

LES ONDES SONORES



T. DUFOUR

Contact: thierry.dufour@sorbonne-universite.fr



1

PANORAMA

1. TYPES D'ONDES
2. L'ONDE SONORE : DÉFINITION
3. GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE
4. PROPAGATION DANS UN MILIEU HOMOGÈNE & ISOTROPE
5. UN EXEMPLE DE RÉCEPTEUR D'ONDES SONORES : L'OREILLE HUMAINE
6. LES ONDES ULTRASONORES

2

PARTIE I TYPES D'ONDES

ONDES STATIONNAIRES VS ONDES DE PROPAGATION
ONDES LONGITUDINALES VS ONDES TRANSVERSALES
ONDES ÉVANESCENTE VS ONDES AMORTIES
MORPHOLOGIE D'UNE ONDE

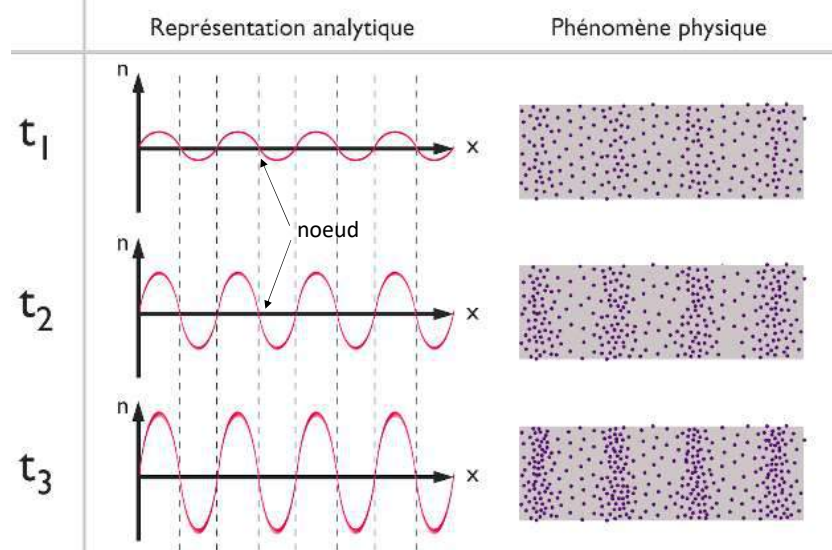
3

TYPES D'ONDES

Ondes stationnaires

Onde stationnaire :

- Elle résulte de deux ondes de même fréquence et de même amplitude qui se propagent simultanément mais dans des sens opposés
- Elles forment une « figure » dont certains éléments sont fixés dans le temps (nœuds).



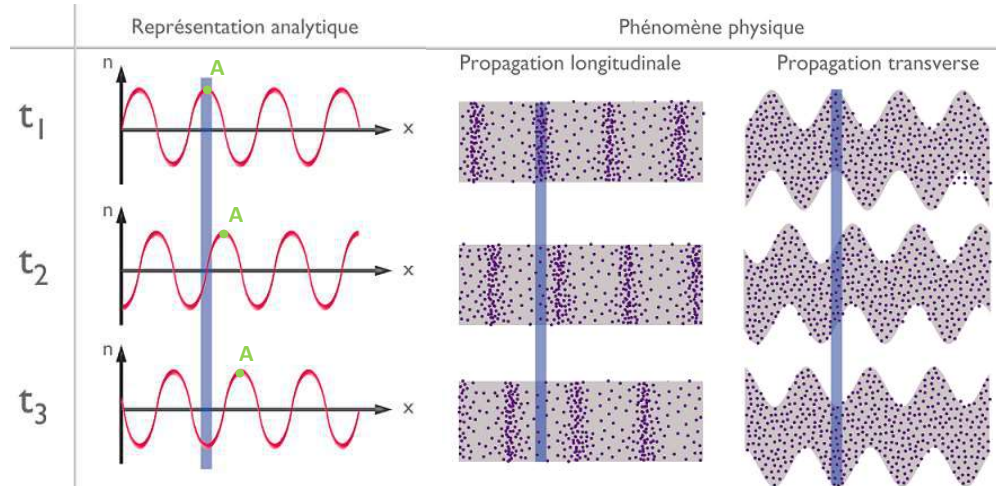
4

TYPES D'ONDES

Ondes de propagation: longitudinale/transverse

• **Onde de propagation** : la perturbation (e.g. particules du milieu) ne se propage pas à grande échelle mais se propage de proche en proche

