

Acoustique générale

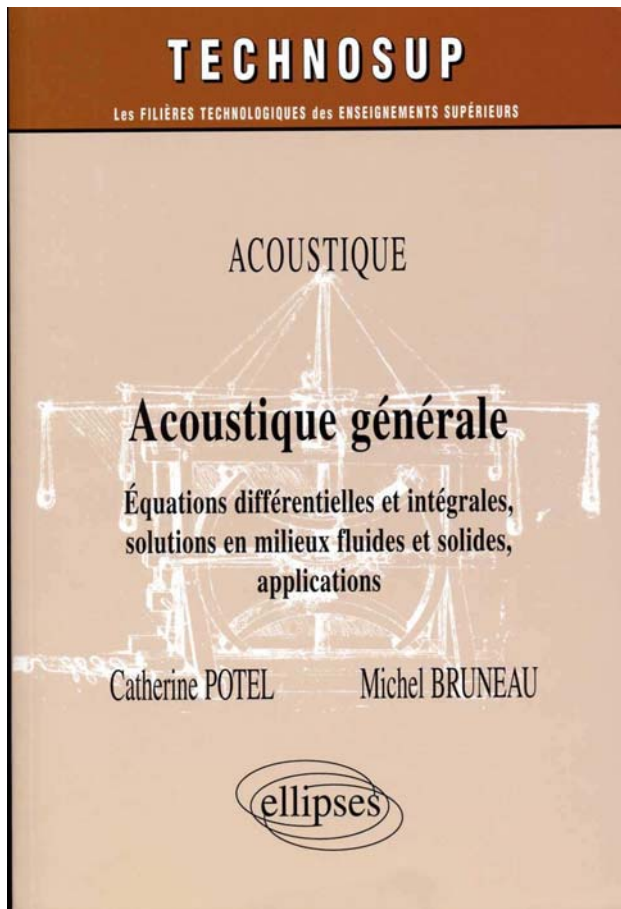
Catherine POTEL, Michel BRUNEAU
Université du Maine - Le Mans



Dissociés des commentaires oraux qui les accompagnent en séance, ces transparents peuvent en certains endroits paraître manquer de cohérence ; ils sont donc réservés aux auditeurs pour lesquels ils ont été conçus.

Transparents basés sur

C. POTEL, M. BRUNEAU, *Acoustique Générale - équations différentielles et intégrales, solutions en milieux fluide et solide, applications*, Ed. Ellipse collection Technosup, 352 pages, ISBN 2-7298-2805-2, 2006



La collection TECHNOSUP dirigée par Claude Chêze est une sélection d'ouvrages dans toutes les disciplines, pour les filières technologiques des enseignements supérieurs.

Niveau A **Approche** (éléments, résumés ou travaux dirigés) *IUT - BTS - 1^{er} cycle*
Niveau B **Bases** (cours avec exercices et problèmes résolus) *IUP - Licence*
Niveau C **Compléments** (approfondissement, spécialisation) *Écoles d'ingénieurs, Master*

L'ouvrage : niveaux B (Licence) et C (Master, Ecoles d'ingénieurs)

L'ouvrage fournit avec minutie les bases de l'acoustique classique, tout en présentant régulièrement un ensemble d'applications relevant de la pratique de l'acoustique. Il est construit pour être compréhensible sans avoir recours à d'autres documents. Son contenu est lié à l'acoustique en milieux fluides simples, puis en milieux solides homogènes. Les hypothèses sous-jacentes sont régulièrement précisées et les méthodes exposées conservent le plus souvent un caractère analytique.

Pour couvrir le domaine de l'acoustique fondamentale, l'ouvrage traite successivement : les ondes acoustiques, l'environnement sonore et la perception des sons, les équations générales, les solutions fondamentales dans les systèmes de coordonnées courants, les problèmes aux limites et leur formulation intégrale, la propagation en milieu solide homogène (avec application au contrôle non destructif par ultrasons). Il s'achève sur des annexes qui apportent des éclairages sur les éléments mathématiques utiles et sur certaines notions délicates (impédance, vitesses de phase et de groupe...).

Les auteurs :

Catherine Potel est Professeur des universités à l'Université du Maine, où elle est responsable du Master professionnel Acoustique des transports. Elle mène des travaux de recherche dans le domaine de l'évaluation et du contrôle non destructifs par ultrasons.

Michel Bruneau est Professeur émérite à l'Université du Maine, où il a dirigé le 3^e cycle d'acoustique et dont il a créé le Laboratoire d'acoustique associé au CNRS. Il mène des recherches dans le domaine des fluides dissipatifs confinés. Il a assuré diverses responsabilités scientifiques nationales.

Illustration de couverture : Dessin de Léonard de Vinci.



ISBN 2-7298-2805-2

Chapitre 1

L'acoustique et ses applications : généralités



Vue synoptique des métiers de l'acoustique : les quatre champs d'activités, les domaines de l'ingénierie, les secteurs spécialisés (de l'extérieur vers le centre). Adapté de R.B. Lindsay, J. Acoust. Soc. Am., 36, 1964, par Michel Bruneau, Pr., et Catherine Potel, Pr., Société Française d'Acoustique



LA MUSIQUE A LA PREHISTOIRE



Parmi les nombreux ossements et les reliefs alimentaires des hommes du Paléolithique, on trouve quelques phalanges de renne percées. Elles font des sifflets d'où sort un son clair et puissant. Ces phalanges portent toujours l'empreinte de morsures animales, les hommes se contentant d'arranger et de rendre réguliers ces trous. Les plus anciennes ont environ 100 000 ans. Plus les phalanges étaient petites et plus les sons produits étaient aigus.

