



# ***BIOPHYSIQUE DE L'AUDITION***



# *CHAPITRE I*

# ACOUSTIQUE PHYSIQUE



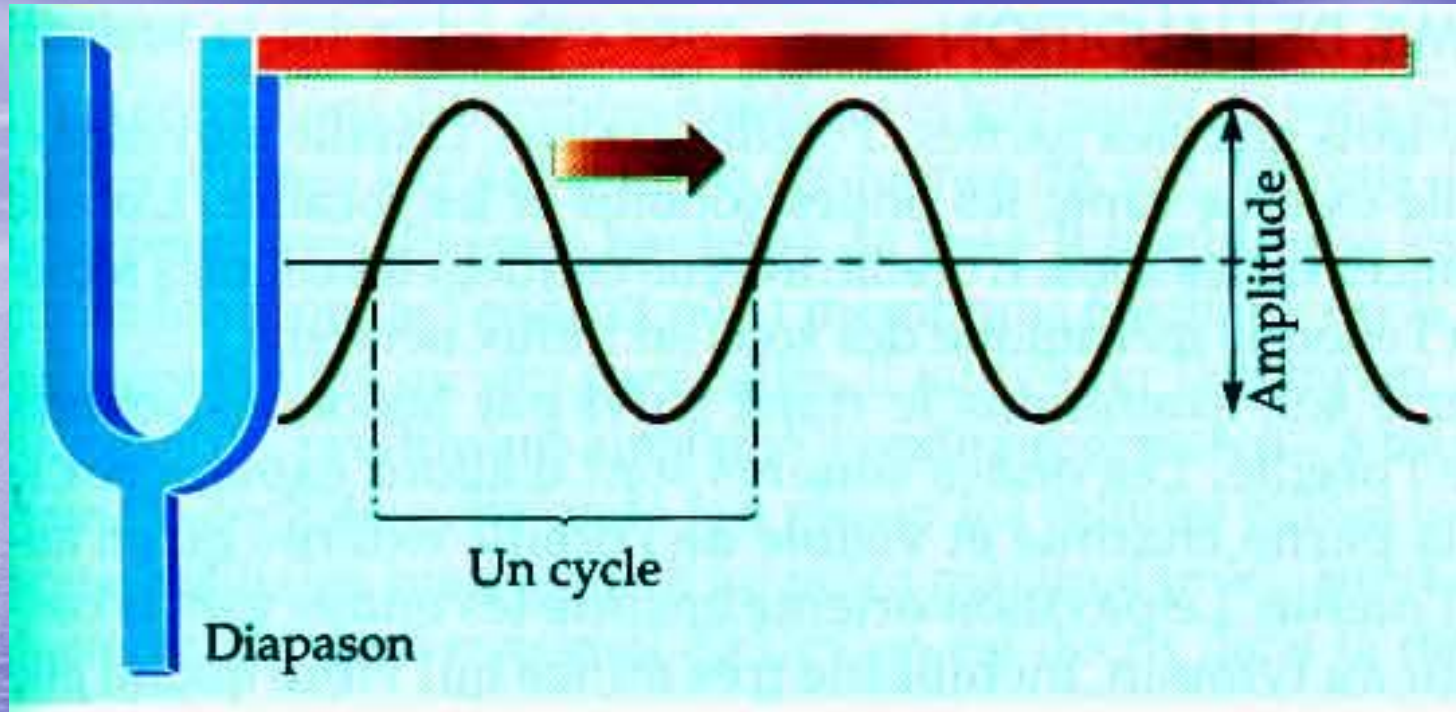
# INTRODUCTION

- Le mot " **son** " désigne à la fois une sensation auditive et le phénomène physique susceptible de lui donner naissance.
  - Un son est :
    - Phénomène physique : Ébranlement, perturbation dans un milieu matériel élastique (vibration mécanique).
    - Phénomène perceptif : Sensation obtenue par l'intermédiaire de l'ouïe.
  - Les vibrations ne sont audibles par l'oreille humaine que dans une certaine gamme de fréquence :
    - **Nourrisson : (20 à 20 000) Hz.**
    - **Adulte : (16 à 20 000) Hz.**
- Les **Infrasons** (vibration trop lente) et **Ultrasons** (vibration trop rapides) ne sont pas audibles.