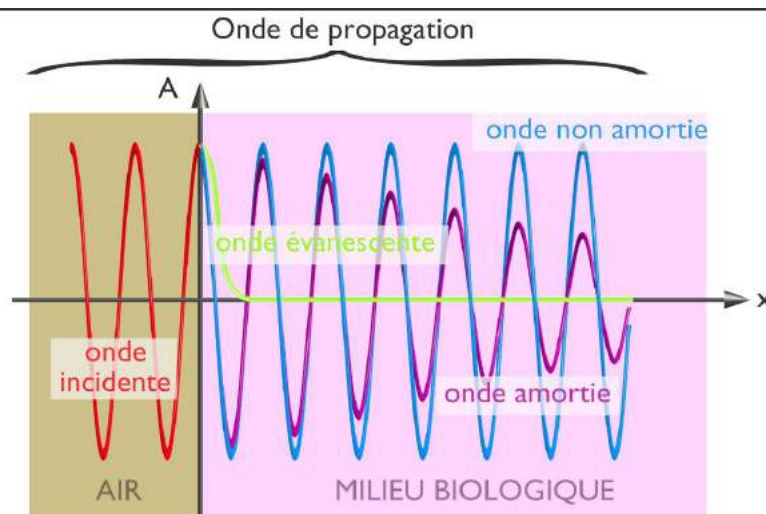
• **Onde mécanique de propagation** : ce n'est pas la matière qui est transportée mais l'énergie



5

TYPES D'ONDES

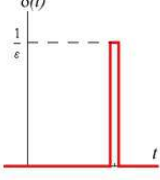
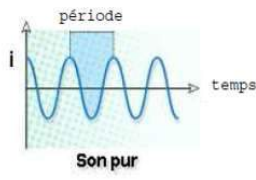
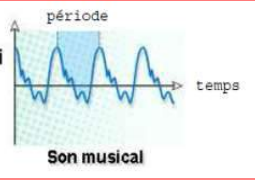
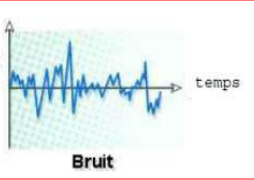
Onde évanescente vs Onde amortie



6

TYPES D'ONDES

« Morphologie » d'une onde

Evolution temporelle discrète	Evolution temporelle continue		
	Motif simple	Motif complexe	
		Périodique	Non périodique ou bruit
Impulsion ou série d'impulsions de type "pic de Dirac"	<ul style="list-style-type: none"> Onde sinusoïdale plane Vibration caractérisée par une seule fréquence 	Association de plusieurs ondes acoustiques de fréquences, de phases et/ou d'amplitudes différentes	Série de Fourier : somme de sinus de fréquences multiples (fondamentale & harmoniques)
Applications bio.	Alarme numérique	Instrument à vent/cordes	Haut-parleur qui sature
			

7

PARTIE II

L'ONDE SONORE : DÉFINITION

8

L'ONDE SONORE : DÉFINITION

Définition : Onde mécanique se propageant longitudinalement dans un milieu matériel en transportant de l'énergie mais pas de matière

- **Onde longitudinale**
Ses états de compression et de dilatation sont successifs et se transmettent de proche en proche, aux molécules voisines
- **Milieu matériel**
 - Matière, quelle que soit son état (solide, liquide, gaz, plasma)
 - Une onde sonore ne se propage pas dans le vide
- **Sans transport de matière à distance**
 - Mouvements vibratoires des particules de part et d'autre de leur position d'équilibre
 - Seule l'énergie est propagée sur une distance donnée
- **Propriétés de propagation**
 - Élastique (ou inélastique) : sa fréquence reste inchangée au fur et à mesure de sa propagation dans le milieu
 - Atténuée (ou permanente) : son amplitude diminue au fur et à mesure de sa propagation dans le milieu