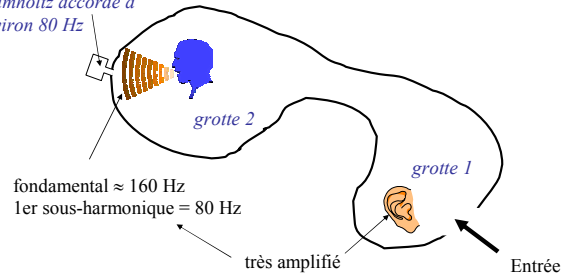


Les phalanges de renne sifflantes

<http://perso.wanadoo.fr/palladia/prehistoire/mediatheque.htm>

LES GROTTES

cavité+orifice tubulaire
= résonateur de Helmholtz accordé à environ 80 Hz



si locuteur proche du résonateur
(modification de l'impédance de rayonnement du locuteur)

L'ECOLE PYTHAGORICIENNE



Tout l'univers est musique

Pythagore de Samos (-570?/-500?, Astronome, philosophe, musicologue grec)

→ Etude de l'acoustique = Etude de l'acoustique musicale

- Relation entre la longueur d'une corde vibrante et la hauteur du son émis
- Construction "mathématique" de l'échelle musicale.

L'ACOUSTIQUE DES THEATRES DE PLEIN AIR

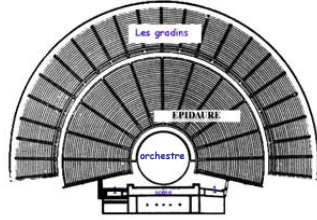


Arènes de Nîmes

VITRUVÉ



Vitruve Marcus Pollio, (-88? à -26?, architecte et ingénieur militaire romain)



Théâtre d'Epidaure (Grèce)

Orchestre : dalle de pierre réfléchissante qui reste dégagée et joue le rôle d'un réflecteur de sons. Ces réflexions et celles de la paroi arrière s'ajoutant au son direct renforcent l'énergie transmise et par suite améliorent l'intelligibilité de la parole

UN MILLENAIRE ET DEMI PLUS TARD (1/4)



Galileo Galilée
italien, (1565-1642)



Marin Mersenne
français, (1588-1648)

L'acoustique, en relation avec le développement de la mécanique dont elle est, sous bien des aspects, une branche, est dorénavant détachée de l'art musical pour devenir une *véritable science du phénomène sonore*.

Rayonnement sonore d'une petite horloge enfermée dans une cloche de verre où Boyle fait un vide partiel

→ montre la *nécessité de la présence d'air* pour la production et la transmission du bruit.



Expérience de Robert Boyle (1627-1691)

UN MILLENAIRE ET DEMI PLUS TARD (2/4)



Pierre Gassendi
français, (1592-1655)

Le son est dû à un *courant d'atomes émis par l'objet sonore* ; célérité et fréquence du son étaient interprétées respectivement comme la vitesse des atomes et leur nombre émis par unité de temps... (cf. contexte scientifique de l'époque)



Christiaan Huygens
hollandais, (1629-1695)

Explication globale des phénomènes sonores et lumineux ; Huygens les interprète tous deux comme étant dus à la propagation d'ondes longitudinales, associées aux vibrations des molécules des corps élastiques dans le cas du son et aux mouvements ondulatoires de l'éther, substrat hypothétique des phénomènes lumineux, dans le cas de la lumière.

UN MILLENAIRE ET DEMI PLUS TARD (3/4)



Isaac Newton
anglais, (1642-1727)

La théorie mathématique de la propagation sonore commence à voir le jour. La physique du continu ou théorie des champs (dont le champ sonore) commença à accéder à sa structure mathématique définitive.

Depuis lors, les théories, aussi complexes soient-elles, sont considérées pour la plus grande part comme des raffinements de celles qui datent de cette période.



Leonhard Euler
suisse, (1707-1783)
élève de Jean Bernoulli



Joseph Louis Lagrange
(Comte de-)
français, (1736-1813)



Jean le Rond d'Alembert
français, (1717-1783)

UN MILLENAIRE ET DEMI PLUS TARD (4/4)



Hermann L. von Helmholtz
allemand, (1821-1894)

L'analyse des sons complexes a été effectuée expérimentalement par le physiologiste et physicien allemand, Hermann von Helmholtz (1821-1894) au moyen de résonateurs qui portent son nom :

à tout son musical de hauteur donnée est associé un timbre qui résulte de la *superposition au son fondamental d'une série d'harmoniques*.

L'analyse mathématique de ces sons complexes repose sur les célèbres travaux du mathématicien français Joseph Fourier (1768-1830), qui font toujours autorité.



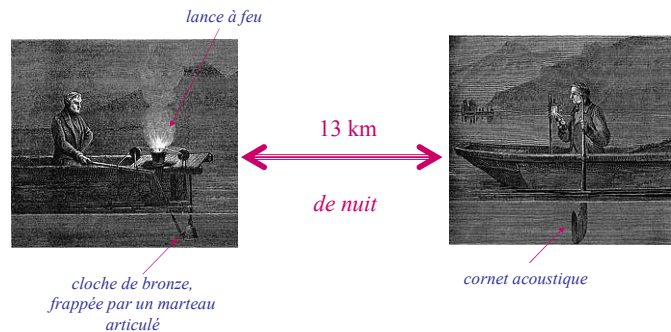
Jean-Baptiste Joseph Fourier
français, (1768-1830)

LA VITESSE DE PROPAGATION DU SON

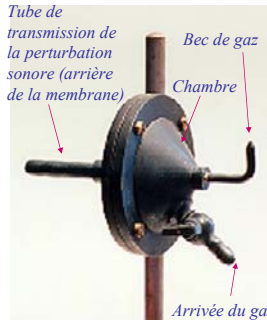
- Mesures effectuées vers 1860-1870 dans des tubes de longueurs allant jusqu'à 4900 mètres (égouts de Paris)
- Expériences faites en 1826 sur le lac de Genève par les physiciens Colladon et Sturm



Victor Regnault
français, (1810-1878)



VISUALISATION DES VIBRATIONS DE L'ONDE ACOUSTIQUE (1/3)

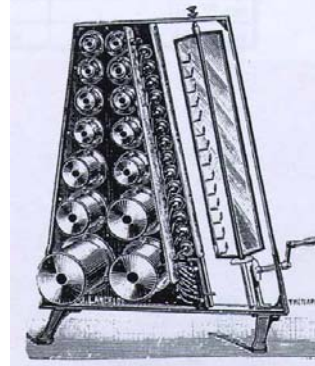


Toute vibration sonore transmise par un tube à l'arrière de la membrane (à gauche sur le figure) a pour effet de faire vibrer celle-ci, qui fait varier la pression du gaz contenu dans la chambre à l'avant de la membrane. Par suite, le débit du gaz à la sortie du bec (brûleur) est modulé à la fréquence de la perturbation sonore, ce qui produit une hauteur de flamme qui fluctue à la même fréquence. Les variations de hauteur de cette flamme permettent, par une méthode appropriée, notamment par l'emploi d'un miroir tournant, une appréciation visuelle de la nature des sons analysés. Les capsules manométriques sont, avec les résonateurs de Helmholtz, un des éléments essentiels de l'appareil de Koenig pour l'analyse des timbres des sons musicaux.

