta f}{f_0} \approx \pm \frac{v}{c_{son}}}$$

avec « + » si émetteur et observateur se rapprochent l'un de l'autre, « − » si émetteur et observateur s'éloignent l'un de l'autre.

2.5. Effet Doppler et ondes acoustiques de sillage : cas d'une source en mouvement

Pour interpréter de façon intelligible l'effet Doppler auprès des élèves, on a souvent recours à des animations qui permettent de considérer la propagation des ondes acoustiques crées par la source en mouvement dans un milieu ouvert, ici l'air atmosphérique, supposé homogène.

2.5.1. Cas d'une source subsonique

Il faut alors construire une série de fronts d'ondes sphériques, compte tenu du déplacement de la source sonore. On envisage ici le cas où la source à l'origine des ébranlements sonores se déplace à une vitesse v qui reste inférieure à la célérité c_{son} des ondes sonores dans l'air : $v < c_{son}$. Une animation probante (cf. figure 4A) est proposée sur ce site américain de l'Université de Pennsylvanie :

http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/doppler/doppler.html

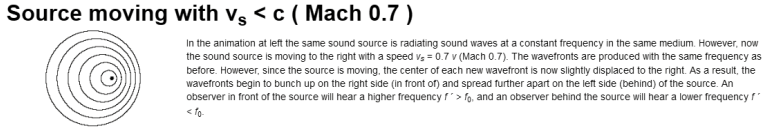


Figure 4A - Animation pour illustrer l'effet DOPPLER dans le cas d'une source subsonique
http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/doppler/doppler.html

2.5.2. Exercice d'application : ondes progressives acoustiques créées par un avion subsonique et effet Doppler

Un avion se déplace en rase-mottes à la vitesse subsonique $v \approx 226\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (soit $816\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$), selon une trajectoire rectiligne horizontale. À chaque instant, son bord d'attaque, c'est-à-dire la bordure antérieure des ailes et du fuselage, engendre une onde sphérique acoustique qui se propage à la célérité $c_{son} = 340\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. On a donc :

$$\boxed{v = \frac{c_{son}}{1,5}}.$$

À l'instant $t_0 = 0$, l'avion est au point M_0 de sa trajectoire. À $t_1 = 0,1\ \text{s}$, il est en M_1 ; à $t_2 = 0,2\ \text{s}$, il est en M_2…

Questions

1. Sur papier millimétré, disposer le point M_0 vers le milieu de la feuille.
Porter sur une droite horizontale, à l'échelle 1,0 cm pour 34 m, les positions successives M_0, M_1, …, M_6 de l'avion sur sa trajectoire.

2. On analyse le phénomène à la date $t_6 = 0,6\ \text{s}$: l'avion est en M_6 et une onde sphérique acoustique prend juste naissance au niveau de cette position.

2.1. Si, aux points M_5, M_4, …, M_0 ont été créées des ondes sphériques, quelles distances d_5, d_4, …, d_0 ont été franchies par ces ondes à la date $t_6 = 0,6\ \text{s}$?

2.2. À cette date t_6, tracer au compas les limites atteintes par ces ondes sphériques, qui sont circulaires dans le plan de la feuille (placer chaque fois l'origine du cercle à tracer sur le point M_i considéré et lui donner la valeur du rayon $R_i = d_i$ correspondante).

3. Montrer que cette construction met en évidence, *pour un observateur terrestre*, deux séries d'ondes progressives, en avant et en arrière de l'avion, dont on comparera les longueurs d'onde apparentes λ' et λ''.
On appellera λ_0 la longueur d'onde acoustique dans le référentiel du pilote et f_0 la fréquence correspondante.

4. En déduire qu'il en résulte deux sons, de fréquences f' et f'' dont l'un est plus aigu que l'autre (on pourra calculer la valeur du rapport $\frac{f'}{f''}$ à partir de son expression littérale).

Réponses

2.1. Au bout de $\Delta t = t' - t$, l'avion franchit la distance $d_{avion} = v \cdot \Delta t$; le front de l'onde sphérique créé à t franchit pendant cette durée la distance $d_{onde} = c_{son} \cdot \Delta t = 1,5\, v \cdot \Delta t$, qui est toujours une fois et demie plus grande que le déplacement observé pour l'avion. L'onde dépasse donc toujours l'avion.

2.2. Construction :

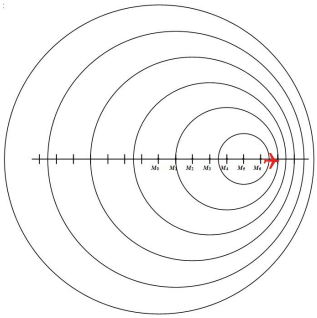


Figure 4B - Construction des ondes progressives créées par un avion subsonique.

3. À l'avant, les ondes sont périodiques et plus resserrées qu'en arrière de l'avion. Il en résulte qu'à l'avant la longueur d'onde est plus courte qu'à l'arrière. Or pour une onde acoustique, $\lambda = \frac{c_{son}}{f}$, à valeur de c_{son} identique, plus λ est courte et plus la fréquence f est grande. Un observateur entendra donc un son plus aigu (car de plus haute fréquence) en avant de l'avion puis plus grave quand l'avion est passé (effet Doppler).

4. Pour le pilote, lié à l'avion, les ondes acoustiques, générées par l'avion qui « fend » l'air, ont une longueur d'onde « propre » λ_0 et une fréquence f_0 qui demeurent invariantes.

Pour *un observateur terrestre*, ces ondes acoustiques se propagent à une vitesse constante qui est leur célérité dans l'air, mais leur longueur d'onde diffère suivant que l'on se place en avant ou en arrière de la source :

– <u>En avant de l'avion</u> : les ondes sont plus « resserrées », de longueur d'onde spatiale *apparente* $\lambda' = \lambda_0 - v \cdot T_0$.

L'observateur reçoit alors des perturbations de période apparente T' telle que $\lambda' = c \cdot T'$ puisque ces ondes sonores se propagent dans l'air à la célérité c du son. On a donc :

$$\lambda_0 = c_{son} \cdot T_0$$

et
$$\lambda' = \lambda_0 - v \cdot T_0 = c_{son} \cdot T' \Rightarrow T' = T_0 \times \left(1 - \frac{v}{c_{son}}\right)$$

et donc
$$f' = f_0 \times \frac{1}{1 - \frac{v}{c_{son}}}.$$

Ici,
$$f' = 3 f_0$$

– <u>En arrière de l'avion</u> : les ondes sont plus étalées dans l'espace, de longueur d'onde spatiale $\lambda'' = \lambda_0 + v \cdot T_0$. L'observateur reçoit alors des perturbations à la période T'' apparente telle que $\lambda'' = c_{son} \cdot T''$ puisque ces ondes sonores se propagent dans

l'air à la célérité c_{son}. On a donc :

$$\lambda_0 = c_{son} \cdot T_0$$

et $$\lambda'' = \lambda_0 - v \cdot T_0 = c_{son} \cdot T'' \Rightarrow T'' = T_0 \times \left(1 + \frac{v}{c_{son}}\right)$$

et donc $$f'' = f_0 \times \frac{1}{1 + \frac{v}{c_{son}}}.$$

Ici, $$f'' = 0,6 f_0$$

C'est ce que l'on appelle **l'effet Doppler «longitudinal»**. Au premier ordre, le décalage relatif en fréquence est alors :

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{(f' - f_0)}{c_{son}} = \frac{+v}{c_{son}} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{(f'' - f_0)}{c_{son}} = \frac{-v}{c_{son}}.$$

2.6. Effet Doppler : analyse d'un fichier sonore

Pour introduire l'effet Doppler en classe de terminale S, il est d'usage de présenter une séquence vidéo sonorisée dans laquelle un observateur voit arriver vers lui puis s'éloigner de lui un véhicule qui émet un signal sonore (avertisseur de locomotive, klaxon de voiture).

Outre les impressions acoustiques immédiatement perceptibles qui «signent» l'effet Doppler, la piste sonore associée à la séquence vidéo peut être exploitée pourvu que la prise de vue ait été effectuée correctement, idéalement perpendiculairement à la direction de la route ou des rails.



Figure 5 - Disposition pour mettre en évidence l'effet Doppler d'un véhicule qui klaxonne. L'observateur placé en P «voit» le véhicule se diriger vers lui avec la vitesse radiale $v \cos\theta$.

Il est possible de trouver de très nombreux exemples dans YouTube comme ceux-ci :

- Un essai d'explication et de réalisation au bord d'une route :
  https://www.youtube.com/watch?v=Bz5wr3GhvUQ
  séquence à critiquer avec les élèves !
- Séquences d'une automobile qui klaxonne dont la piste sonore peut être exploitée :
  (1) https://www.youtube.com/watch?v=a3RfULw7aAY
  (2) https://www.youtube.com/watch?v=p-hBCcmCUPg
  (3) https://www.youtube.com/watch?v=rFgaTEOybI0

♦ Un train qui passe :
https://www.youtube.com/watch?v=O5rqMPdQMQ8

Pour exploiter un tel fichier, quelques utilitaires sont nécessaires afin de :
– capturer la vidéo si c'est possible (étape 1) ;
– extraire la piste sonore de la vidéo et la convertir en un format universel de type mp3 ou WAV (étape 2) ;
– exploiter ce fichier sonore (étape 3).

On peut consulter à cet effet le site de Jean-François Noblet :
http://www.jf-noblet.fr/doppler/tp1-2.htm

Pour l'étape 1, sous les navigateurs *Firefox* ou *Chrome*, l'extension Downloadhelper fait parfaitement l'affaire, voir :
https://www.downloadhelper.net/

Pour l'étape 2, on peut utiliser ce merveilleux logiciel qu'est *Audacity*, à condition d'y adjoindre deux indispensables extensions : les librairies *Lame* et *FFMGEG*, voir :
http://audacity.fr/
http://manual.audacityteam.org/man/faq_installation_and_plug_ins.html

Sinon, il existe de nombreux logiciels libres qui permettent l'extraction des pistes sonores du film sauvegardé, comme Taudioconverter :
http://taudioconverter.sourceforge.net/

Les logiciels cités ci-dessus ont des licences GNU, ce qui est tout à fait adapté aux établissements scolaires.

Dans le cadre de cette étude, la piste sonore de la vidéo relative à la séquence citée ci-dessus en (1) a été extraite avec *Audacity*. Parmi les fonctions présentes dans ce logiciel, un filtrage a été opéré pour éliminer le plus possible le bruit et obtenir un son dont on puisse aisément distinguer les harmoniques. Noter qu'il vaut mieux traiter le klaxon d'une voiture plutôt que l'avertisseur sonore d'un train qui est toujours noyé dans un bruit de roulement trop complexe pour être isolé. On constate que le son émis est riche en harmoniques qui se séparent sans problème : il suffit de construire le sonagramme ou spectrogramme pour le constater (menu accessible par clic sur la flèche noire qui est à droite du titre du fichier chargé dans la fenêtre de représentation graphique).

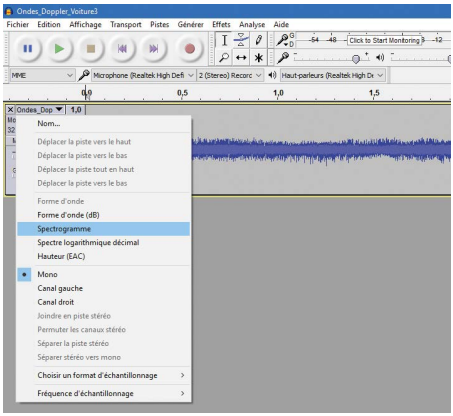


Figure 6 - Fonction « spectrogramme » dans Audacity.