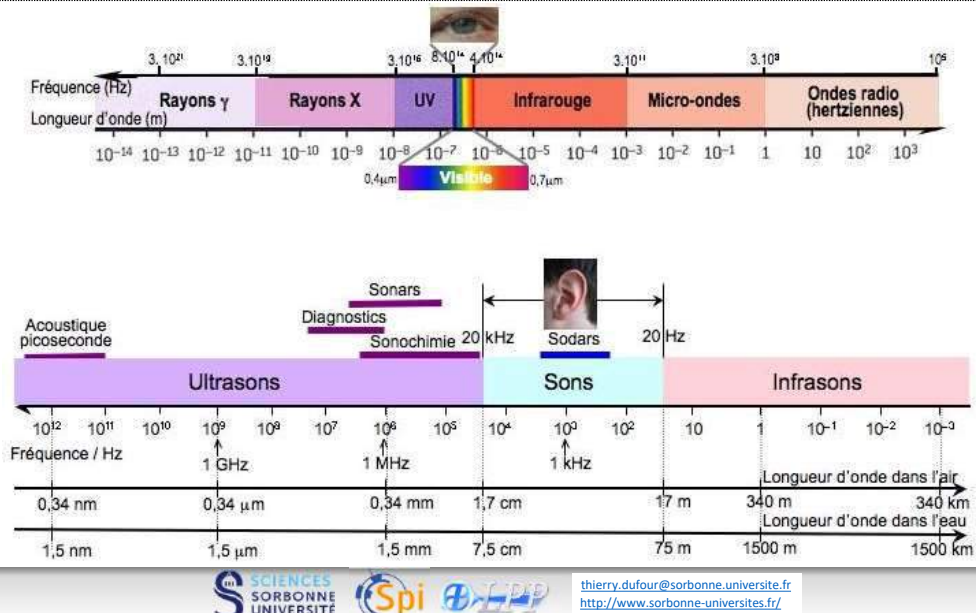
PARTIE III

GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE

FRÉQUENCE ACOUSTIQUE (F_0)
VITESSE DE PROPAGATION (C)
PRESSION ACOUSTIQUE (P_0)
PUISSANCE ACOUSTIQUE SURFACIQUE (P_{AS})
INTENSITÉ ACOUSTIQUE (I_A)

GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE

Fréquence acoustique



11

GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE

Vitesse de propagation (c)

- La vitesse d'une onde dépend des propriétés du milieu qu'elle traverse (élasticité, densité)

- Vitesse de propagation dans un fluide : $c = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \chi_T}}$

$$\chi_T = -\frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial P} \right|_T$$

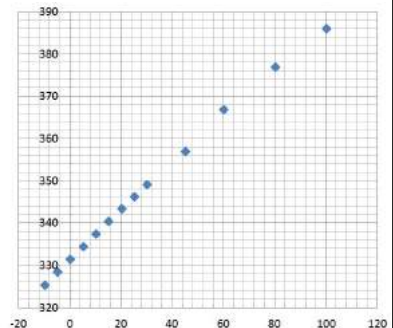
Coefficient de compressibilité isotherme du fluide (Pa⁻¹)

- Vitesse de propagation dans un solide : $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

E : module de Young (Pa) du milieu. Plus E est grand, plus le milieu est rigide

- Influence de la température sur la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans l'air.

T (°C)	Vitesse de l'onde sonore (m.s ⁻¹)
-10	325,4
-5	328,5
0	331,5
5	334,5
10	337,5
15	340,5
20	343,4
25	346,3
30	349,2
100	386

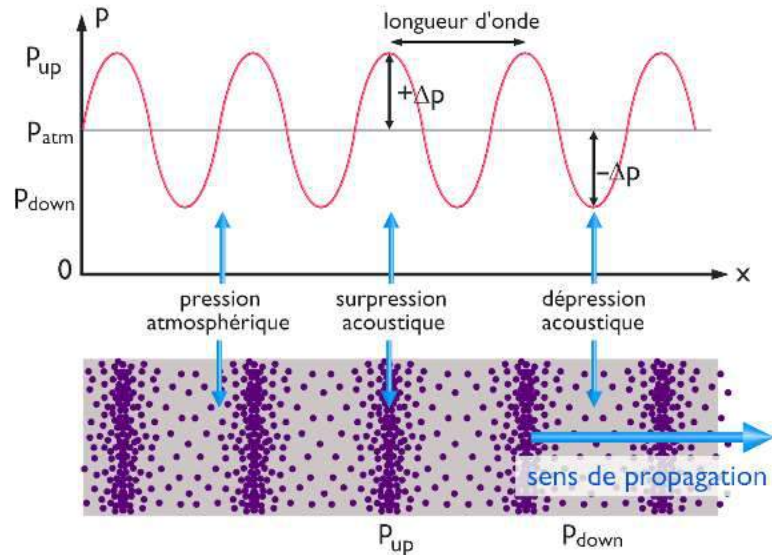


12

GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE

Pression acoustique

- Onde sonore = onde de pression
- Dans l'air ambiant, une onde sonore de fréquence 1 kHz ne peut se propager que si ses variations de pression acoustiques sont comprises sur l'intervalle : $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} < \Delta p < 20 \text{ Pa}$



13

GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE

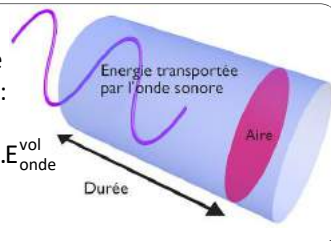
Puissance acoustique surfacique (P_{AS})

Approche physique

Approche mathématique

Puissance acoustique surfacique :

$$P_{AS} = \frac{E_{\text{onde}}}{A \cdot t} = c \cdot E_{\text{onde}}^{\text{vol}}$$



Energie d'une particule oscillant autour d'une position d'équilibre (onde)

$$E_{\text{part}}(t) = E_{\text{cin}}(t) + E_{\text{pot}}(t) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\text{max}}^2$$