Capsule manométrique de Karl Rudolf Koenig (1832-1901)
Exemplaire du lycée Montesquieu, au Mans

http://www.inrp.fr/she/instruments/instr_aco_capsule_koenig.htm

VISUALISATION DES VIBRATIONS DE L'ONDE ACOUSTIQUE (2/3)



La partie gauche de l'appareil est constituée de résonateurs de Helmholtz de dimension croissante du haut vers le bas. Chacun d'entre eux est relié à l'arrière à une capsule manométrique qui transmet les vibrations de l'air dans les résonateurs à un gaz alimentant des flammes ainsi modulées. A l'aide du dispositif du miroir tournant, souvent utilisé dans les laboratoires de physique de cette époque, on analysait visuellement la structure du son. La rotation du miroir à 4 faces (à droite) va découper les mouvements de la flamme et ainsi le ralentir : la vibration de la flamme devient visible pour l'oeil.

Analyseur manométrique de Karl Rudolf Koenig (1832-1901)

http://www.inrp.fr/she/instruments/instr_aco_analyseur_koenig

VISUALISATION DES VIBRATIONS DE L'ONDE ACOUSTIQUE (3/3)



Rudolf Koenig est né à Koenigsberg en Prusse orientale, mais s'établit à Paris en 1851. D'abord apprenti chez le célèbre luthier Jean Baptiste Villame (1798-1875), il le quitta en 1858 pour fonder sa propre entreprise et fabriquer des appareils d'acoustique. On dit de lui : "Le nom de Koenig est synonyme des jours brillants de l'acoustique du 19e siècle. Ses instruments furent parmi les plus beaux, les plus efficaces et les plus précis de ce temps".

<http://misha1.u-strasbg.fr/AMUSS/OdS311.htm>

Lord Rayleigh

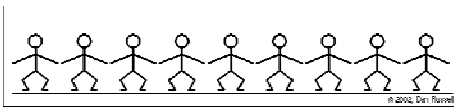


John William Strutt (Lord Rayleigh) anglais, (1842-1919)

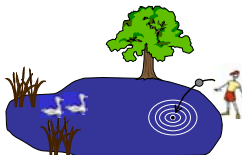
A l'aube du XX^e siècle, le couronnement des recherches en acoustique a été marqué par l'oeuvre magistrale du savant anglais John William Strutt, lord Rayleigh (1842-1919), qui, notamment, synthétisa les connaissances acquises dans son traité *A theory of sound*, dont la première édition parut en 1877 (t. I) et 1885 (t. II). Les bases de l'acoustique étaient désormais posées.

ONDE MECANIQUE (1/5)

- Une **onde mécanique** est un **mouvement oscillatoire** qui se transmet de proche en proche dans un milieu matériel, **par voisinage**, comme une **information**, un changement de position que l'on transmet à son voisin.

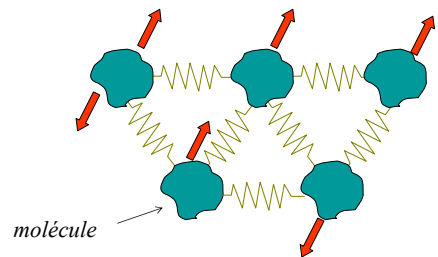


<http://www.kettering.edu/~drussell>
Animation courtesy of Dr. Dan Russell, Kettering University



La particule d'eau au centre bouge et transmet son mouvement aux autres

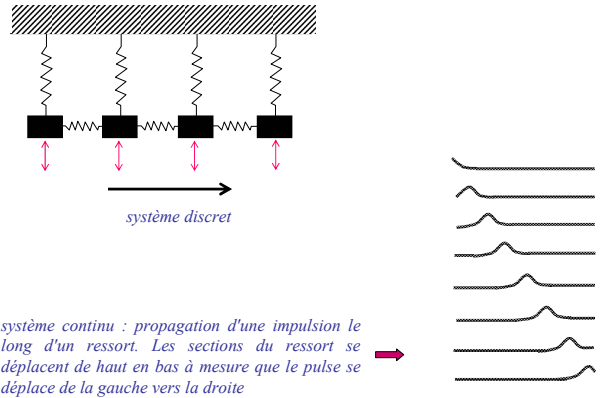
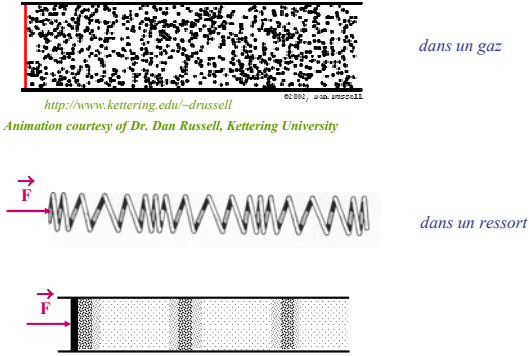
ONDE MECANIQUE (2/5)



Représentation schématique de matière constituée de molécules (de masses données) en interactions élastiques.