# LE SON



Le son est une variation de la pression de l'air engendrée par les vibrations des particules matérielles. Cette variation déclenche un mouvement de molécules d'air appelé ondes sonores.

Le son est une perturbation de pression se propageant dans un milieu matériel élastique



- On distingue deux types de sons :

- **Son pur** : la vibration des particules du milieu matériel est sinusoïdale (une seule fréquence).

$$x = a \sin \omega t$$

$\omega$ : pulsation ou vitesse angulaire en radian par seconde

$a$ : amplitude ou élongation maximale d'un point à partir de sa position d'équilibre.

- **Son complexe** : la vibration des particules est périodique mais non sinusoïdale (sons musicaux).

Quand le son est apériodique, il s'agit d'un bruit.





# ETUDE DES SONS PURS

- Les sons purs n'existent pas dans la nature, ils proviennent des générateurs soit :
  - **Mécanique (diapason)**
  - **Électro-acoustique (générateurs de fréquence)**
- Le son est une perturbation d'un milieu matériel élastique. Cette perturbation modifie dans le milieu : la pression, le déplacement et la vitesse vibratoire des particules.
  - **Dans le temps (Onde Sinusoïdale):** Les particules du milieu entrent en vibration les unes après les autres autour de leur position d'équilibre.
  - **Dans l'espace (Onde Longitudinale):** La déformation se propage dans le milieu selon une onde sonore ou onde acoustique.



# VIBRATION D'UNE PARTICULE

L'élongation d'un point du milieu matériel dans lequel évolue l'onde sonore est une fonction sinusoïdale du temps, mouvement périodique :  $x = a \sin \omega t$   $x = a \sin(2\pi Nt)$

- L'amplitude  $a$  correspond à l'amplitude maximale de l'onde.
- La fréquence  $N(\text{Hz}) = 1\text{s}^{-1}$  est le nombre de périodes par seconde .

La fréquence est une caractéristique du son, elle est indépendante du milieu dans lequel a lieu la propagation.

- La période  $T = 1/N$  est le temps au bout duquel le phénomène se reproduit identique à lui même (même  $x$ ,  $v$ ).

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ en sec.}$$





# CELERITE DE L'ONDE SONORE

La propagation du son, est réalisée par transmission d'énergie d'une particule vibrante à une autre particule voisine. Cette transmission se fait avec une vitesse de propagation  $c$  appelée célérité.

- La **célérité ( $c$ )** est liée aux propriétés mécaniques du milieu :
  - de la compressibilité ( $\chi$ ) du milieu.
  - de la masse volumique ( $\rho$ ) du milieu

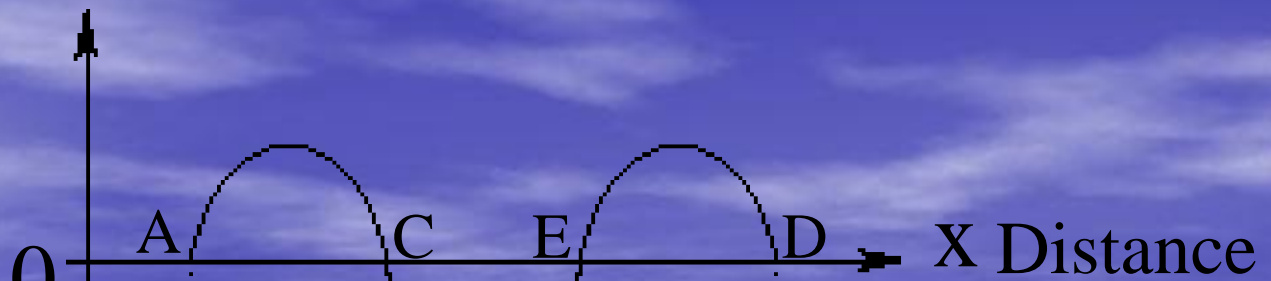
$\chi$  et  $\rho$  dépendent de la température, il en est même de la célérité du son

- On définit **la longueur d'onde  $\lambda$**  comme étant la distance parcourue par le son durant une période :  $\lambda = cT = c/N$  (en m). Elle dépend donc du milieu de propagation.