Densité volumique d'énergie de la particule interagissant avec l'onde

$$E_{\text{part}}^{\text{vol}}(t) = \frac{1}{2} \rho v_{\text{max}}^2$$

Pression	Masse volumique
$p_0 = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot v_{\text{max}}}{A \cdot t}$	$\rho = \frac{m}{V}$

$$p_0 = \rho \cdot v_{\text{max}} \cdot \frac{V}{A \cdot t} \Rightarrow$$

$$p_0 = \rho \cdot v_{\text{max}} \cdot c \Rightarrow v_{\text{max}} = \frac{p_0}{\rho \cdot c}$$

$$P_{AS} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot v_{\text{max}}^2$$

$$P_{AS} = \frac{p_0^2}{2Z}$$

14

GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE

Puissance acoustique surfacique (P_{AS})Approche
physique

- Définition : moyenne temporelle du flux d'énergie acoustique par unité d'aire :

$$P_{AS} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot v(t) \cdot dt \Rightarrow \dots \Rightarrow P_{AS} = \frac{p_0^2}{2Z}$$

Approche
mathématique

- Pression acoustique : $p(t) = p_0 \cdot e^{i(kx - \omega t)}$
- Vitesse des particules : $v(t) = p(t)/Z$
- Impédance acoustique : Z (pour l'air, $Z=410 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}$)
- Unité : $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

- Gamme des P_{AS} pour des ondes sonores se propageant dans l'air à $f=1\text{kHz}$

Sons audibles les + faibles ($p_0=2\cdot 10^{-5} \text{ Pa}$)Sons audibles les + intenses ($p_0 \approx 20 \text{ Pa}$)

$$P_{AS, \text{MIN}} = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

$$P_{AS, \text{MAX}} = 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$



thierry.dufour@sorbonne.universite.fr
http://www.sorbonne-universites.fr/

15

GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE

Intensité acoustique (I_A)

- Intensité acoustique absolue :

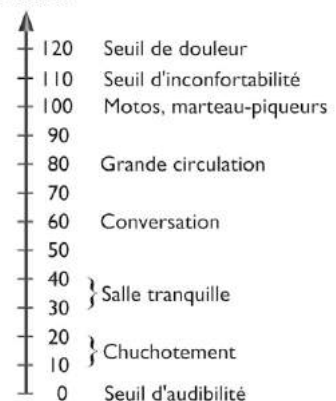
$$I_{\text{dB}}^{\text{abs}} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{AS}}{P_{AS0}} \right)$$

- P_{AS} : puissance acoustique surfacique mesurée
- $P_{AS0}=10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$: puissance acoustique surfacique de référence (convention)
- Exemples

$$P_{AS} = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \longrightarrow I_{\text{dB}}^{\text{abs}} = 10 \cdot \log \left(\frac{10^{-12}}{10^{-12}} \right) = 0 \text{ dB}$$

$$P_{AS} = 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \longrightarrow I_{\text{dB}}^{\text{abs}} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{10^{-12}} \right) = 120 \text{ dB}$$

Decibels



thierry.dufour@sorbonne.universite.fr
http://www.sorbonne-universites.fr/

16

GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE

Intensité acoustique (I_A)

- Intensité acoustique relative :

$$I_{dB}^{rel} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{AS_final}}{P_{AS_initial}} \right)$$

- **Application**

- Soit une sonde échographique générée par plusieurs transducteurs (= émetteurs d'ondes ultrasonores)
- Chaque transducteur activé émet la même puissance :
 $P_{AS1} = P_{AS2} = \dots = P_{ASn}$

# d'émetteurs activés		$\frac{P_{AS,final}}{P_{AS,initial}}$	Intensité acoustique en situation finale
$t_{initial}$	t_{final}		
2	1	$\frac{1}{2}$	Baisse de $-10 \cdot \log(2) = -3dB$
1	2	2	Hausse de $10 \cdot \log(2) = +3dB$
1	4	4	Hausse de $10 \cdot \log(4) = +6dB$
1	10	10	Hausse de $10 \cdot \log(10) = +10dB$

GRANDEURS PHYSIQUES PERMETTANT DE CARACTÉRISER UNE ONDE SONORE

Valeurs extrêmes des paramètres physiques

Grandeur physique	Valeur minimale	Valeur maximale
Pression acoustique	$2 \cdot 10^{-5}$ Pa	20 Pa
Puissance acoustique surfacique	$1 \cdot 10^{-12}$ W.m ⁻²	1 W.m ⁻²
Intensité acoustique	0 dB	120 dB