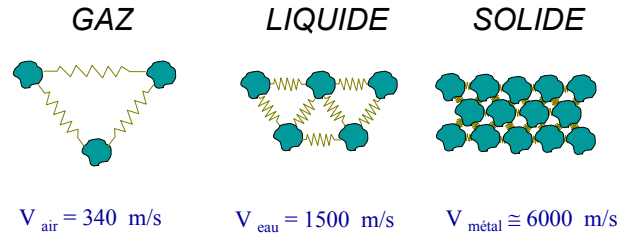
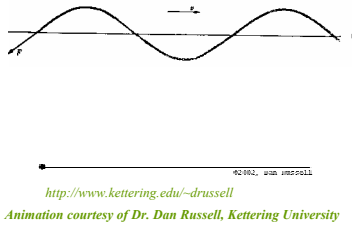
ONDE MECANIQUE : ONDE DE COMPRESSION (3/5)

ONDE MECANIQUE : ONDE DE CISAILLEMENT (4/5)



ONDE MECANIQUE : ONDE DE FLEXION (5/5)

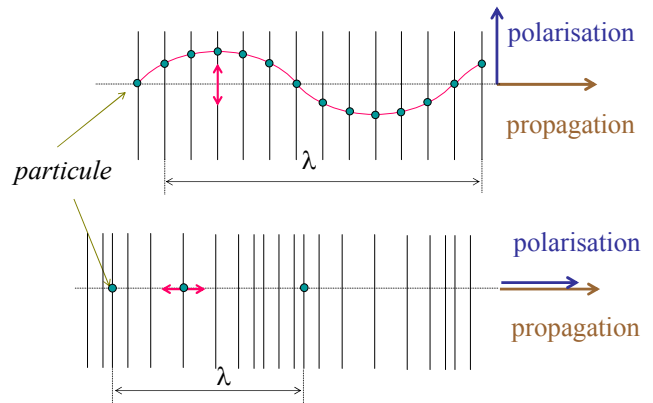
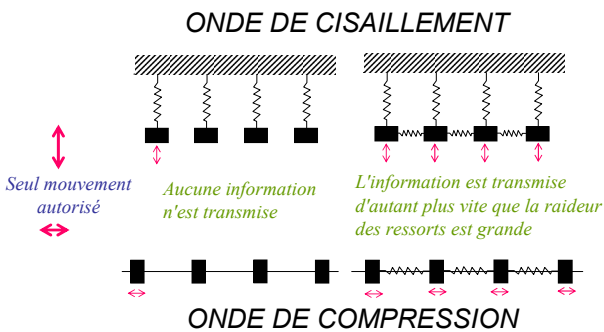
VITESSE DE PROPAGATION



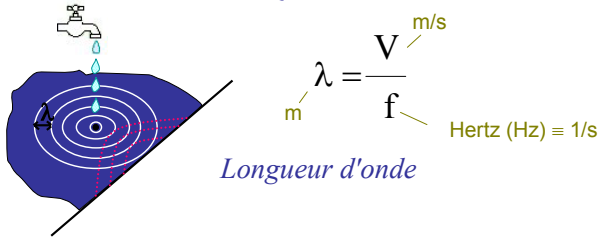
Aspect schématique des trois états fondamentaux de la matière et ordre de grandeur de la vitesse propagation des ondes de compression pour chacun d'eux

DE LA MATIERE DISCONTINUE...

... A LA MATIERE CONTINUE



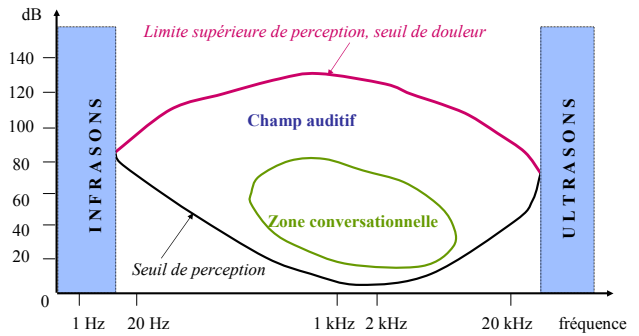
LA FREQUENCE



- La **fréquence** de l'onde est la rapidité avec laquelle la particule oscille autour de sa position moyenne.

f = nombre de va et vient / seconde de la particule

LE CHAMP AUDITIF



ONDE SONORE - ONDE ULTRASONORE

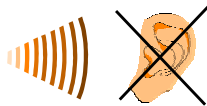
- Dans l'air :

$20 \text{ Hz} \leq f \leq 20\,000 \text{ Hz}$

$f > 20\,000 \text{ Hz}$



Bruit audible
Onde sonore

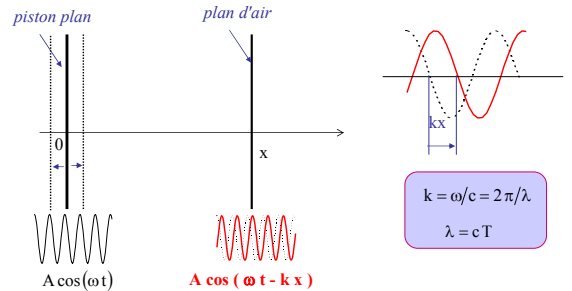


Bruit inaudible (pour l'homme)
Onde **ultrasonore**

CARACTERISTIQUES D'UNE ONDE

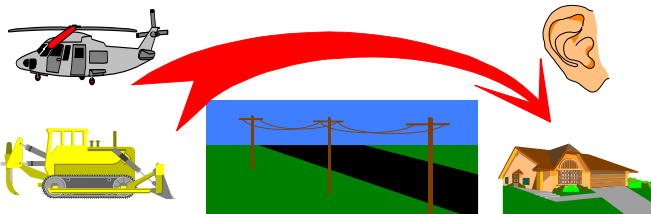
$$u(x;t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] = A \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] = A \cos(\omega t - kx)$$

amplitude pulsation célérité longueur d'onde nombre d'onde



PHENOMENE DE TRANSMISSION ACOUSTIQUE (1/2)