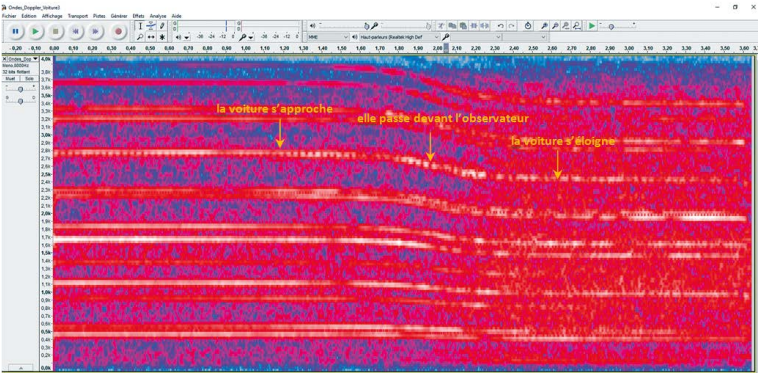


Figure 7 - « Spectrogramme » observé du son Ondes_Doppler_Voiture3.wav tiré de la vidéo https://www.youtube.com/watch?v=a3RfULw7aAY selon *Audacity*

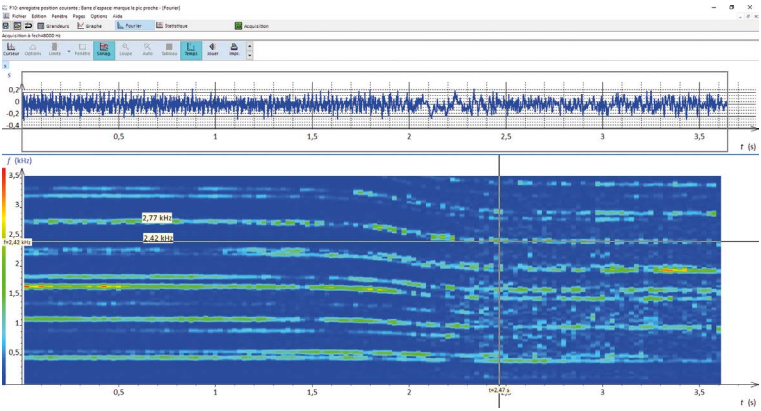


Figure 8 - « Sonagramme » observé du son Ondes_Doppler_Voiture3.wav tiré de la vidéo https://www.youtube.com/watch?v=a3RfULw7aAY selon *Regressi*

Voici ce que l'on observe en figure 7 (cf. page ci-contre) après traitement de la séquence sonore (1).

On constate que l'évolution temporelle de chaque harmonique a une forme caractéristique en « marche d'escalier ». Ceci s'interprète facilement en considérant, par la figure 5, l'évolution de la fréquence « Doppler » selon la direction radiale SP qui est telle que :

$$f_{app} = f_0 \times \frac{1}{1 - \frac{v \times \cos\theta}{c_{son}}}.$$

Loin de l'observateur alors que la voiture se dirige vers lui, $\theta \to 0$ et $f_{app} = f'$; au passage devant l'observateur, l'angle θ varie brutalement (pour $\theta = 90°$, il n'y a plus d'effet Doppler) ce qui donne ce profil en « marche d'escalier » et lorsque la voiture s'éloigne de l'observateur, $\theta \to 180°$ et l'on retrouve $f_{app} = f''$. Par mesure sur le spectrogramme des fréquences f' et f'', on peut déterminer la vitesse v du véhicule.

- À noter qu'avec le logiciel *Regressi*, on peut réaliser cette même activité par lecture du fichier sonore, voir :
  http://jean-michel.millet.pagesperso-orange.fr/regressi.html

Un simple calcul montre que $v = c_{son} \times \frac{f' - f''}{f' + f''}$, ce qui conduit ici, avec les relevés qui figurent sur la figure 8 (cf. page ci-contre) et en prenant $c_{son} \approx 340\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, à $v \approx 23\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ soit près de $83\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.

3. MUR DU SON ET ONDE DE CHOC

3.1. Mur du son

Lorsqu'un avion se déplace avec une vitesse supersonique, telle que $v > c_{son}$, l'avion se déplace plus vite que les ondes progressives acoustiques qu'il génère avec le nez du fuselage et les bords d'attaque des ailes ainsi que l'empennage.

« Quand l'avion atteint la vitesse du son, ces ondes, donc les maximas de pression, s'accumulent à l'avant. C'est une onde de choc, provoquant un bruit bref et puissant pour un observateur au sol. Si la vitesse augmente encore, devenant supersonique, cette onde de choc, moins rapide que l'avion, se propagera derrière lui. Le "bang" sera entendu après le passage de l'avion », d'après Futura-Sciences.

Ces variations brutales de pression peuvent entraîner, au voisinage immédiat de l'avion, de redoutables vibrations des structures de la cellule de l'avion, comme l'avaient observé à leurs dépens les premiers aviateurs soumis à ce phénomène à la fin de la Seconde Guerre mondiale (1939-1945).

Lire ou regarder :

- Futura-sciences :
  http://www.futura-sciences.com/videos/d/kezako-passe-t-il-lorsquun-avion-franchit-mur-son-866/
- Revue Scientific American :
  http://www.scientificamerican.com/article/what-happens-when-an-airc/
- Université de Pennsylvanie (en anglais) :
  http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/doppler/doppler.html

Des photographies ou vidéos spectaculaires montrent la propagation des ondes de choc, enveloppes des ondes sonores créées, qui accompagnent les avions dans leurs vols supersoniques. Ces brutales compressions et détentes de l'air qui résultent du passage de ces ondes de choc peuvent entraîner la condensation de l'air humide dans un cône qui forme un véritable « bouclier ».



Figure 9 - Passage du mur du son par un avion
http://www.maxisciences.com/mur-du-son/wallpaper

- Une compilation de films pris depuis le pont d'un porte-avions :
  https://www.youtube.com/watch?v=6B4IVcCuIZE
  filmé depuis un porte-avions.
- Le nombre de Mach M est un nombre sans dimension qui permet de comparer la vitesse de déplacement de l'écoulement d'un fluide v (qui est aussi celle d'un projec-

tile à l'origine de l'écoulement du fluide) à la célérité de l'onde sonore c_{son} :

$$M = \frac{v}{c_{son}}.$$

Si $M < 1$, le vol est subsonique ; le passage du mur du son s'effectue lorsque $M = 1$ (vol transsonique).
Si $M > 1$, le vol est supersonique.
http://www.engineeringtoolbox.com/mach-number-d_581.html

3.2. Onde de choc ou onde balistique d'un projectile

Ces ondes sonores prennent naissance lors du mouvement d'un projectile dans l'air.

3.2.1. Cas d'un projectile qui est supersonique

La source à l'origine des ébranlements sonores se déplace à une vitesse v qui est supérieure à la célérité c_{son} des ondes sonores dans l'air : $v > c_{son}$. Dans ce cas, vont se développer des ondes de sillage qui restent en arrière de la source en mouvement. Dans ces ondes de sillage, on peut encore mettre en évidence un effet Doppler.

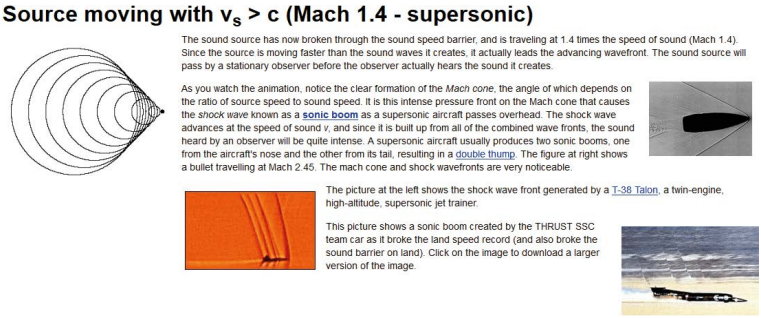


Figure 10 - Animation pour illustrer l'effet Doppler dans le cas d'une source supersonique
http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/doppler/doppler.html

Le sillage est bordé par une enveloppe qui constitue « l'onde de choc » ou « onde balistique », comme nous allons l'examiner ci-après.

◆ Examinons la figure 11 (cf. page ci-après)
Le projectile génère des ondes de sillage dont l'enveloppe, de surface Σ sur laquelle s'accumule l'énergie sonore, constitue « l'onde de choc » ou « onde balistique » : en un point de la surface Σ arrivent simultanément les ondes sphériques sonores S_i de « sillage » émises aux différents points M_i de la trajectoire du projectile.
La série des ondes sphériques S_i est limitée vers l'arrière par l'onde sphérique S qui est appelée « onde de bouche » et se raccorde en des points A et B sur la surface Σ tels

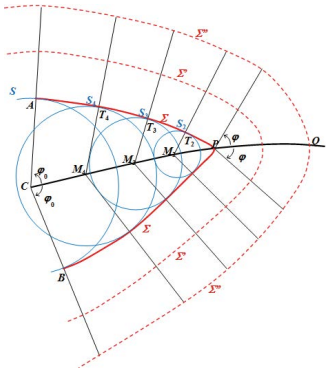


Figure 11A - Onde balistique d'un projectile supersonique.

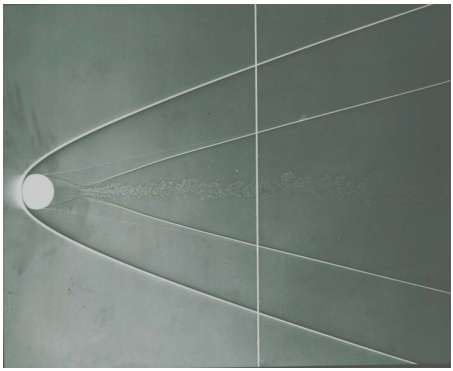


Figure 11B - Onde balistique obtenue en soufflerie : https://howthingsfly.si.edu/media/shock-waves

que : $\cos\varphi_0 = \frac{c_{son}}{v_0}$ si v_0 est la vitesse initiale du projectile et c_{son} la célérité du son. La courbe de raccordement AB se trouve donc sur un cône de révolution de demi-angle au sommet φ_0 et dont l'axe est donné par la direction de la vitesse initiale $\boldsymbol{v_0}$. Les diverses ondes sphériques s'agrandissent à la vitesse c_{son} et l'onde balistique se propage avec cette même vitesse pour occuper successivement au cours du temps les positions Σ, Σ', Σ'' ; la trajectoire du projectile s'opère selon l'arc CQ et l'onde balistique se termine à un instant t donné au point P qui est la position instantanée du projectile animé en ce point d'une vitesse $v < v_0$ qui reste cependant supérieure à la célérité du son. Le point P est le sommet d'un cône de demi-angle φ tel que $\cos\varphi = \frac{c_{son}}{v}$.

- Un observateur qui se trouve à l'extérieur du cône CAB (à sa gauche donc sur la figure) ne reçoit pas l'onde balistique ; il est atteint d'abord par l'ébranlement relatif à l'onde sphérique S puis par les différents ébranlements émanant des ondes S_i dans leur ordre d'émission.

- Un observateur qui se trouvera à l'intérieur du cône CAB recevra d'abord l'onde balistique Σ qu'il perçoit comme un brutal claquement ou une violente détonation puis recevra ensuite les ébranlements individuels issus des ondes sphériques S_i constitutives du sillage, perçus sous forme d'un sifflement ou d'un roulement.

3.2.2. Cas d'un projectile qui est subsonique

Si la vitesse du projectile devient inférieure à c_{son}, par exemple au-delà du point Q sur la figure 11A, les ondes sphériques émises lors du déplacement du projectile dépassent celui-ci et l'on obtient une configuration qui est donnée en figure 12A (cf. page ci-contre) ; l'enveloppe des ondes sphériques, qui se resserrent fortement en avant

du projectile, constitue alors l'onde balistique. Un observateur situé en avant du projectile entendra donc un claquement à la réception de l'enveloppe S, qui précède l'arrivée du projectile, puis un sifflement dont la fréquence diminue par effet Doppler quand le projectile a dépassé l'observateur.