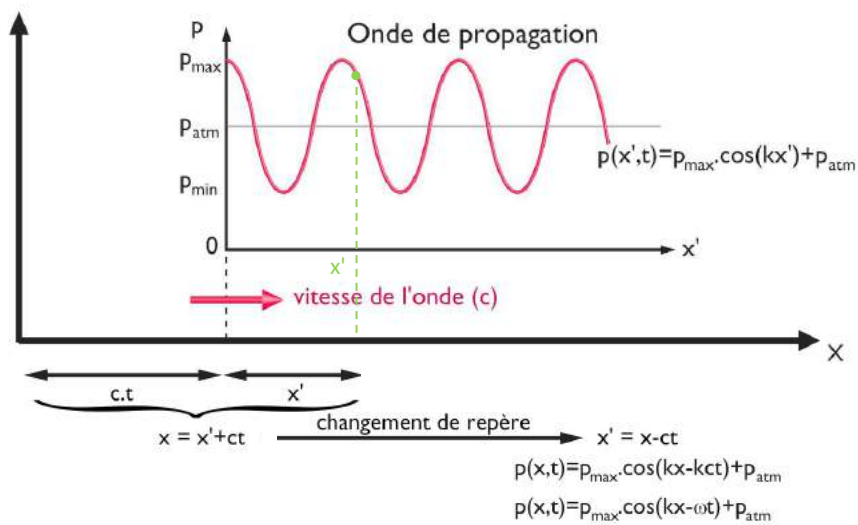
PARTIE IV

PROPAGATION DANS UN MILIEU HOMOGENE ET ISOTROPE

19

PROPAGATION DANS UN MILIEU HOMOGENE ET ISOTROPE

Equation d'onde d'une onde sonore



20

PROPAGATION DANS UN MILIEU HOMOGENÈME ET ISOTROPE

Equation d'onde d'une onde sonore

- L'équation d'onde est une solution de l'équation de propagation.
- Equation d'onde $p(x, t) = \text{Re}[p_{\max} \cdot e^{i(kx - \omega t)}] = p_{\max} \cdot \cos(kx - \omega t) = p_{\max} \cdot \cos[k \cdot (x - tc)]$
 - Nombre d'onde : $k = \omega / c$
 - Fréquence : $f = \frac{k \cdot c}{2\pi} = \frac{c}{\lambda}$

Equation de propagation

- Onde se propageant dans les 3 directions

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) p(x, y, z, t) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p(x, y, z, t)}{\partial t^2}$$

- Onde se propageant dans la direction x (onde plane) : $\frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2}$

PARTIE V

UN EXEMPLE DE RÉCEPTEUR D'ONDES SONORES : L'OREILLE HUMAINE

HAUTEUR (OU TONIE)
 FORCE SONORE (OU SONIE)
 TIMBRE
 EN RÉSUMÉ ...

UN EXEMPLE DE RÉCEPTEUR D'ONDES SONORES : L'OREILLE HUMAINE

Hauteur (ou Tonie)

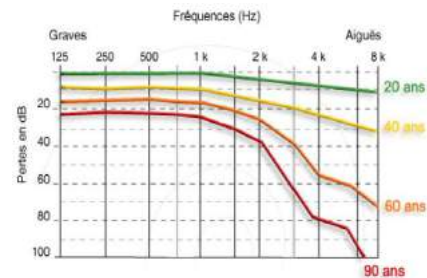
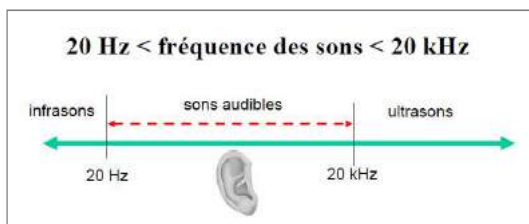
- Capacité de l'oreille humaine à qualifier une onde sonore de grave ou aiguë (et donc à jauger sa fréquence)

Cas d'une onde sonore sinusoïdale pure	
infrason	Vibration trop lente pour être perçue par l'oreille
Son grave	Fréquence basse (i.e. vibration lente)
Son aigu	Fréquence élevée (i.e. vibration rapide)
Ultrason	Vibration trop rapide pour être perçue par l'oreille