Exemple 1 : le parcours du bruit



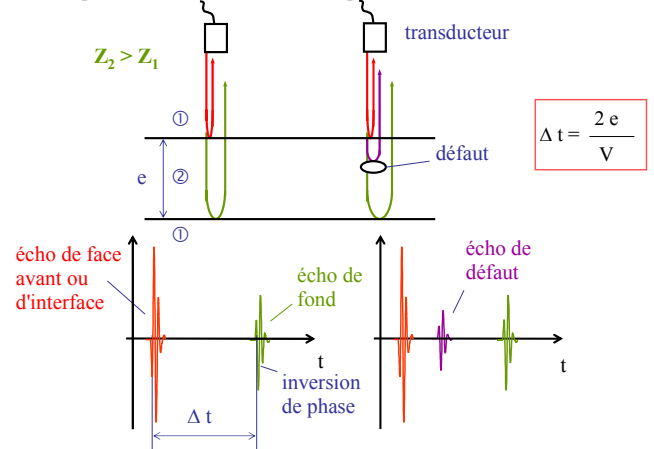
Emission
Les sources de bruit

Propagation
L'atmosphère, le sol,
la météorologie

Réception
L'audition

PHENOMENE DE TRANSMISSION ACOUSTIQUE (2/2)

Exemple 2 : le contrôle non destructif par ultrasons



GENERATION D'UNE ONDE SONORE (1/2)

Les haut-parleurs



haut parleur large bande 215 RTF bicone (Supravox)

http://www.supravox.fr/haut-parleurs/intro_hp.html

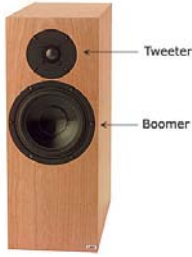


tweeter



haut-parleur à chambre de compression muni de son pavillon

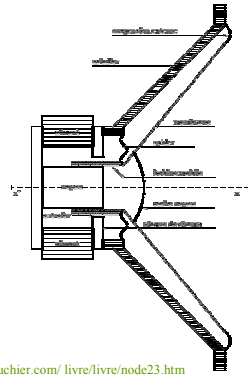
enceinte



http://fr.audiofanzine.com/apprendre/glossaire/index,popup,,id_mot,49.html

GENERATION D'UNE ONDE SONORE (2/2)

Le haut-parleur électrodynamique



<http://www.brouchier.com/livre/livre/node23.htm>

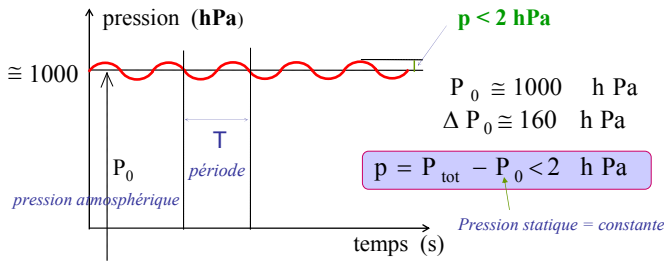


<http://www.epsc.ch/Branches/Audiovideo/Audio/leson/jmaurer-01.html>

LE DOMAINE DE L'AUDIBLE (1/4)

Les ordres de grandeur (1/3)

✓ SI fluide **homogène** dont les caractéristiques ne dépendent pas du temps

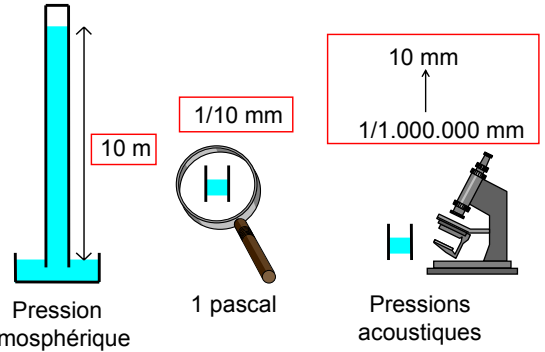


✓ SI fluide **non homogène** dont les caractéristiques dépendent du temps $P_0 \Rightarrow P_E(\vec{r}; t)$

Entraînement

LE DOMAINE DE L'AUDIBLE (2/4)

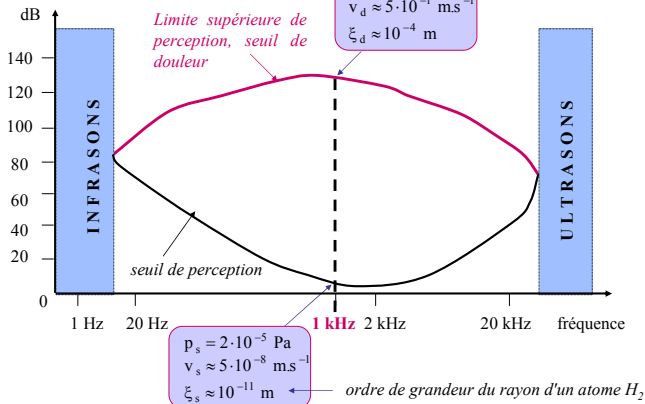
Les ordres de grandeur (2/3)



$2.10^{-5} \text{ Pa} < p < 200 \text{ Pa}$ → plage de variation très large

LE DOMAINE DE L'AUDIBLE (3/4)

Les ordres de grandeur (3/3)

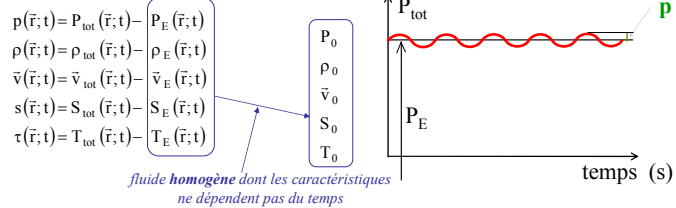


LE DOMAINE DE L'AUDIBLE (4/4)

Les variables fondamentales

- ✓ pression $p(\vec{r}; t)$
- ✓ masse volumique $\rho(\vec{r}; t)$
- ✓ vitesse particulière $\vec{v}(\vec{r}; t)$ → déplacement particulière $\vec{\xi}(\vec{r}; t)$
- ✓ entropie $s(\vec{r}; t)$
- ✓ température $\tau(\vec{r}; t)$

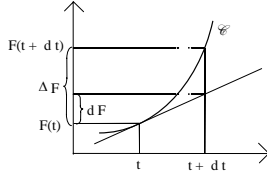
Variations autour d'un état de référence "E" :