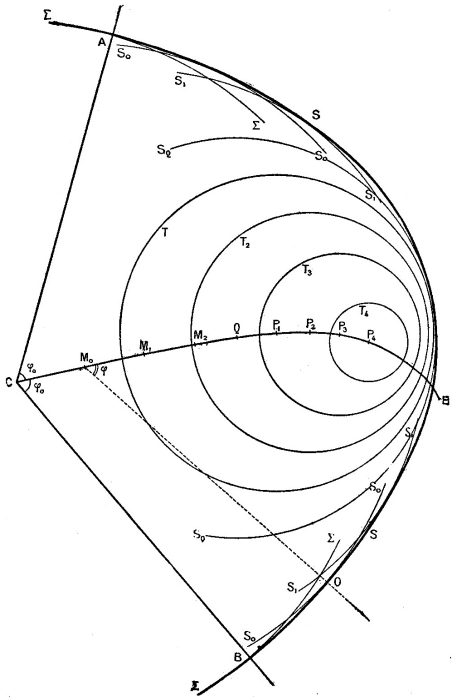


Figure 12A - Onde balistique d'un projectile dans son vol subsonique (planche tirée de l'ouvrage de Georges Bruhat *Mécanique*).

On lira avec profit sur ce sujet :

- Un cours dispensé à l'Université de Sydney avec des animations : http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/shock-waves.htm
- Une présentation de la Société européenne de balistique lésionnelle (SEBL) : http://www.eswb-sebl.org/lois_balistique_page04.htm
- Une discussion (en anglais) dans *The Physics Hyperbooks* : http://physics.info/shock/
- Deux documents plus approfondis émanant de l'ONÉRA (Office national d'études et de recherches aérospatiales) : http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/46435/cfm2011_1103.pdf?sequence=1 https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/hal-01077367/document

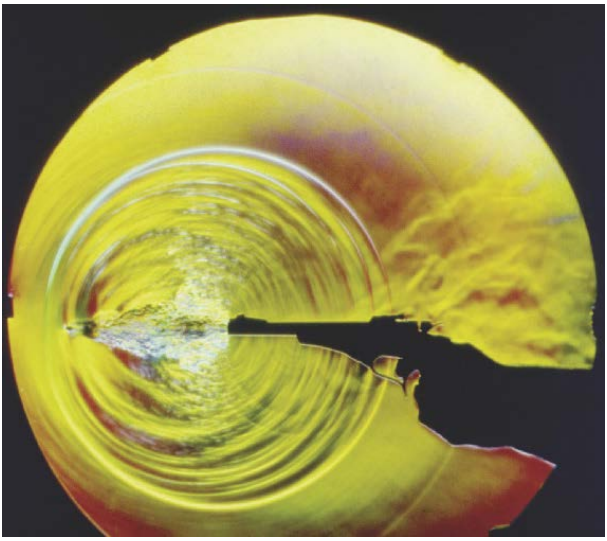


Figure 12b - Onde de choc d'une balle subsonique
http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-les-ondes-de-choc-prises-sur-le-vif-19701.php

3.2.2. *Exercice d'application : avion supersonique, ondes de sillage et bang supersonique*

Un avion est supersonique et vole à $\boxed{v = 1{,}5 \cdot c_{son}}$ (soit $510\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$). À l'instant $t_0 = 0\,\mathrm{,}$ l'avion est au point M_0 de sa trajectoire. À $t_1 = 0{,}1\ \mathrm{s}\,\mathrm{,}$ il est en M_1 ; à $t_2 = 0{,}2\ \mathrm{s}\,\mathrm{,}$ il est en $M_2 \ldots$

Questions

1. Sur papier millimétré, disposer le point M_0 vers le milieu de la feuille. Porter sur une droite horizontale, à l'échelle 1,5 cm pour 51 m, les positions successives M_0, $M_1, \ldots, M_6$ de l'avion sur sa trajectoire.
2. On analyse le phénomène à la date $t_6 = 0{,}6\ \mathrm{s}$: l'avion est en M_6 et une onde sphérique acoustique prend juste naissance au niveau de cette position. À cette date t_6, tracer au compas les limites atteintes par ces ondes sphériques, qui sont circulaires dans le plan de la feuille pour chaque point M_i considéré.
3. Montrer, à l'issue de cette construction, que l'avion laisse un sillage conique (triangulaire ici) dont on tracera, depuis le point $M_6\,\mathrm{,}$ les bords (c'est l'enveloppe de toutes les ondes précédentes : elle cumule donc leur énergie). Donner l'expression de son angle d'ouverture en fonction de v et c_{son}.
4. Un observateur qui voit arriver sur lui cet avion peut-il entendre le bruit des réac-

teurs ? Comment interpréter, sur votre schéma, le subit claquement engendré, appelé « bang supersonique » ?

Réponses

1. Au bout de $\Delta t = t' - t$, l'avion franchit la distance $d_{avion} = v \cdot \Delta t$; le front de l'onde sphérique créé à t franchit pendant cette durée la distance $d_{onde} = c_{son} \cdot \Delta t = \frac{v}{1,5} \times \Delta t$ qui est inférieure à d_{avion} d avion.
2. Construction :

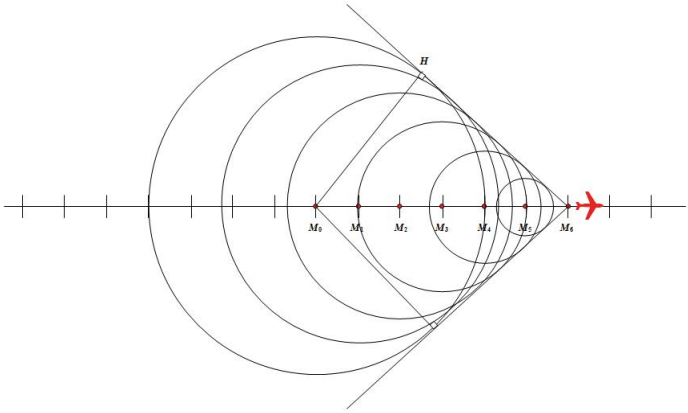


Figure 13A - Construction des ondes progressives créées par un avion supersonique.

3. L'onde reste en arrière de l'avion, ce qui conduit à former un sillage conique qui, à un instant t, est l'enveloppe de toutes les ondes sonores laissées en arrière de l'avion. L'angle au sommet de ce cône ou ouverture angulaire vaut 2θ tel que $\sin\theta = \frac{M_0 H}{M_0 M_6} = \frac{c_{son}}{v}$; $\theta \approx 42°$ ici.
4. Un observateur ne peut entendre l'avion qui se dirige vers lui. Après le passage de l'avion, le sillage parvient à l'observateur qui reçoit d'abord l'enveloppe conique de toutes les ondes. Cette enveloppe renferme un maximum d'énergie, car les ondes individuelles s'appuient toutes au même instant sur un cône dont le sommet est donné par la position de l'avion (sur le schéma réalisé en coupe longitudinale, cette enveloppe est matérialisée par deux droites sécantes). L'air est fortement compressé et détendu à la réception de cette « vague » géante : d'où un brusque claquement appelé bang supersonique. Il vient ensuite toutes les ondes qui sont à l'intérieur du cône où se situe une zone de « remous » ; les ondes sont alors reçues les unes après les autres à une fréquence qui diminue progressivement. Là encore, on a un effet Doppler : il en résulte un bruit rappelant un « roulement » qui révèle le bruit des réacteurs. Voilà ce

que l'on pourrait dessiner en « 3D » (cf. figure 13B).

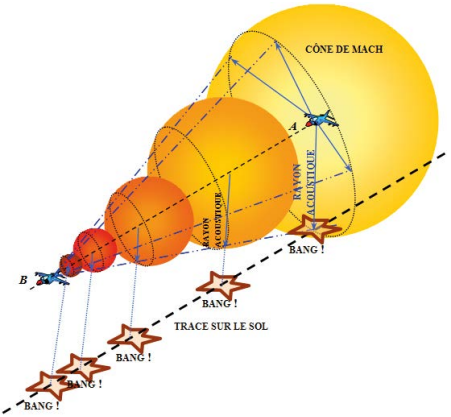


Figure 13B - À un instant donné, les ondes sonores émises par l'avion de A jusqu'en B sont confinées dans un cône. Le bang est entendu par un observateur au sol quand il est atteint par la surface du cône.

3.4. Le tonnerre

- Écouter le tonnerre : un site institutionnel québécois intéressant à explorer pour ce sujet : https://www.ec.gc.ca/foudre-lightning/default.asp?lang=Fr&n=4EFD3A52-1

  Extrait de l'introduction : *« Là où l'on voit un éclair, le tonnerre grondera, et si le tonnerre gronde, on verra des éclairs. Le tonnerre est le bruit de l'onde de choc que produit la foudre alors qu'elle chauffe l'air à 30 000 °C en moins d'une seconde. Il s'agit de cinq fois la température à la surface du soleil ! L'air autour du canal de la trajectoire de la foudre s'élargit de façon explosive et crée une onde de choc, qui produit à son tour les ondes sonores du tonnerre. Vous êtes-vous déjà demandé pourquoi le grondement du tonnerre peut être différent d'un éclair à un autre ? Selon les conditions atmosphériques, vous pouvez entendre le tonnerre d'aussi loin que 20 km, ou d'aussi près que 8 km. Les différences de grondements du tonnerre s'expliquent par un certain nombre de facteurs : la distance entre vous et l'éclair, la température de l'air, la nébulosité, le degré d'humidité de l'air, de même que l'emplacement du canal de la foudre par rapport à l'endroit où vous vous trouvez. La lumière voyage à 300 000 km/s, tandis que le son voyage à 0,3 km/s. Voilà pourquoi vous pouvez observer un éclair avant d'entendre le grondement du tonnerre que produit la foudre. À mesure que la distance de l'éclair augmente, le grondement du tonnerre diminue. Cela s'explique par le fait que les fréquences plus élevées sont absorbées de façon sélective. C'est exactement comme lorsque de la musique est jouée dans une autre pièce : vous pouvez entendre les notes basses, mais pas les notes hautes ».*

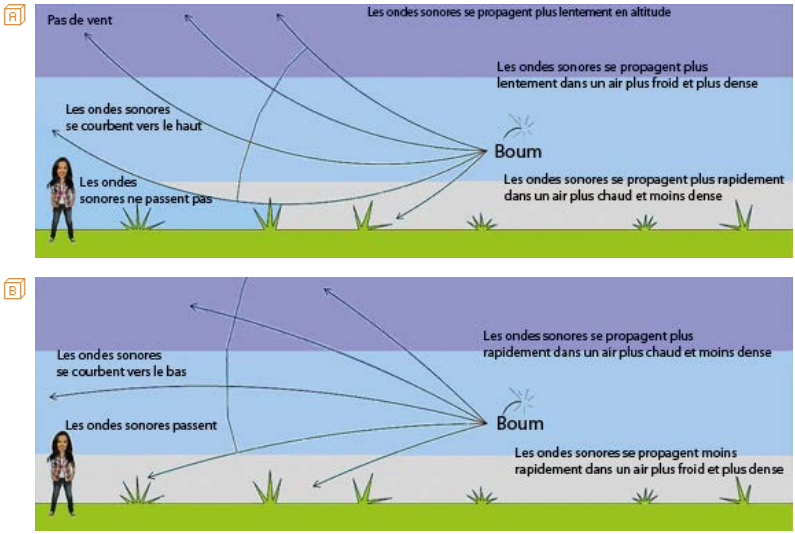


Figure 14 - Réfraction des ondes sonores à l'origine du tonnerre dans des couches d'air de densité et température différentes
https://www.ec.gc.ca/foudre-lightning/default.asp?lang=Fr&n=4EFD3A52-1

◆ Écouter le tonnerre : une communication présentée par Gaspard-Gustave de Coriolis en 1833

Une tentative pour expliquer l'origine du son perçu en relation avec le trajet suivi par la foudre dans les couches d'air traversées :
https://www.bibnum.education.fr/sciencesdelaterre/meteorologie/sur-le-bruit-du-tonnerre
Coriolis cherche une interprétation «mécanique» du phénomène qui doit s'opérer à l'échelle microscopique. En s'appuyant sur le fait qu'une onde sonore se propage avec une vitesse finie qui entraîne un retard dans la propagation d'autant plus grand que l'observateur est distant, Coriolis interprète intuitivement le phénomène sonore perçu. Une analyse très intéressante de la communication de Coriolis dans son contexte historique est proposée sur ce même site :
https://www.bibnum.education.fr/sites/default/files/analyse-coriolis.pdf
Actuellement, on sait que le claquement du tonnerre est dû à la réception d'une onde balistique, enveloppe des ondes de sillage, qui se propage vers l'observateur alors que le roulement est dû à la réception individuelle des ondes sphériques de sillage émises aux différents points de l'air traversés successivement par la foudre.