Cas d'une onde sonore complexe & périodique

La hauteur dépend surtout du fondamental et très peu des harmoniques

- Acuité auditive de l'oreille humaine

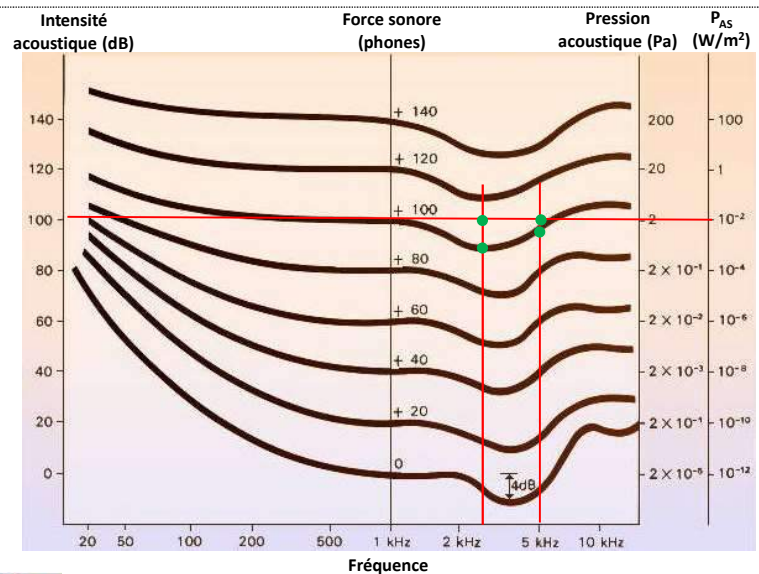


23

UN EXEMPLE DE RÉCEPTEUR D'ONDES SONORES : L'OREILLE HUMAINE

Force sonore (ou sonie)

- Grandeur psycho-acoustique correspondant au volume sonore perçu par l'oreille humaine
- 2 sons de même P_{AS} mais de fréquences différentes ont généralement une sonie différente
- Cette sensation est liée :
 - Principalement à P_{AS}
 - Minoritairement à f
- Courbes d'isonie**
 - Courbes d'égalité sensation sonore pour l'oreille humaine moyenne
 - Par convention, dB et phones sont identiques à 1 kHz
 - Seuil d'audition : 0 phone
 - Seuil de douleur : 120 phones

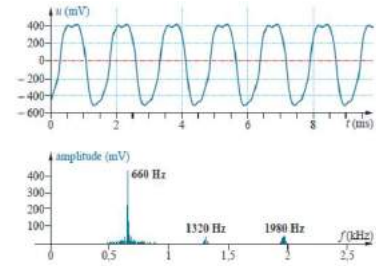
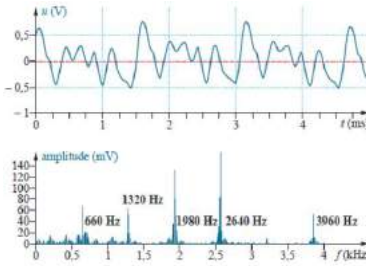


24

UN EXEMPLE DE RÉCEPTEUR D'ONDES SONORES : L'OREILLE HUMAINE

Timbre

- Paramètre psycho-acoustique caractérisant les harmoniques d'une onde sonore périodique à morphologie complexe (nombre, (non)uniformité fréquentielle)
- Chaque son complexe est une somme de différents sons sinusoïdaux (les harmoniques) de fréquences multiples entières de la fréquence fondamentale



Instrument	Onde sonore	
	Morphologie	Densité d'harmoniques
Flûte	Peu complexe	Pauvre
Violon	Complexe	Riche (surtout des harmoniques graves)
Cuivre	Complexe	Riche (surtout des harmoniques aigues)

25

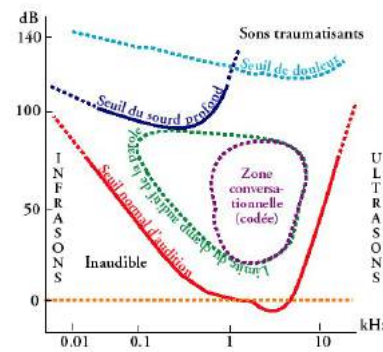
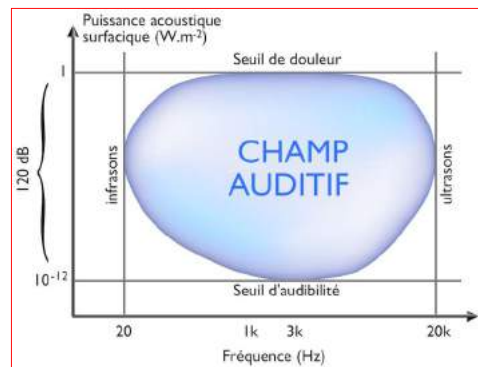
UN EXEMPLE DE RÉCEPTEUR D'ONDES SONORES : L'OREILLE HUMAINE

En résumé

- Grandeurs psycho-acoustiques et physiques

Grandeur psycho-acoustique	Grandeur physique
Hauteur ou tonie	Fréquence du fondamental
Sonie ou force sonore	Puissance acoustique surfacique (dB)
Timbre	Richesse en harmoniques

- Champ auditif



26

PARTIE VI LES ONDES ULTRASONORES

HISTORIQUE
CARACTÉRISTIQUES
PRODUCTION & RÉCEPTION D'ONDES ULTRASONORES
TRANSDUCTEURS ÉLECTRO-ULTRASONIQUES
TRANSDUCTEURS MAGNÉTOSTRICTIFS
APPLICATIONS MÉDICALES



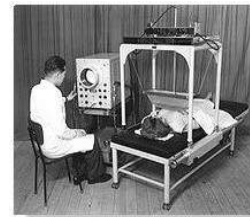
thierry.dufour@sorbonne-universite.fr
<http://www.sorbonne-universites.fr/>