VARIATION ELEMENTAIRE - ECART INSTANTANE

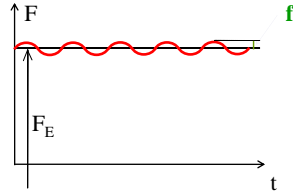
- Variation élémentaire

$$dF = \lim_{dt \rightarrow 0} [F(t + dt) - F(t)]$$



- Ecart instantané par rapport à une origine donnée F_E , à un instant donné

$$f(t) = \int_{F_E}^F dF = F(t) - F_E(t)$$



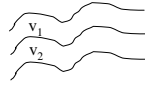
Application :

$$p(\vec{r}; t) = \int_{P_E}^{P_{tot}} dP = P_{tot}(\vec{r}; t) - P_E(\vec{r}; t)$$

LES EFFETS DISSIPATIFS

- La viscosité

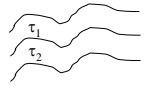
transferts d'impulsion entre les deux régions de fluide (de vitesses différentes) qui tendent à perturber leurs mouvements, ici d'origine acoustique, perturbation responsable d'amortissement.



MAIS $\left\{ \begin{array}{l} \checkmark v_2 - v_1 \text{ très petit} \\ \checkmark \text{ vitesse de "diffusion visqueuse" très faible} \end{array} \right\} \rightarrow$ effets de viscosité très faibles

- La conduction thermique

transferts de chaleur entre les deux régions de fluide (à températures légèrement différentes car à pressions légèrement différentes) qui tendent à perturber leurs mouvements, ici d'origine acoustique, perturbation responsable d'amortissement.



MAIS $\left\{ \begin{array}{l} \checkmark \tau_2 - \tau_1 \text{ très petit} \\ \checkmark \text{ vitesse de "propagation" de la chaleur très faible (diffusion)} \end{array} \right\} \rightarrow$ transformations quasi adiabatiques

- La relaxation moléculaire

retard à l'établissement d'un équilibre consécutif au fait que l'effet dû à une sollicitation extérieure n'apparaît pas instantanément.

Un peu de vocabulaire

- Absorption

Transformation de l'énergie acoustique (ordonnée) en chaleur (désordonnée).

Ordonné : le mouvement peut être aléatoire (imposé tel par une source), mais a un certain ordre reconnu par le cerveau

Désordonné : mouvement complètement erratique auxquelles sont associées les notions macroscopiques de température et de pression, et qui n'est pas un mouvement vibratoire

- Dissipation (dissipatio(onis) : dissolution, anéantissement, destruction)

La dissipation d'énergie résulte de l'absorption.

Un milieu est dit dissipatif ou absorbant (termes synonymes).

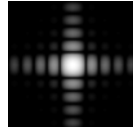
- Atténuation

Diminution de l'amplitude du phénomène considéré, en raison d'un ou plusieurs phénomènes

Exemple : atténuation géométrique d'une onde sphérique (dans une direction), atténuation par dissipation, etc.

- Diffusion (diffusio(onis) : l'action de répandre)

Phénomène de redistribution de l'énergie dans toutes les directions (éparpillement)



diffraction par un trou carré

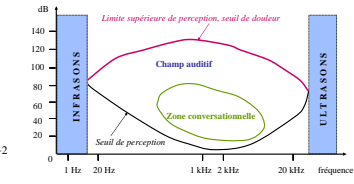
- Diffraction (diffractum : mis en morceau)

Comportement des ondes lorsqu'elles rencontrent un obstacle qui ne leur est pas complètement transparent

NIVEAUX SONORES (1/2)

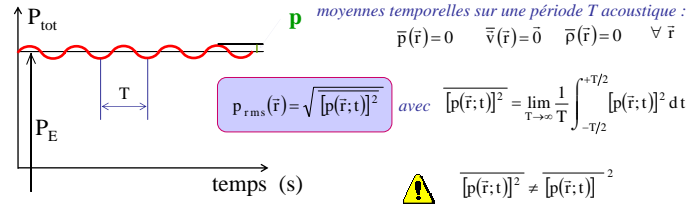
- ✓ La sensibilité de l'oreille humaine dépend de la fréquence

- ✓ La sensation auditive évolue comme le logarithme de l'intensité acoustique I de l'onde



$$L = 10 \log_{10}(I/I_s) \text{ avec } I_s = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$$

$$I \propto p_{rms}^2 \rightarrow L = 20 \log_{10}(p_{rms}/p_s) \quad p_s = \sqrt{\rho_0 c_0 I_s} = \sqrt{400 \cdot 10^{-12}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$



NIVEAUX SONORES (2/2)

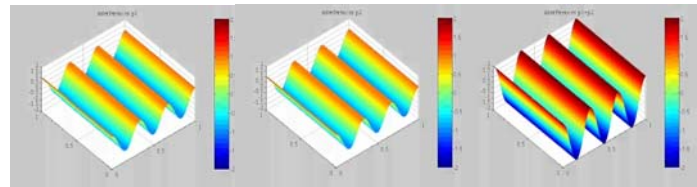
- niveau sonore résultant de deux sources décorréliées

$$L_{res} = 10 \log_{10} \left(\frac{I_1 + I_2}{I_s} \right) = 10 \log_{10} \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right)$$

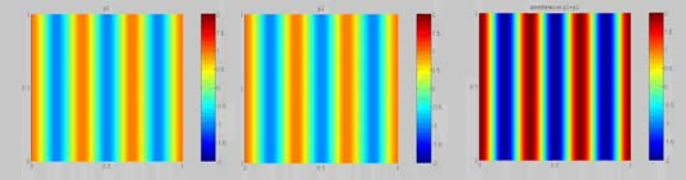
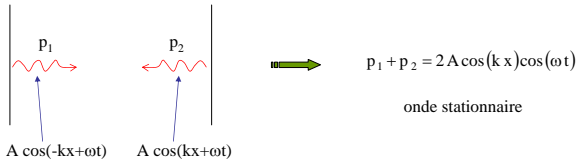


$$L_{res} = (L_{res} - L_1) + L_1 \text{ avec } L_{res} - L_1 = 10 \log_{10} \left(1 + 10^{(L_2 - L_1)/10} \right)$$