4. PROPAGATION DANS UN MILIEU BORNÉ OU PRÉSENTANT DES OBSTACLES

Historiquement, nous avons vu au paragraphe 1. Propagation dans l'air que pour

interpréter beaucoup des phénomènes qui se sont avérés en fait être la marque du caractère ondulatoire du son, les physiciens anciens ont fait appel à la notion de « rayon acoustique » comparativement à celle de « rayon lumineux ». Ce point de vue est judicieux pour rendre compte :

- de la réflexion d'un son (« l'écho ») qui peut être « spéculaire » ou « diffuse » comme pour la lumière ;
- de la réfraction des ondes sonores lors de leur propagation dans des milieux hétérogènes comme l'atmosphère stratifiée en couches successives.

Il est moins pertinent pour rendre compte de la diffraction d'une onde sonore par un obstacle, même si l'existence de ce phénomène a été repérée très tôt dans l'histoire des sciences, ou pour interpréter tout ce qui se rapporte aux phénomènes interférentiels (interférences, ondes stationnaires, résonance) alors que la facture des instruments de musique a très tôt su prendre en compte empiriquement l'importance de ces phénomènes acoustiques.

4.1. Réflexion et réverbération

4.1.1. L'écho

Dans sa propagation dans l'air, le son suit des trajets que l'on peut symboliser par des « rayons acoustiques » : face à un obstacle qui est l'analogue d'un « miroir », chaque rayon va subir une réflexion dans une direction privilégiée qui obéit aux lois de la réflexion déjà établies en optique. Cette modélisation du trajet des ondes acoustiques a été élaborée progressivement au XVII^e^ siècle, notamment par des enseignants jésuites, comme Athanasius Kircher, professeur au Collège romain, qui publia en 1673 un traité d'acoustique complet, intitulé *Phonurgia nova*.

- Lire l'excellent article publié par *La Recherche* dans le n° 474 de mars 2013 :
  http://www.larecherche.fr/idees/histoire-science/origines-echo-01-04-2013-99447

  Extrait : *« Kircher perçoit l'écho comme une image renvoyée par un miroir et postule l'existence d'une "phonocamptique", pendant sonore de l'optique. Il existe des rayons "phonocamptiques" qui, à l'instar des rayons lumineux, se propagent en ligne droite. Les échos sont produits par la réflexion de ces rayons sonores sur des obstacles. De même que les images optiques sont formées par la réunion des rayons visuels, les images sonores sont générées par la réunion des rayons "phonocamptiques". Pour que l'organe de l'ouïe soit ébranlé et qu'on puisse entendre l'écho, il suffit que l'oreille se situe dans la ligne de réflexion. Et Kircher d'appliquer purement et simplement, comme en optique, la loi d'égalité des angles d'incidence et de réflexion énoncée successivement par le Hollandais Snell et le Français Descartes. Tout étant désormais affaire de géométrie, Kircher examine la réflexion par des objets de différentes formes, plans, angulaires, courbes, elliptiques ou paraboliques. Constructions géométriques à l'appui, il montre que les objets concaves, les plafonds voûtés par exemple, focalisent les sons et que les phénomènes de*

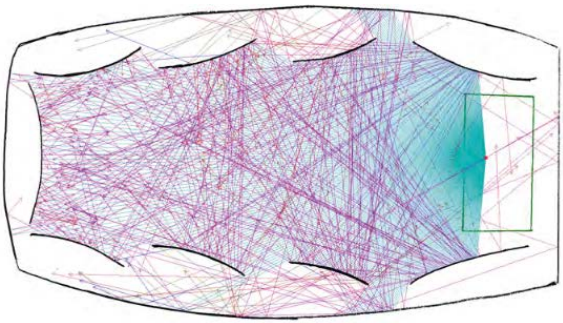
l'écho sont inhérents à la configuration des lieux. Kircher parvient ainsi à expliquer rationnellement l'acoustique de plusieurs constructions célèbres pour leurs vertus sonores, telle la villa Simonetta, à Milan ».

- Voici ce qu'en dit plus tard, en 1755, l'Encyclopédie de Diderot et de D'Alembert : http://encyclopédie.eu/index.php/science-mathematiques/physique/2722491-ECHO
  Extrait : *« Le son est répété par la réflexion des particules de l'air mises en vibration ; mais ce n'est pas assez de la simple réflexion de l'air sonore pour produire l'écho, car cela supposé il s'ensuivrait que toute la surface d'un corps solide et dur, serait propre à redoubler la voix ou le son, parce qu'elle serait propre à les réfléchir, ce que l'expérience dément. Il paraît donc qu'il faut pour produire le son, une espèce de voute qui puisse le rassembler, le grossir, et ensuite le réfléchir, à-peu-près comme il arrive aux rayons de lumière rassemblés dans un miroir concave. Lorsqu'un son viendra frapper une muraille derrière laquelle sera quelque voute, quelque arche, etc. Ce même son sera renvoyé dans la même ligne, ou dans d'autres lignes adjacentes. Cela posé, pour qu'on puisse entendre un écho, il faut que l'oreille soit dans la ligne de réflexion ; et pour que la personne qui a fait le bruit puisse entendre lui-même son propre son, il faut encore que cette même ligne soit perpendiculaire à la surface qui réfléchit ; et pour former un écho multiple ou tautologique, c'est-à-dire qui répète plusieurs fois le même mot, il faut plusieurs voutes, ou murs, ou cavités placés ou derrière l'une l'autre, ou vis-à-vis l'une de l'autre.* […] *Si l'obstacle ou le corps réfléchissant est éloigné de celui qui parle, de quatre-vingt-dix toises, le temps qui se passe entre le premier son et le son réfléchi, est d'une seconde, parce que le son fait environ cent quatre-vingts toises par seconde ; de sorte que l'écho répétera toutes les paroles ou les syllabes qui auront été prononcées dans le temps d'une seconde : ainsi lorsque celui qui parle aura cessé de parler, l'écho paraitra répéter toutes les paroles qu'on aura prononcées. Si l'obstacle se trouve trop proche, l'écho ne redira qu'une syllabe ».*

4.1.2. Écho et réverbération d'un son

Le modèle du « rayon acoustique » garde sa pertinence quand il faut rendre compte de l'acoustique d'une salle de concert : les réflexions multiples observées contribuent à définir ce phénomène que l'on désigne par « réverbération ». On trouve de très nombreux dossiers sur Internet consacrés à l'acoustique des salles de concert. Nous ne retiendrons ici que quelques contributions qui utilisent de façon très imagée cette notion de « rayon acoustique » pour déterminer les caractéristiques des multiples réflexions se produisant au sein de la salle.

- Consulter le site d'un des grands spécialistes de l'acoustique des salles de concert, le bureau d'études en acoustique Kahle :
  http://www.kahle.be/fr/accueil.html
  Pour être convaincu de la difficulté à bien modéliser les trajets des ondes sonores dans un auditorium, parcourir le document référencé ci-dessous de la société Kahle :
  http://www.kahle.be/articles/Programme-acoustique882B7.pdf



Les réflecteurs garantissent une bonne projection depuis les sources sonores vers le public et une bonne présence de ces sources, tandis que le grand volume acoustique de la salle permet un temps de réverbération plus long et une présence suffisante de la salle et du champ tardif.

Figure 15 - Complexité des trajets des « rayons acoustiques » dans une salle de concert. Simulation réalisée par le Cabinet Kahle
http://www.kahle.be/articles/Programme-acoustique882B7.pdf

- Lire ce bon dossier pour l'amateur d'effets spéciaux visant à recréer une réverbération à partir d'un son électronique « plat » :
  http://fr.audiofanzine.com/effet-studio/editorial/dossiers/la-reverberation-acoustique.html
  Extrait : *« Les sons, quel que soit le milieu dans lequel ils se propagent, subissent des réflexions sur les solides qui les entourent (sol, murs…). Ces réflexions sont fonction de nombreux paramètres : la forme et la matière des parois réfléchissantes, l'épaisseur de ces parois, la matière de ce qui se trouve derrière les parois réfléchissantes (gaz ou solide), et d'autres paramètres comme le niveau sonore de la source. L'ensemble des réflexions dans ce milieu s'appelle la réverbération. La réverbération acoustique se divise en plusieurs phases : tout d'abord, les réflexions primaires sont provoquées par le retour de l'onde source après sa première réflexion sur les parois. Les réflexions secondaires, plus diffuses, arrivent dans un deuxième temps, après deux ou plusieurs réflexions. Ces deux phases sont bien distinctes et apportent chacune une information différente à l'auditeur. Pour simplifier, l'oreille humaine utilise principalement la durée entre le son original et les réflexions primaires pour déterminer la taille de l'endroit qui l'entoure, alors que les réflexions secondaires lui indiquent surtout le type et la complexité du milieu dans lequel se trouve l'auditeur ainsi que sa distance à la source émettrice. On appelle communément "réverbération" les réflexions secondaires, les réflexions primaires n'ayant pas de nom particulier ».*
- Consulter également ces fondements plus théoriques proposés par l'Université de Nice :
  http://physique.unice.fr/sem6/2012-2013/PagesWeb/PT/Reverberation/page1.html
  De bons exemples sonores sont fournis dans le site !
- Pour public de physiciens avertis :
  – un document de l'Université de Magdebourg lors d'une conférence donnée au

Laboratoire bordelais de recherche en informatique (LaBRI) de l'Université de Bordeaux :
http://dafx.labri.fr/main/papers/p117.pdf

– un document de l'École nationale supérieure d'architecture de grenoble (ENSAG) :
http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/atenzia/RA05-Correction-acoustique.pdf

- Une célèbre suite logicielle, créée par la société Comsol, qui permet par son module "Ray acoustics" de simuler le trajet des rayons acoustiques dans une salle :
https://www.comsol.fr/acoustics-module

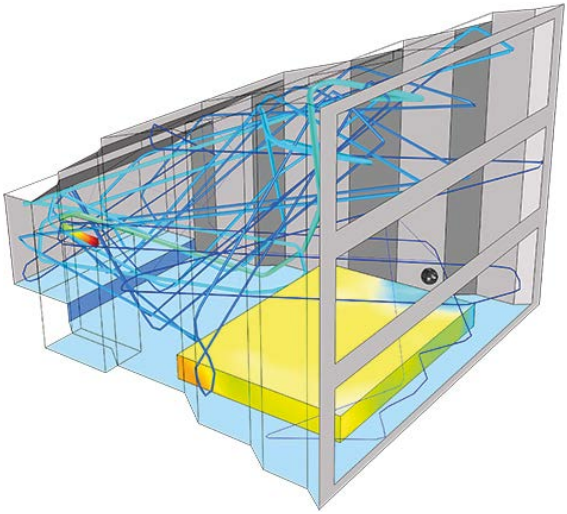


Figure 16 - Calcul du trajet des rayons acoustiques afin d'optimiser le niveau d'intensité sonore sur la scène d'un auditorium
https://www.comsol.fr/acoustics-module

Les simulations évoquées dans les figures 15 (cf. page ci-contre) et 16 (cf. ci-dessus) ne peuvent ignorer la nature ondulatoire du son : on ne peut interpréter correctement les réflexions des ondes sonores par de pures considérations géométriques. Il faut tenir compte des mécanismes physiques de propagation d'une onde sonore, comme le propose la mécanique des fluides. Les travaux de Lagrange, puis de Fourier, Helmholtz trouvent leur aboutissement dans ceux de Rayleigh qui affirme, à la fin du XIX^{e} siècle, le caractère ondulatoire du son. Rayleigh montre que la notion de « réflexion spéculaire » d'un rayon acoustique n'est valide que dans le cas très particulier des faibles longueurs d'ondes sonores (ce qui est rarement réalisé, car les sons audibles de la partie du spectre sonore dite « médium » ont des longueurs d'onde comparables aux dimensions de la plupart des objets environnants) et dans le cas d'obstacles lisses et étendus. Dans la plupart des situations, l'onde sonore est diffusée ou diffractée, dès

que le motif de l'obstacle a des dimensions voisines de la longueur d'onde utilisée : on peut ainsi, par des écrans de taille et de structure convenablement dessinée, diffuser ou renvoyer au contraire dans des directions données, les différentes composantes d'une onde sonore suivant la fréquence de celles-ci.