27

LES ONDES ULTRASONORES

Historique (quelques dates clefs)

- **1794** : Lazzaro Spallanzani est le premier à soupçonner l'existence des ultrasons
- **1883** : découverte officielle des ultrasons par le physiologiste anglais Francis Galton
- **1917** : le physicien Paul Langevin crée le premier générateur d'ultrasons ("triplet Langevin"). Il est adapté à l'asdic (ou sonar) pour la lutte anti-sous-marine contre les Nazis



- **1949** : John Wild utilise les ultrasons pour estimer l'épaisseur des tissus intestinaux
- **1951** : J.J. Wild & J. Reid inventent l'échographe pour la recherche sur les tumeurs cérébrales
- **1953** : Inge Edler et Carl Hellmuth Hert (Université de Lund, Suède) utilisent les ultrasons pour réaliser la première mesure de l'activité cardiaque et le premier écho-encéphalogramme
- **1964** : mesures de tête de fœtus et du développement de son corps par I. Donald & J. Willocks
- **1967** : Léandre Pourcelot réalise un débitmètre Doppler (mesure de débit sanguin). Il est le pionnier de la conception du scanner Doppler couleur en 1977



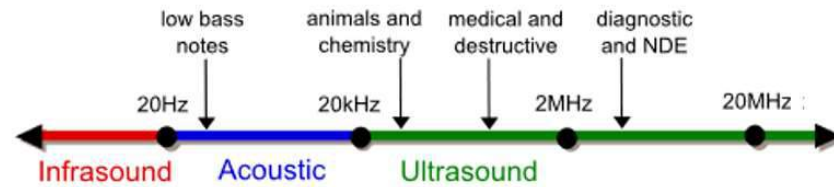
thierry.dufour@sorbonne-universite.fr
<http://www.sorbonne-universites.fr/>

28

LES ONDES ULTRASONORES

Caractéristiques

- **L'ultrason** : onde mécanique élastique de propagation, de fréquence $f > 20$ kHz
- **Classification fréquences/applications**



- Plage 20 kHz-2 MHz : ultrasons induisant des modifications physico-chimiques
 - ✓ Décapage, dégazage, émulsification
 - ✓ Modification de mécanisme réactionnel, production de radicaux libres, ...
- Plage 2MHz-20MHz : ultrasons de diagnostic
 - ✓ Imagerie médicale pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques du milieu traversé par les ondes

29

LES ONDES ULTRASONORES

Production & réception d'ondes ultrasonores

- **Transducteur** : dispositif convertissant un signal physique en un autre
 - Signal électrique \Rightarrow |Transducteur| \Rightarrow Signal mécanique
 - Signal lumineux \Rightarrow |Transducteur| \Rightarrow Signal électrique
- **Types de transducteurs permettant de générer des ultrasons**
 - Transducteurs électro-ultrasoniques
 - Piezo-électriques
 - Electrostrictifs
 - Transducteurs magnétostrictifs

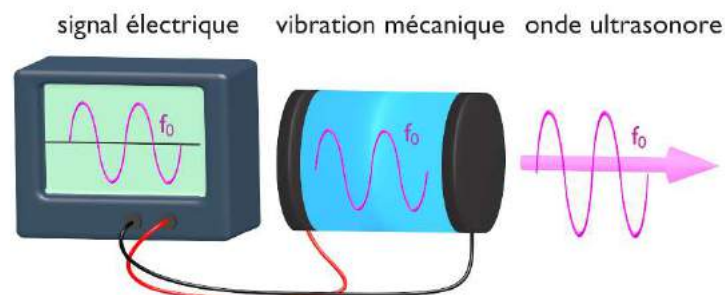
30

LES ONDES ULTRASONORES

Transducteurs électro-ultrasoniques

- Généralités

- Dispositif transformant de l'énergie électrique (transportée sous forme de tension alternative) en énergie mécanique (vibration mécanique du système)
- Fréquence de la tension alternative = fréquence de la vibration mécanique = fréquence de l'onde ultrasonore se propageant dans le milieu biologique



31

LES ONDES ULTRASONORES

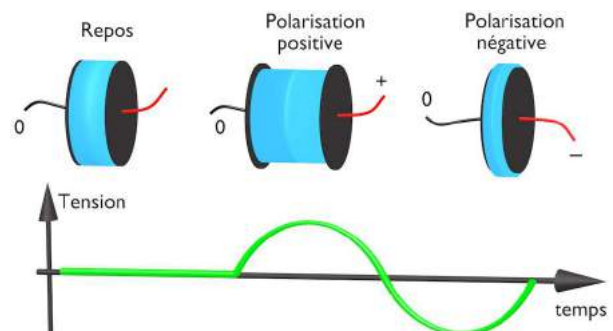
Transducteurs électro-ultrasoniques

- Transducteur piézo-électrique

- Structure sandwich : électrode/matériau piézo-électrique/électrode
- Une électrode est connectée au générateur de tension alternatif, l'autre est à la masse
- La fréquence de la tension appliquée correspond à la fréquence de résonance du matériau piézo-électrique :
 $\{f_{\text{elec}}=f_{\text{res}}=f_{\text{ultrason}}\}=f_0$
- Application d'une tension alternative de fréquence f_0 au matériau piézo-électrique \Rightarrow Allongement/contraction du matériau à la fréquence f_0