INTERFERENCE DE DEUX ONDES

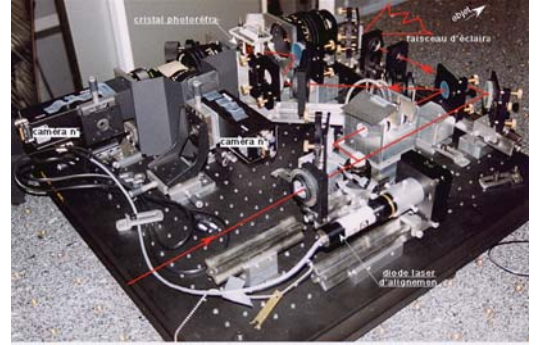


INTERFERENCE DE DEUX ONDES



GENERATION D'UNE ONDE ULTRASONORE (1/2)

- Interférométrie laser

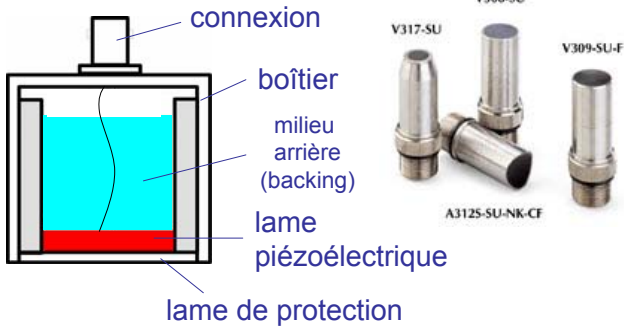


Interféromètre fonctionnant en régime dit de temps réel et permettant de mesurer les déformations subies par un objet entre les deux expositions du laser

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, Orsay
http://www.iota.u-psud.fr/~roosen/capteur_interferometrique.html

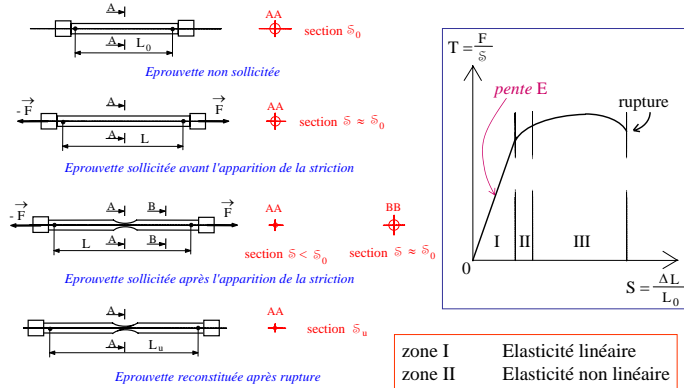
GENERATION D'UNE ONDE ULTRASONORE (2/2)

- Les transducteurs ultrasonores



Transforme un signal électrique en une vibration mécanique

Loi de comportement : exemple de l'essai de traction



Loi de Hooke : $T = E S$

RELATIONS EN SOLIDE ISOTROPE

	E, ν	E, μ	λ, μ	c_{11}, c_{12}
λ	$\frac{E \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{\mu(E-2\mu)}{3\mu-E}$	λ	c_{12}
μ	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	μ	μ	$\frac{c_{11}-c_{12}}{2}$
E	E	E	$\frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}$	$c_{11}-2\frac{c_{12}^2}{c_{11}+c_{12}}$
B	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{\mu E}{3(3\mu-E)}$	$\lambda + \frac{2}{3}\mu$	$\frac{c_{11}+2c_{12}}{3}$
ν	ν	$\frac{E-2\mu}{2\mu}$	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\frac{c_{12}}{c_{11}+c_{12}}$

c_{11}, c_{12} : constantes de rigidité (Pa)

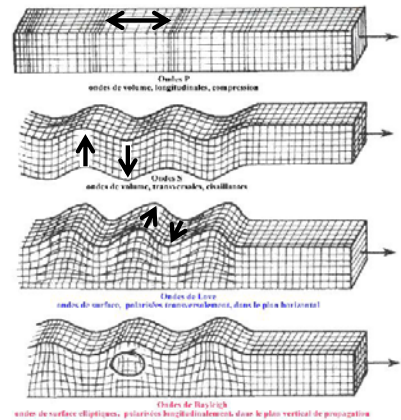
E : Module de Young (Pa)

ν : Module de Poisson (sans unité)

B : Module d'élasticité volumique (Pa/m²)

λ, μ : Coefficients de Lamé (Pa)

ONDES SISMIQUES (1/2)

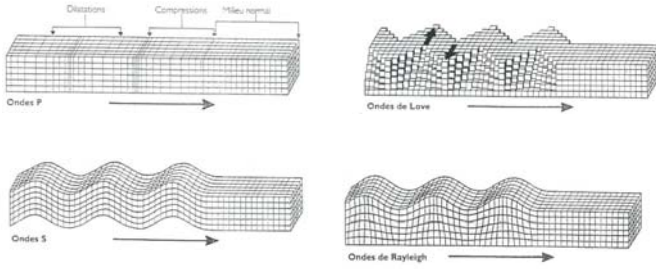


<http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Geodynamique/Structure-interne/Sismologie/pendulum.html>

ONDES SISMIQUES (2/2)

● Ondes de volume

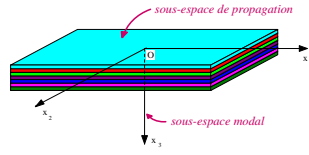
● Ondes de surface



http://cost.u-strasbg.fr/pedago/fiche1/ondes_sismiques.fr.html

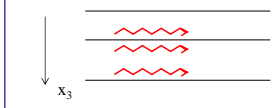
ONDES MODALES (1/4)