- Pour réviser tout ce qui concerne la « réverbération » du son dans une salle, un bon site :
  http://sacura.chez.com/acoustique/reverberation.html

4.1.3. Diffusion et dispersion d'un son

Rayleigh rend compte des différences de hauteur observées parfois entre le son émis et le son réfléchi par l'écho. Ce phénomène continue d'intriguer, et la « phonocamptique » a été impuissante à l'expliquer. Ainsi, pourquoi les forêts de pins produisent-elles des échos plus aigus que la voix d'origine ?

RAYLEIGH a expliqué avec succès le bleu du ciel par une diffusion des courtes longueurs d'onde lumineuses par les molécules d'air. De la même manière, il attribue le changement de tonalité du son à une meilleure diffusion des courtes longueurs d'onde sonore, c'est-à-dire des aigus. Parmi les différentes fréquences composant la voix humaine, les aigus sont mieux rediffusés par de petits obstacles comme les herbes ou les aiguilles de pin.

- Lire à ce sujet :
  http://www.larecherche.fr/idees/histoire-science/origines-echo-01-04-2013-99447

4.2. Diffraction d'une onde sonore

La limite entre diffraction et diffusion n'est pas aisée à établir : la diffraction se produit lorsque la taille de l'obstacle est voisine de celle de la longueur d'onde sonore alors que la diffusion est due à des objets de taille petite devant celle de la longueur d'onde sonore. La diffraction des ondes sonores par les arbres d'une forêt permet de comprendre pourquoi, lors d'une partie de cache-cache, un enfant qui s'éloigne pour se cacher peut entendre celui qui « clume » (compte) alors que ce dernier est adossé derrière un tronc ! Le physicien britannique William Bragg a montré que les arbres se comportent vis-à-vis des ondes sonores comme de véritables réseaux de diffraction, à la manière de certains cristaux vis-à-vis de la lumière du soleil, diffusant certaines fréquences à l'exclusion d'autres. Cette constatation établie à la fin du XIX^{e} siècle a trouvé un regain d'intérêt avec la création des cristaux phononiques.

- Voici un projet des Olympiades de Physique France élaboré par des élèves du Lycée Bernard Palissy d'Agen en 2014 :
  http://bordeaux.udppc.asso.fr/index.php/olympiades-de-physique/dossiers-2014-2015
  « L'article de Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik, "Sculpter les sons", paru dans le n° 436

de "Pour la science" en février 2014 décrit d'étranges structures périodiques permettant de réfléchir certains sons ou de les piéger en fonction de leur fréquence ou de leur direction. Ces cristaux phononiques sont des structures périodiques comprenant au moins deux matériaux aux propriétés acoustiques différentes qui peuvent être utilisées pour contrôler les ondes. Le premier, l'artiste espagnol Eusebio Sempere a créé sans le vouloir, une structure bien régulière de tiges verticales d'acier permettant de sculpter l'ambiance sonore autour d'elle. Le spectateur n'entend pas les sons de certaines fréquences provenant de l'autre côté de l'œuvre. M. Sempere a fabriqué le premier cristal "sonique". Francisco Meseguer et ses collègues, de l'Université de Valence, ont confirmé que l'atténuation de certains sons n'était pas due à l'absorption par les matériaux de la structure, mais à la diffraction. On peut montrer que si l'onde arrive dans plusieurs directions, le réseau pourra la réfléchir dans certaines directions et sera transparent pour d'autres. Certaines fréquences ne peuvent plus se propager dans le cristal. Le système se comporte alors idéalement comme un miroir. Il comporte une bande de fréquences interdites, ne pouvant pas le traverser. Les chercheurs essayent de mettre au point des structures antibruit en utilisant cette propriété ».



Figure 17 - La sculpture de Sempere réalisée à Madrid est un véritable cristal phononique qui, par diffraction, filtre dans des directions privilégiées certains bruits de la circulation ambiante ! http://www.nature.com/nature/journal/v462/n7276/fig_tab/462990a_F1.html

- Lire à propos de la sculpture de Sempere : http://www.femto-st.fr/fr/Diffusion/Une-introduction-aux-cristaux-phononiques
- Pour aller plus loin sur les cristaux phononiques : http://www.femto-st.fr/fr/Diffusion/Une-introduction-aux-cristaux-phononiques-4
- Pour réviser toutes ces notions de réflexion, diffusion, diffraction à un niveau élémentaire : http://www.audiosonica.com/fr/cours/post/16/Theorie_du_son_Comportement_du_son

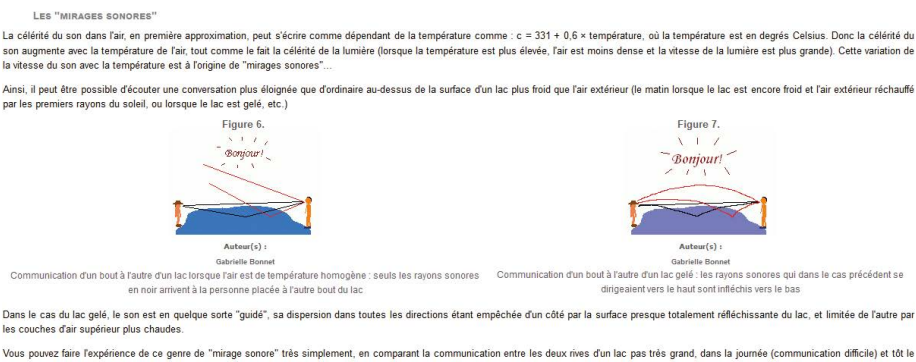
http://scientifichealer.com/courses/phy123/sounddiff.html (en anglais)
http://www.acoustics.salford.ac.uk/feschools/waves/diffract2.php (en anglais)
http://www.physicsclassroom.com/class/sound (en anglais).

- Des simulations utilisées pour comprendre comment sont diffractées les ondes acoustiques par un mur antibruit ou à la sortie d'un turboréacteur :
  http://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial_files/Web-inter-diffrac.htm
- De l'importance de la diffraction dans la conception des enceintes acoustiques, un blog très intéressant, en langue anglaise :
  http://www.salksound.com/wp/?p=160

4.3. Réfraction des ondes sonores

Nous avons vu que la célérité des ondes sonores dans l'air est une fonction affine de la température. L'air, au voisinage du sol, peut être un milieu très hétérogène lorsqu'il fait très chaud ou très froid à la surface du sol, ce qui favorise sa stratification en couches de densité et de température différentes : dans ces conditions, le trajet d'un « rayon acoustique » sera courbé par réfractions successives à la traversée de ces couches. Il peut en résulter de véritables mirages acoustiques dont un exemple a déjà été donné en figure 14 pour le tonnerre.

- Lire, sur ce site institutionnel du gouvernement canadien :
  https://www.ec.gc.ca/foudre-lightning/default.asp?lang=Fr&n=4EFD3A52-1
- Lire également ces fiches éditées par l'École normale supérieure (ENS) de Lyon sur son site « Culture Sciences » :
  http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/RaySon.xml



LES "MIRAGES SONORES"

La célérité du son dans l'air, en première approximation, peut s'écrire comme dépendant de la température comme : c = 331 + 0,6 × température, où la température est en degrés Celsius. Donc la célérité du son augmente avec la température de l'air, tout comme le fait la célérité de la lumière (lorsque la température est plus élevée, l'air est moins dense et la vitesse de la lumière est plus grande). Cette variation de la vitesse du son avec la température est à l'origine de "mirages sonores"...

Ainsi, il peut être possible d'écouter une conversation plus éloignée que d'ordinaire au-dessus de la surface d'un lac plus froid que l'air extérieur (le matin lorsque le lac est encore froid et l'air extérieur réchauffé par les premiers rayons du soleil, ou lorsque le lac est gelé, etc.)

Figure 6.

Auteur(s) :
Gabrielle Bonnet

Communication d'un bout à l'autre d'un lac lorsque l'air est de température homogène : seuls les rayons sonores en noir arrivent à la personne placée à l'autre bout du lac

Figure 7.

Auteur(s) :
Gabrielle Bonnet

Communication d'un bout à l'autre d'un lac gelé : les rayons sonores qui dans le cas précédent se dirigeaient vers le haut sont infléchis vers le bas

Dans le cas du lac gelé, le son est en quelque sorte "guidé", sa dispersion dans toutes les directions étant empêchée d'un côté par la surface presque totalement réfléchissante du lac, et limitée de l'autre par les couches d'air supérieur plus chaudes.

Vous pouvez faire l'expérience de ce genre de "mirage sonore" très simplement, en comparant la communication entre les deux rives d'un lac pas très grand, dans la journée (communication difficile) et tôt le matin (communication facilitée).

Figure 18 - Réfraction des ondes acoustiques dans l'air et formation de mirages acoustiques
http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/RaySon.xml

- Un exemple spectaculaire de réfraction des ondes sonores dans la région nantaise au-

dessus du pont de la Beaujoire et du viaduc de la Jonelière :
http://www.nantes-erdre.fr/non-categorise/refraction-des-ondes-sonores-pont-de-la-beaujoire-viaduc-de-la-joneliere-leffet-amphitheatre

- Consulter aussi le portail de l'acoustique de la ville du Mans :
http://www.cite-acoustique.fr/m1r2_metier_acoust_propag.php
- Une bonne étude générale proposée par l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Lyon :
http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2000/premat/chap1.pdf
- Une notion importante : impédance acoustique $Z = \frac{p}{v}$ où p et la pression acoustique et v la vitesse de la particule. Dans des approximations usuelles, $Z \approx \rho_0 c_{son}$ où ρ_0 est la masse volumique du milieu (l'air ici) et c_{son} la célérité de l'onde sonore. Cette grandeur joue le rôle de « l'indice de réfraction » en optique et est essentielle pour rendre compte des phénomènes de réflexion et réfraction d'une onde acoustique :
https://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction_à_l'acoustique/Réflexion,_réfraction,_impédance_acoustique

4.4. Interférences, ondes stationnaires, résonance

En milieu borné, présentant donc des frontières séparant deux milieux distincts, les réflexions des ondes acoustiques sur les frontières peuvent donner lieu à des phénomènes d'interférences, plus exactement d'ondes stationnaires. S'il est très rare, à l'état naturel, d'observer de véritables interférences d'ondes acoustiques à partir de deux sources sonores « cohérentes », c'est-à-dire de même fréquence et possédant un déphasage relatif constant, il est commun d'observer la superposition d'au moins deux ondes acoustiques de même nature, entre une onde incidente et une onde réfléchie par exemple ou dans le cas de deux ondes identiques émises par deux haut-parleurs.