Matériau piézo-électriques

- Quartz
- PZT (Titano-Zirconate de Plomb) Céramique cristalline piézo-électrique
- Effet piézo-électrique important
- Il peut être fabriqué dans quasiment n'importe quelle forme



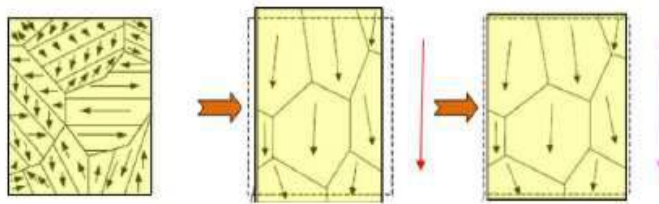
32

LES ONDES ULTRASONORES

Transducteurs électro-ultrasoniques

- **Transducteur électrostrictif**

- Electrostriction : propriété des matériaux diélectriques à l'intérieur desquels sont répartis aléatoirement des domaines électriques
- Quand E est appliqué, chaque domaine se polarise suivant la direction de E . Les côtés opposés des domaines se chargent de façon opposée et s'attirent mutuellement \Rightarrow Réduction de leur dimension dans la direction de E
- Comme l'effet électrostrictif opère à volume constant, les dimensions des domaines perpendiculaires à E s'allongent



33

LES ONDES ULTRASONORES

Transducteurs électro-ultrasoniques

- **Comparatif**

	Effet piezo-électrique	Effet électrostrictif
Effet unidirectionnel	Appliquer une polarisation électrique au matériau \rightarrow Déformation du matériau Déformer le matériau \rightarrow Pas de polarisation électrique induite	
Déformation	Linéaire : $\Delta x \propto \ \vec{E}\ $	Quadratique : $\Delta x \propto \ \vec{E}\ ^2$
Types de matériaux	Certains matériaux de basse symétrie	Tous les matériaux diélectriques

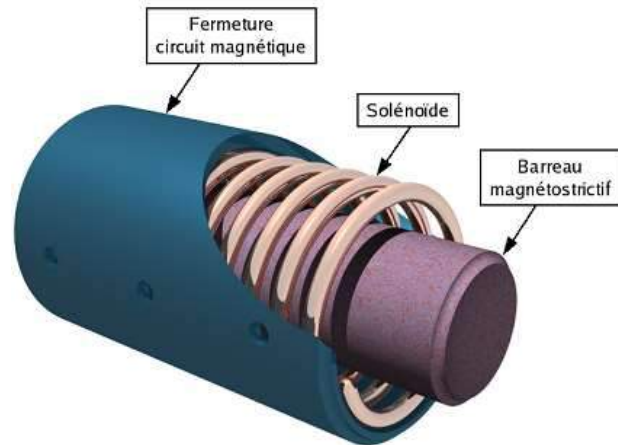
34

LES ONDES ULTRASONORES

Transducteurs magnétostrictifs

- **Magnétostriction**

- Soit un matériau ferromagnétique placé dans un champ magnétique
- Ex : barreau magnétostrictif dans solénoïde
- $B(t)$ modifie l'orientation des dipôles d'aimantation du matériau \Rightarrow Déformation du matériau
- $B(t)$ est sinusoïdal à une fréquence $f_0 \Rightarrow$ Cette vibration se transmet au milieu ambiant, entraînant un mouvement des molécules d'air
- Avantage : émetteurs robustes
- Inconvénient : $f_{US} < 50\text{kHz}$



35

LES ONDES ULTRASONORES

Applications médicales

- **Diagnostics médicaux**

Echographie	Explorer les organes internes mous ou remplis de liquide par la réflexion et l'analyse d'un faisceau d'ultrasons
Doppler	Etudier la vitesse de la circulation artérielle et veineuse au moyen d'une sonde émettrice d'ultrasons. Ceux-ci se réfléchissent sur les globules rouges puis sont recueillis par un récepteur situé sur la même sonde

- **Utilisation thérapeutique**

Ultrasono-thérapie	Traitement symptomatique d'infections des tissus mous (muscles, ligaments, tendons). Utilisation d'ondes de haute fréquence pour réduire l'inflammation en améliorant la circulation locale
Lithotripsie	Fragmentation de calculs, surtout urinaires, par ultrasons

36