Ondes mécaniques → ondes locales
 → ondes modales



énergie acoustique :
 - se propage le long des couches
 - est bornée en x_3

- ♦ ondes guidées
- ♦ ondes de surface
- ♦ ondes d'interface



ONDES MODALES (2/4)

ondes guidées

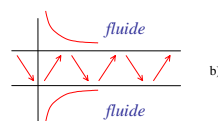
ondes de surface

ondes d'interface

Vide/ paroi rigide / impédance réactive

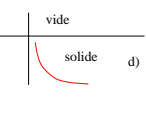
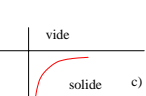


Vide/ paroi rigide / impédance réactive



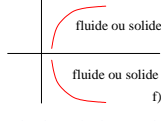
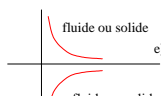
- onde de Lamb a)

- ondes d'Osborne et Hart b)



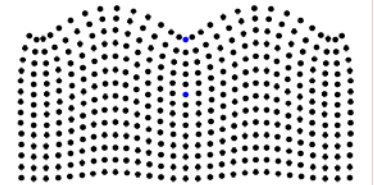
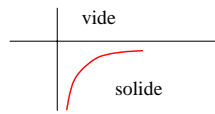
- onde de Rayleigh c)

- onde pseudo-modale d)

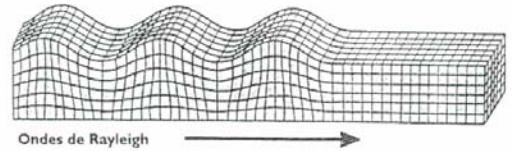


- onde de Scholte, onde de Stoneley, onde de Rayleigh-Sezawa, etc... e)
 - onde pseudo-modale f)

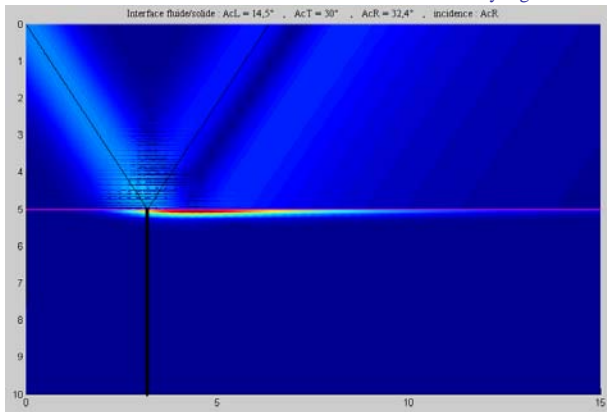
Ondes modales (3/4) : onde de Rayleigh



<http://www.kettering.edu/~drussell> ©1999, Daniel A. Russell
 Animation courtesy of Dr. Dan Russell, Kettering University



$$k_0 a = 60, k_L a = 15, k_T a = 30, \theta = \theta_{\text{Rayleigh}}$$



$\rho_0/\rho_1 = 0.1$

Programmes réalisés par Ph. Gagnon, Pr., Université de Technologie de Compiègne

DEPLACEMENT DES ONDES DE LAMB (1/2)

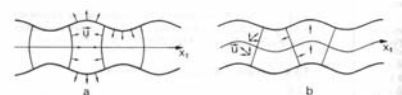
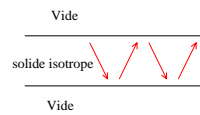
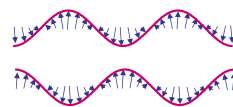
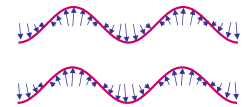


FIG. 5.36. Onde de Lamb, a) symétrique : de part et d'autre du plan médian, les composantes longitudinales sont égales et les composantes transversales sont opposées. b) antisymétrique : de part et d'autre du plan médian, les composantes transversales sont égales et les composantes longitudinales sont opposées.



ondes de compression (mode symétrique)

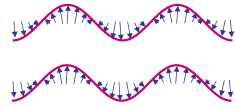
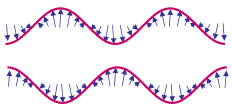


ondes de flexion (mode antisymétrique)

distribution du champ de déplacement particulière vectoriel à la surface de la plaque et son effet sur la forme de la plaque

figures extraites de :
 D. Royer et E. Dieulesaint, "Ondes élastiques dans les solides", tome 1 : propagation libre et guidée, Masson, (1996)
 J.L. Rose, "Ultrasonic waves in solid media", Cambridge Univ. Press, 1999

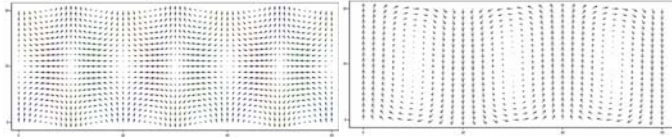
DEPLACEMENT DES ONDES DE LAMB (2/2)



ondes de compression (mode symétrique)

ondes de flexion (mode antisymétrique)

distribution du champ de déplacement particulaire vectoriel à la surface de la plaque et son effet sur la forme de la plaque

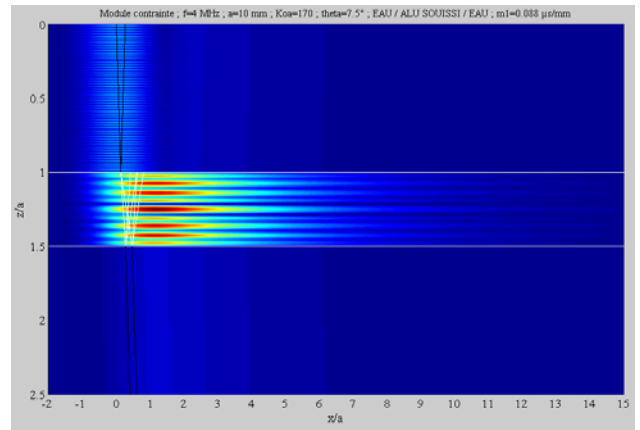


mode S_0

mode A_0

animations réalisées par Patrick Lancelu, Université de Technologie de Compiègne
http://www.utc.fr/~lancelu/links_CT04.html

Eau / Aluminium / Eau ; $ka=170$; $H=5$ mm ; avant le 1er angle critique



Mode de Lamb