Les ondes stationnaires s'observent dans des colonnes d'air comme les tuyaux sonores, pour lesquelles le milieu de transmission est quasi unidirectionnel (une dimension est nettement plus grande que les autres qui elles-mêmes sont plus petites ou du même ordre de grandeur que les valeurs des longueurs d'ondes sonores impliquées). C'est aussi le cas dans des salles de concert assimilables à des « boîtes » : il y a alors plusieurs « modes » d'ondes stationnaires.

4.4.1. Exemple d'interférences sonores entre haut-parleurs d'une enceinte acoustique

- Un blog instructif dédié à ce problème :
« Les interférences entre les ondes émises par deux haut-parleurs sont un sujet rarement abordé ; pourtant ce phénomène physique agit directement sur les caractéristiques d'une enceinte acoustique, et en particulier sur sa directivité verticale. Prenons l'exemple d'une enceinte deux voies de configuration classique en apparence : un haut-parleur grave médium relayé dans les hautes fréquences par un tweeter disposé au-dessus. Un filtre passif assure alors la séparation entre

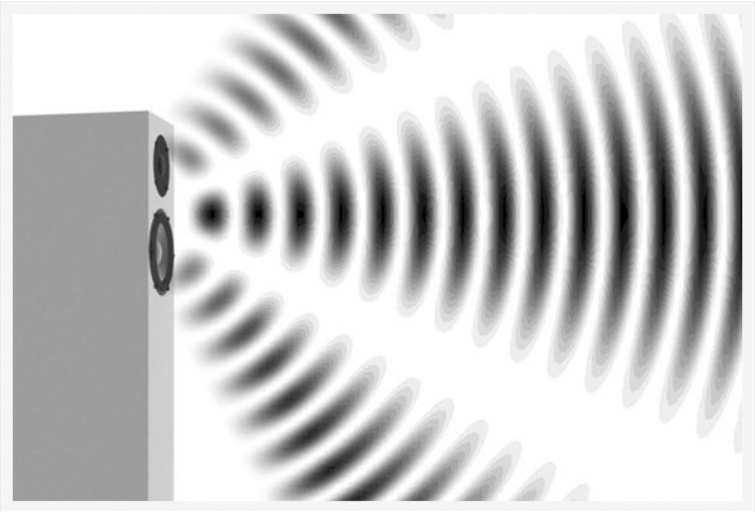
basses et hautes fréquences. Les courbes de réponse des haut-parleurs se croisent en un point que l'on appelle la fréquence de coupure. À cette fréquence, les deux haut-parleurs émettent le même signal, avec la même amplitude, et c'est ce second point qui fait que la fréquence de coupure est la plus sujette aux phénomènes d'interférences. En effet, la puissance de l'onde résultante peut être nulle si la phase relative des deux signaux est égale à 180°, mais elle est quadruplée si la phase relative est égale à 0°».

http://www.alexaudio.fr/la-lutte-contre-les-interferences/

Les interférences en dehors de l'axe d'écoute

En principe, toutes les enceintes sont optimisées pour fonctionner au mieux dans un axe d'écoute prédéfini; mais que se passe-t-il en dehors de cet axe?

Dans l'exemple ci-dessous, la fréquence de coupure représentée est de 2600Hz et l'entre-axes entre les haut-parleurs est de seulement 145mm. Nous pouvons voir que, en dehors de l'axe d'écoute, il demeure des zones où l'amplitude résultante est nulle; au delà de ces zones la phase relative s'améliore à nouveau mais les ondes résultantes ne sont plus du tout dans l'axe d'écoute. Cette configuration, très répandue, tant à rendre l'enceinte directive sur le plan vertical au abords de la fréquence de coupure.



Comment lutter contre les interférences ?

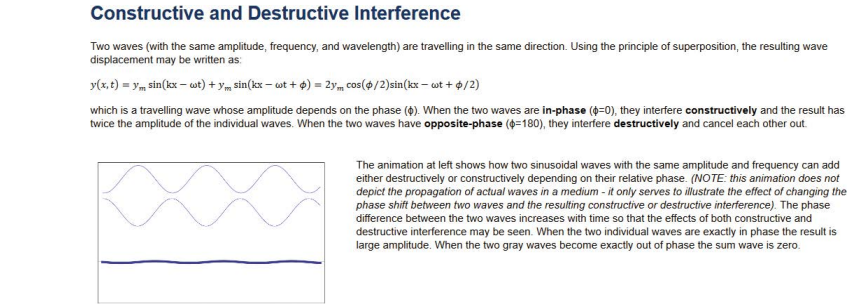
Pour atténuer ce phénomène il existe deux principaux axes d'amélioration possibles:

- diminuer la distance entre le woofer et le tweeter
- abaisser la fréquence de coupure, ce qui revient à augmenter le temps d'une période

Figure 19 - Interférences sonores entre haut-parleurs d'une enceinte acoustique à la fréquence proche de la fréquence de coupure. Pour y remédier, il faut éloigner les deux haut-parleurs et abaisser la fréquence de coupure.

http://www.alexaudio.fr/la-lutte-contre-les-interferences/

- Un site consacré à l'émission d'une onde sonore par un haut-parleur, avec ces problèmes d'interférences :
  http://www.techniquesduson.com/sourcessonores.html
- Pour réviser le principe de superposition de deux ondes cohérentes, un site américain aux animations probantes qui limite l'aspect mathématique à l'essentiel (Université de Pennsylvanie, déjà citée plusieurs fois dans cet article) :
  http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/superposition/superposition.html



Constructive and Destructive Interference

Two waves (with the same amplitude, frequency, and wavelength) are travelling in the same direction. Using the principle of superposition, the resulting wave displacement may be written as:

$$y(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx - \omega t + \phi) = 2y_m \cos(\phi/2)\sin(kx - \omega t + \phi/2)$$

which is a travelling wave whose amplitude depends on the phase (ϕ). When the two waves are **in-phase** (ϕ=0), they interfere **constructively** and the result has twice the amplitude of the individual waves. When the two waves have **opposite-phase** (ϕ=180), they interfere **destructively** and cancel each other out.

The animation at left shows how two sinusoidal waves with the same amplitude and frequency can add either destructively or constructively depending on their relative phase. *(NOTE: this animation does not depict the propagation of actual waves in a medium - it only serves to illustrate the effect of changing the phase shift between two waves and the resulting constructive or destructive interference).* The phase difference between the two waves increases with time so that the effects of both constructive and destructive interference may be seen. When the two individual waves are exactly in phase the result is large amplitude. When the two gray waves become exactly out of phase the sum wave is zero.

Figure 20 - Principe de superposition pour établir des conditions d'interférences ici destructives
http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/superposition/superposition.html

- Pour apprendre à bien disposer ses enceintes acoustiques et éviter, entre autres, les interférences entre elles :
  http://www.acouphile.fr/acousono.html

4.4.2. *Ondes stationnaires dans un tuyau sonore ou une salle de concert : modes propres*

Nous ne développerons pas trop le phénomène d'ondes stationnaires qui est à la base du fonctionnement d'un instrument de musique à vent. C'est le domaine de l'acoustique musicale, un sujet qui mériterait d'être traité à part.

- Consulter ces vénérables ouvrages historiques :
  http://hydraule.org/bureau/biblio/cours/gossin/chap_iv.htm
  http://data.bnf.fr/12284699/henri_bouasse/
  le cours fameux de Henri Bouasse, un spécialiste de l'acoustique en son temps !
- Consulter l'article «Jeux d'orgues» paru dans *Le Bup* n° 849, décembre 2002, p.1675-1693 disponible sur le site de l'UdPPC (mot clé : jeux) :
  http://udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/selections.php
  Un article de l'auteur de cet article de l'Arpenteur du Web pour tout savoir sur ces tuyaux sonores !

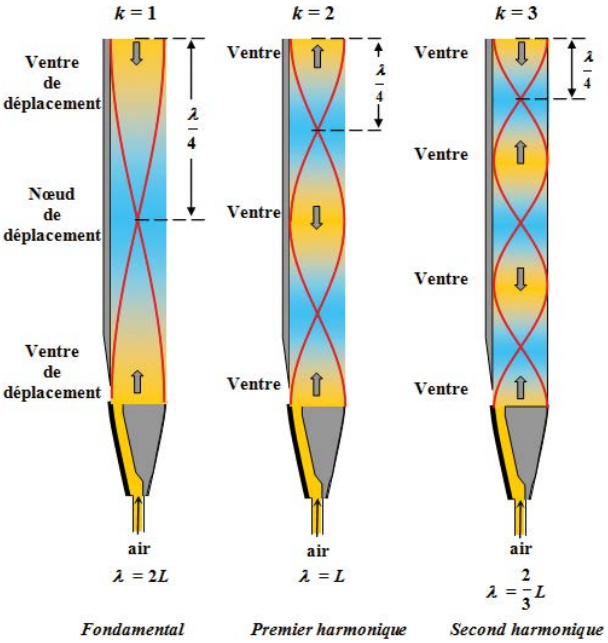


Figure 21 - Ondes stationnaires dans un tuyau d'orgues (figure parue dans *Le Bup* n° 849, décembre 2002).

- Olympiades de Physique France :
  De très nombreux mémoires, parmi lesquels, pour les plus récents :
  – Le lycée Joachim du Bellay d'Angers, «Tuyau pathologique» (concours 2013) : http://www.odpf.org/images/archives_docs/20eme/memoires/groupeN/memoire.pdf
  – Le lycée Bernard Palissy d'Agen, un spécialiste du genre…
  - *Du sureau à trous au trombone à anche* (concours 2013) : http://www.odpf.org/images/archives_docs/20eme/memoires/groupeC/memoire.pdf
  - *Trompettissima* (concours 2010) : http://www.odpf.org/images/archives_docs/17eme/memoires/gr-3/memoire.pdf
  - *Le saxophone en escalier* (concours 2009) : http://www.odpf.org/images/archives_docs/16eme/memoires/gr-3/memoire.pdf
  - *La Tclarinette* (concours 2009) : http://www.odpf.org/images/archives_docs/16eme/memoires/gr-4/memoire.pdf
  La lecture passionnante de ces mémoires vous permettra de tout savoir sur les notions suivantes : tuyaux sonores, ondes stationnaires, harmoniques, résonance.
- Animations et logiciels :
  Il est difficile désormais de recommander des animations pour illustrer les phéno-

mènes d'ondes stationnaires dans un tuyau sonore, car les applets *Java* sont quasiment bannis des navigateurs modernes et il en sera de même des animations flash.

– Pour une présentation élémentaire s'adressant à des élèves de terminale S :
http://fpassebon.pagesperso-orange.fr/animations/ondes_stationnaires.swf

– Un cours et différentes animations de l'Université de Pennsylvanie, un document très complet (cf. figure 22) :
http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/StandingWaves/StandingWaves.html
Des liens sont incorporés au sein de ces pages pour voir de belles expériences classiques :
http://www.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/PHYS_130/FALL_2010/lectures/lect19/lecture19.html (modes d'un tuyau sonore)
http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/flutes.v.clarinets.html (instruments à vent).

– Un cours en ligne déjà cité plus haut :
http://resource.isvr.soton.ac.uk/spcg/tutorial/tutorial/Tutorial_files/Web-standing-nature.htm

– Figures de Ernst Chladni : spectaculaire !
http://www.stmary.ws/HighSchool/Physics/home/notes/waves/StandingWave.htm
Les effets de couplage entre l'excitateur et le milieu de transmission confiné dans une « boîte » ou une « colonne » se traduisent par des fréquences de résonance qui exaltent certains modes d'ondes stationnaires. Il faut respecter en effet des conditions aux limites, liées aux dimensions caractéristiques de ces « résonateurs ».

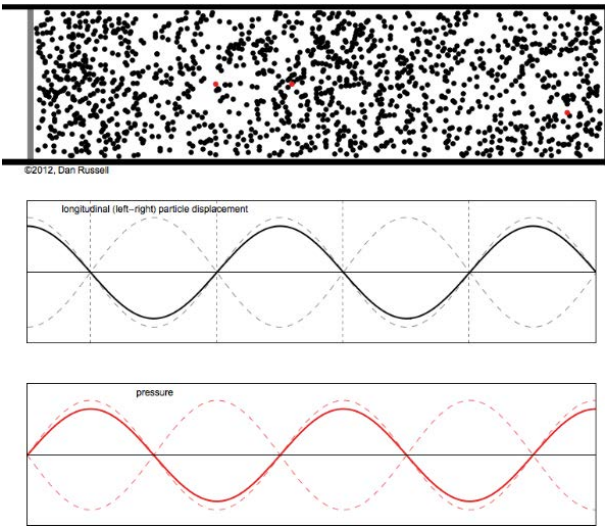


Figure 22 - Animation montrant l'évolution des ventres et nœuds de pression et d'élongation dans un tuyau sonore
http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/StandingWaves/StandingWaves.html

♦ Pour les modes de résonance dans une salle de concert, lire :

– Document de l'École nationale supérieure d'architecture de Grenoble (ENSAG) : http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/atenzia/RA05-Correction-acoustique.pdf de la page 42 à la page 47.

– Encyclopédie scientifique anglaise « DiracDelta » en ligne : http://www.diracdelta.co.uk/science/source/r/o/room%20modes/source.html

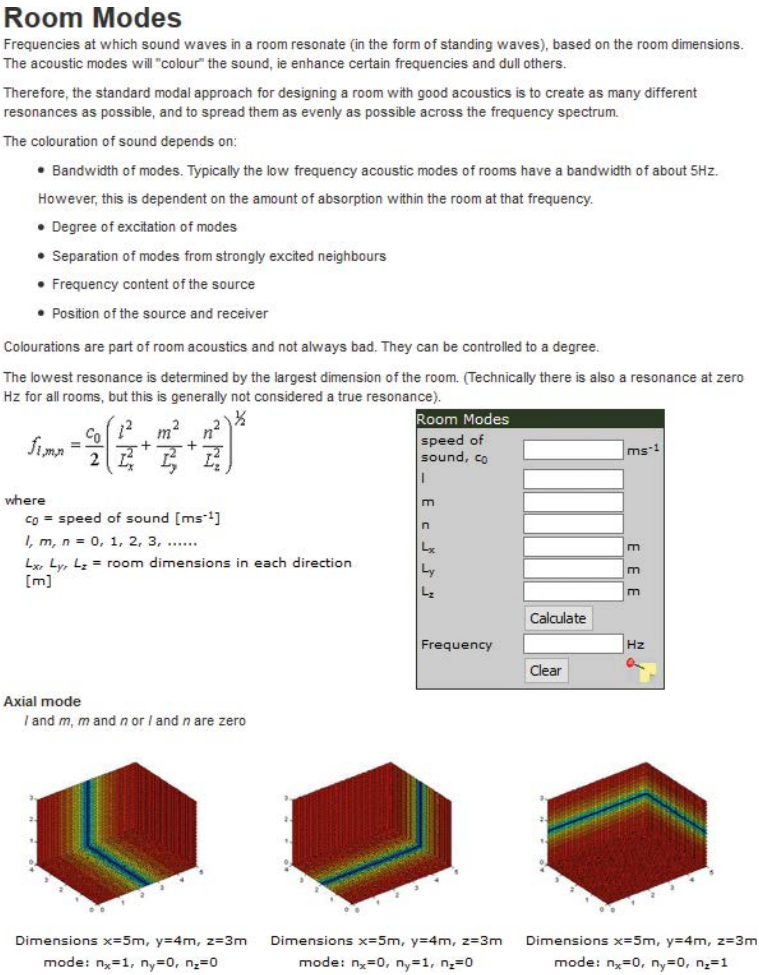


Figure 23 - Quelques modes de résonance d'une salle en forme de parallélépipède
http://www.diracdelta.co.uk/science/source/r/o/room%20modes/source.html

– Université de Nice : les modes d'un auditorium
http://physique.unice.fr/sem6/2012-2013/PagesWeb/PT/Reverberation/page1.html#ondes_stationnaires
Déterminer les fréquences des modes d'une salle est utile pour analyser les durées de réverbération.

4.4.3. La physique du porte-voix

◆ Comment amplifier et diriger une onde sonore, vu par l'encyclopédie de Diderot :
http://encyclopédie.eu/index.php/science-mathematiques/physique/1075308529-PORTE-VOIX

4.4.4. Un résonateur particulier : le résonateur d'Helmholtz

Qui n'a pas essayé d'émettre un son en soufflant dans l'embouchure d'une bouteille vide ? C'est l'analogue d'un résonateur d'Helmoltz : ce dispositif a joué un rôle historique considérable, car il a été un des premiers instruments capables de réaliser l'analyse harmonique d'un son pour déterminer sa hauteur.

Si une bouteille est assimilée à un tel résonateur, on montre que sa fréquence de résonance est telle que :

$$f \approx \frac{c_{son}}{2\pi} \times \sqrt{\frac{S}{\ell \cdot V}}$$

où est la célérité du son, S la section du goulot de la bouteille, ℓ la longueur du goulot et V le volume de la cavité. Cette formule suppose que le volume du goulot est très petit devant celui de la cavité et que la longueur d'onde du son à la résonance est grande devant la taille caractéristique de la cavité.



Figure 24 - Résonateurs d'Helmholtz
http://www.aseiste.org/

- L'Association de sauvegarde et d'étude des instruments scientifiques et techniques de l'enseignement (ASEISTE) a collecté ou inventorié de nombreux exemplaires de résonateurs d'Helmholtz dans les cabinets des lycées.
  http://www.aseiste.org/
  dans le menu Inventaires, champ « Nom de l'objet », saisir Helmholtz.

Etablissement : Lycée Chaptal (75) — *Discipline :* Acoustique - Vibrations
Ville : Paris (08) — *Typologie :* Utile

APPAREIL ANALYSEUR DE HELMHOLTZ À FLAMMES MANOMÉTRIQUES DE KŒNIG

Fonction : Décomposer un son en ses notes élémentaires.

Description : Cet appareil est composé de huit résonateurs de Helmoltz (voir la fiche correspondante) et de huit capsules manométriques de Koenig (voir la fiche correspondante).
Les résonateurs donnent la note fondamentale ut_2 et les sept premiers harmoniques ut_3, sol_3, ut_4, mi_4, sol_4, sib_4, ut_5. Ils sont fixés sur un support vertical en fonte, l'un au-dessus de l'autre par ordre décroissant de leur diamètre. Chacun d'eux communique par un tube de caoutchouc avec une capsule manométrique.
Les becs de ces capsules se trouvent placés l'un au-dessus de l'autre, sur une ligne légèrement inclinée et à côté d'un miroir à quatre faces. L'axe de celui-ci, parallèle à la ligne de flammes, est solidaire de deux roues d'angle et d'une manivelle.

Mode Opératoire :



On produit un son composé dans le voisinage de l'appareil. On observe alors les flammes manométriques des résonateurs, vues dans le miroir tournant.
L'aspect continu et régulier de certaines flammes montre que les résonateurs correspondants sont restés "silencieux". On en déduit que le son étudié ne contient pas les notes de ces résonateurs-ci.
En revanche, certaines flammes présentent des dentelures vues dans le miroir tournant. On en déduit que chacun de ces résonateurs est entré en résonance avec une note contenue dans le son. Ainsi peut-on connaître la nature des notes qui compose un son ; celui-ci est donc analysé.



Constructeur : KOENIG

Figure 25 - Analyseur de Fourier par résonateurs d'Helmholtz
http://www.aseiste.org/

- Lire cette page très complète de l'Université de Galles du Sud en Australie :
  http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html
- Consulter pour l'analyse de Fourier d'un signal sonore avec les résonateurs d'Helmholtz ces pages de l'Université d'Harvard :
  http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/nu_lectures/lecture3%20/ho_helmholtz/ho_helmholtz.html

http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/papers/koenig_apparatus/Fourier_Synthesis/Fourier_Synthesis.html
http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/papers/koenig_apparatus/Fourier_Analysis/Fourier_Analysis.html

- Une vidéo du Smithsonian's National Museum of American History :
  https://www.youtube.com/watch?v=A9XLNH8FPd0
- Des vidéos amusantes :
  https://www.youtube.com/watch?v=PoEyIJx3uM0
  un cours en direct (en anglais)
  https://www.youtube.com/watch?v=G7IN4j_pJik
  une sculpture étrange !
  https://www.youtube.com/watch?v=9wpJ1BLkhBg
  comment jouer avec des bouteilles !

4.5. Absorption d'une onde sonore, filtrage et isolation phonique

Dès qu'une onde sonore parvient au niveau des frontières du milieu de transmission, une partie de celle-ci est absorbée. Plus exactement, une fraction de son énergie est transférée aux particules constituant l'obstacle. L'étude de ces transferts d'énergie est difficile pour tous les acousticiens dont le métier est de maîtriser l'absorption d'énergie sonore sur des panneaux, constituant des murs « antibruit », ou des structures chargées de contrôler la réverbération d'une salle de concert. Les ressources consacrées sur Internet à la lutte contre le bruit ou à l'amélioration de l'acoustique des salles de concert sont immenses, à la mesure des enjeux environnementaux qui ont pour mission de réduire les nuisances sonores ou d'améliorer l'acoustique de lieux publics (restaurants des collectivités, stations de métro, salles de spectacle). Nous ne donnerons ici qu'un aperçu représentatif de ces différentes problématiques.

4.5.1. Grandeurs énergétiques utiles

L'intensité sonore I en acoustique est la puissance transférée ou rayonnée par l'onde sonore par unité de surface et s'exprime donc en $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$ (c'est un peu l'équivalent de « l'éclairement énergétique » en optique).

En un point du milieu de transmission et à un instant t donné, l'intensité sonore est reliée la pression acoustique $p(t)$ de l'onde sonore autour de ce point et à la vitesse de déplacement de l'onde. Pour des ondes assimilables à des ondes planes, on a la relation $I = \dfrac{p^2}{\rho c_{son}}$ où ρ est la masse volumique de l'air. On utilise plutôt une échelle logarithmique pour définir une grandeur appelée le « niveau d'intensité acoustique L ». Cette grandeur est sans dimension, car elle compare une intensité sonore I donnée à une autre I_0 qui sert de référence (la plus faible qui puisse être détectée par une oreille

« moyenne ») :

$$L\,(\mathrm{dB}) = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad \text{avec} \quad I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}.$$

♦ Lire :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Intensit%C3%A9_acoustique

4.5.2. Sonomètres, décibelmètres : à quels décibels se vouer ?

Lors de la mesure d'un niveau d'intensité acoustique, il faut tenir compte de la sensibilité de l'oreille dont la réponse dépend de la fréquence du son perçu.

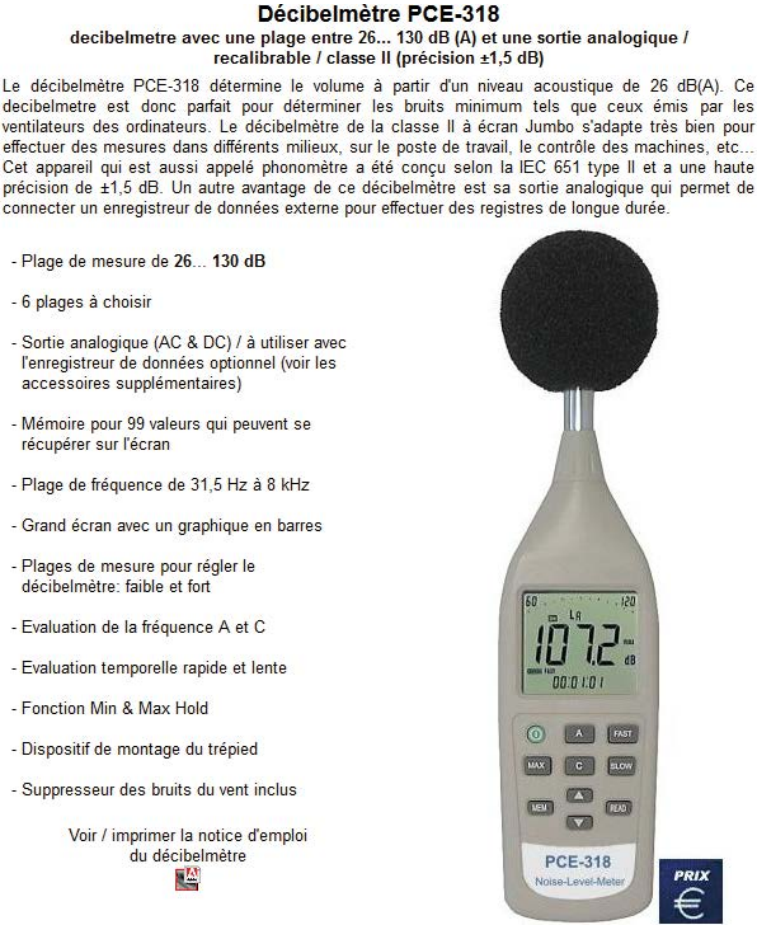


Figure 26 - Exemple de sonomètre ou décibelmètre proposé par la société PCE
http://www.pce-france.fr/mesureurs/sonometres.htm

- Lire ce document édité par l'ENS Lyon :
  http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/QSDecibelsSol.xml
  Extrait : *« À quoi correspondent les différents types de décibels (dBA, dBC, etc.) que l'on voit couramment sur les sonomètres, et comment les mesurer ? Pour mesurer l'intensité d'un son en dB, il suffit de disposer d'un microphone, qui convertit le son en courant, puis d'interpréter le courant obtenu en termes de décibels. Toutefois, ces décibels, s'ils traduisent la physique du son (indépendante du récepteur), ne correspondent pas vraiment à la perception que nous en avons, car l'oreille humaine ne perçoit pas toutes les fréquences de la même manière. Ainsi, un son ne sera pas perçu comme étant de même intensité s'il est de fréquence 1 kHz ou s'il est de fréquence 500 Hz. Les dBA, dBC, et autres variantes à partir de l'unité "dB", sont des tentatives de mesurer, non pas l'intensité sonore réelle, mais l'intensité sonore telle qu'elle sera perçue par une oreille humaine moyenne… Les dBA, dBC, etc. sont obtenus en utilisant un filtre "proche" dans son comportement de l'oreille humaine. Il n'est pas possible, cependant, avec un filtre unique de reproduire le comportement de l'oreille "moyenne" humaine (et encore moins celui des oreilles de chaque individu particulier, étant données les variations interindividuelles !). En effet, prenons un son de 40 dB (ceci correspond à un fonds sonore réduit) à 1 kHz. Pour obtenir une intensité perçue identique à 100 Hz, il faudra un son d'une intensité de 60 dB environ. Par contre, si on prend un son de 80 dB (ceci correspond au bruit d'un aspirateur, par exemple) à 1 kHz, un son de 85 dB à peine, à 100 Hz, suffit à donner la même impression d'intensité. Les dBA correspondent à un filtre, celui qui permet de reproduire le comportement de l'oreille normale moyenne pour une intensité perçue identique à celle de 40 dB à 1 kHz. Les autres décibels correspondent à d'autres domaines d'intensité : les dBC, par exemple, qui ont une courbe beaucoup plus "plate" que celle des dBA, correspondent au comportement de l'oreille humaine pour des intensités sonores plus élevées ».*
- Lire aussi cette page prise dans :
  http://www.engineeringtoolbox.com/decibel-d_59.html

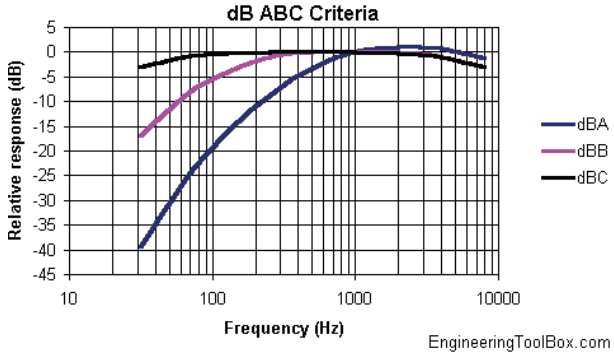


Figure 27 - Courbes de pondération relatives aux différentes définitions des échelles de décibels acoustiques
http://www.engineeringtoolbox.com/decibel-d_59.html

- Attention aux échelles logarithmiques !
  Une réduction de – 3 dB d'un bruit correspond à une intensité sonore qui a été divisée par deux ! Perdre quelques décibels, notamment pour diminuer le bruit des réacteurs, est parfois une mission impossible pour les ingénieurs comme l'a montré la difficile aventure de l'avion Concorde aux USA.
  Pour se rafraîchir la mémoire, lire cet article de *La Recherche* :
  http://www.larecherche.fr/savoirs/technologie/bang-reduit-avions-supersoniques-01-04-2010-88112
- Des « applis » pour son smartphone ou iPhone, où comment les convertir en sonomètre :
  https://play.google.com/store/search?q=sonometre&c=apps&hl=fr
  https://itunes.apple.com/fr/app/sonometre-gratuit/id333185568?mt=8
- Le bruit : un enjeu environnemental
  Lire, entre autres, une enquête et des recommandations de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) :
  http://www.ademe.fr/expertises/air-bruit/chiffres-cles-observations/dossier/bruit-lenvironnement/contexte-historique
  http://www.ecoresponsabilite.ademe.fr/n/les-enjeux-lies-au-bruit/n:207

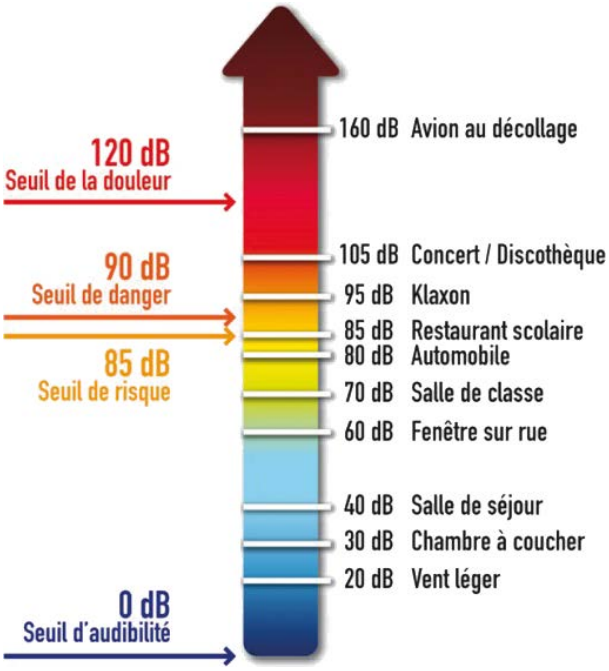


Figure 28 - Une échelle qui fixe quelques niveaux d'intensité sonore communs
http://www.ecoresponsabilite.ademe.fr/n/les-enjeux-lies-au-bruit/n:207

4.5.3. Filtrage du bruit et génie civil

Cette partie, plus technique, qui peut intéresser nos élèves des filières STL (Sciences et technologies de laboratoire) et STI2D (Sciences et technologies de l'industrie et du développement durable), est abondamment illustrée sur Internet.

Des cours fondamentaux

- Université de Montpellier :
  http://mon.univ-montp2.fr/claroline/backends/download.php?url=L0NvdXJzLzQtQ29ycmVjdGlvbl9hY291c3RpcXVlLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=FLPS601
  Cette partie du cours traite la correction acoustique des salles de concert, avec l'optimisation de la durée de réverbération par des panneaux absorbants judicieusement disposés. Une célèbre relation est utilisée par les techniciens pour maîtriser cette durée de réverbération : la formule de Sabine. Lire :
  http://www.conseils-acoustique.com/index.php/formule-de-sabine
- École nationale supérieure d'architecture de Grenoble (ENSAG) :
  http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/atenzia/RA05-Correction-acoustique.pdf
  Où l'on discute des choix des matériaux absorbants, des formes des surfaces à traiter, qui peuvent comporter des alvéoles en forme de résonateurs d'Helmholtz pour étouffer les fréquences les plus basses.
- Une révision sur toutes les notions d'acoustique abordées dans cette fiche par l' Institut universitaire de technologie (IUT) de Grenoble :
  http://www.gipsa-lab.grenoble-inp.fr/~yo.fujiso/acoustique/cours.pdf
  Parcourir ici le document à partir de la page 27. Un cours particulièrement bien fait où tous les fondements mathématiques des ondes sonores sont exposés avec clarté.

Le point de vue des professionnels

- Un bureau d'études « Lafont audio » qui présente de manière très imagée les notions de filtrage de fréquences sonores dans les constructions de salles et l'aménagement de studios d'écoute. Un excellent document en ligne :
  http://www.lafontaudio.com/criteres.htm
- Une présentation intéressante par une société belge.
  Lire, entre autres, les pages suivantes du site référencé ci-dessous :
  http://madeinacoustic.com/fr/correction-acoustique
- Faire soi-même son mur antibruit !
  Document mis au point avec l'aide du ministère de l'Écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire :
  http://www.bruit.fr/images/stories/pdf/guide_particuliers_realiser_mur_antibruit.pdf
  La même chose par nos voisins belges :
  http://www.environnement.brussels/uploadedfiles/Contenu_du_site/Professionnels/Themes/Bruit/Vademecum_du_bruit_routier_urbain/Vademecum_f11_fr.pdf?langtype=2060



Figure 29 - Brique élémentaire avec cavité résonnante de type Helmholtz pour mur anti-bruit
http://www.masterbloc.be/fr/nos-produits/soundblox-blocs-acoustiques

- Des entrepreneurs…
  Une courte liste parmi un nombre impressionnant de référencements !
  http://www.gabions.fr/page/235/1--comment-fonctionne-un-ecran-antibruit-ou-barriere-antibruit--.htm
  http://www.hellopro.fr/murs-anti-bruit-1001668-fr-1-feuille.html
- Et l'on peut s'amuser à chercher sur YouTube des exemples de réalisations de murs « antibruit » !
  À vous de trouver !

EN CONCLUSION

Solliciter nos sens, ici l'ouïe, et faire de la physique pour essayer de comprendre ce qu'est une onde sonore : un pari impossible ? Puisse cette fiche donner quelques pistes pour inciter nos élèves à ôter leurs oreillettes de leur smartphone et à écouter enfin le bruit du monde pour mieux apprécier ensuite le silence ! Compte tenu de l'extrême richesse de la physique ondulatoire, on mesure la difficulté pour un professeur à bien faire passer un message, ici sonore, qui soit cohérent et rompe avec la cacophonie de nos programmes, et qui aille au-delà des bavardages qui encombrent notre vie quotidienne, y compris sur Internet ! Il nous reste la musique, mais c'est une tout autre histoire que nous n'avons pas racontée ici !



Guy BOUYRIE
Professeur retraité
Talence (Gironde)