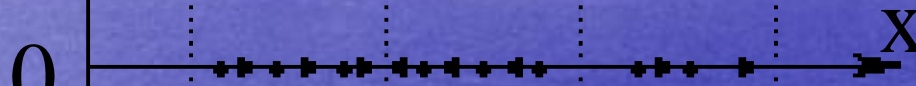




Ondes  
longitudinales



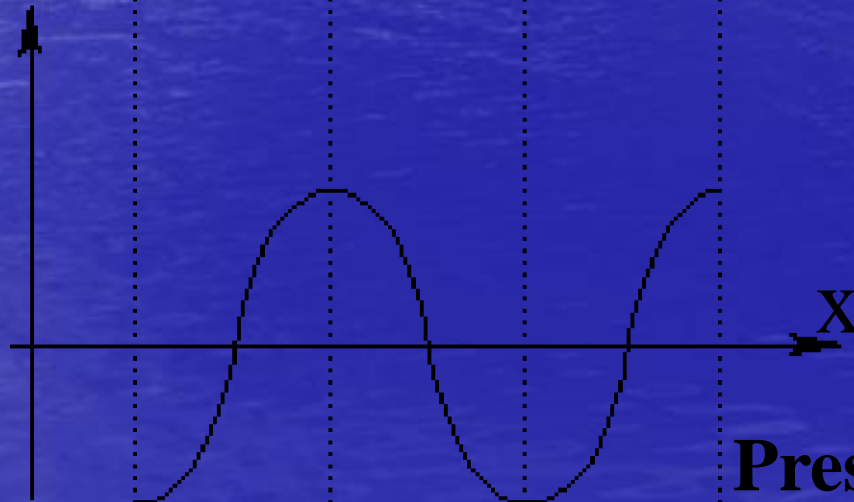
Mouvement  
des particules



Densité des  
particules



Ondes de  
pression



Pression acoustique



# PRESSION ACOUSTIQUE

Les sons se propagent dans les milieux élastiques, qui transmettent l'état de compression ou de dilatation de proche en proche, sans qu'il y ait transport de matière à distance.

Les particules situées entre A et C subissent un déplacement positif, celles situées entre C et E subissent un déplacement négatif ; il y a donc :

- **accumulation des particules d'air** : surpression en C
- **raréfaction d'air** : dépression, en A et en E.

Ces variations représentent la pression acoustique.

En chaque point de l'air, la pression totale  $P$  est la somme de la pression atmosphérique  $P_0$  et de la pression acoustique  $p$

$$: \quad P_{\text{tot}} = P_0 + p(\mathbf{x}, t).$$





# IMPEDANCE ACOUSTIQUE

La pression acoustique est proportionnelle à la vitesse de déplacement  $v$  :

$$p = \rho c \cdot v = Z \cdot v$$

Le facteur  $\rho c$  est appelé impédance acoustique noté  $Z$ .

## ANALOGIE ELECTRIQUE :

La relation  $p = Z \cdot v$  est équivalente à la loi d'ohm en électricité :

$$U = R \cdot i \quad i = \text{mouvement de charges}$$

$$U = \text{Force (f.e.m)}$$

$$R = \text{Résistance au mouvement}$$

$$p = Z \cdot v \quad v = \text{mouvement (oscillation) des particules}$$

$$p = \text{Force (pression acoustique)}$$

$$Z = \text{Résistances des particules}$$

L'impédance acoustique  $Z$  du milieu de propagation représente la résistance du milieu à la propagation des vibrations.



# ENERGIE ACOUSTIQUE

- La vibration des particules suppose la mise en jeu d'une énergie acoustique  $E_t$  que l'on décompose en :
  - Énergie cinétique  $E_c$  liée à la vitesse
  - Énergie potentielle  $E_p$  liée à la pression

L'énergie totale à chaque instant :  $E_t = E_c + E_p$

Lorsque  $v = v_{\max} = v_0$ ,  $E_c = 1/2 m v_0^2$  et  $E_p = 0$

- Pour un volume de masse  $m = \rho \cdot V$  et délimité par une surface  $S$  et une épaisseur  $X$ , l'énergie contenue dans ce volume  $S \cdot X$  est égale :

$$E_t = 1/2 \rho S X v_0^2$$





# PUISSANCE ACOUSTIQUE

- La Puissance acoustique est la quantité totale d'énergie traversant l'unité de surface durant l'unité de temps.
- L'onde sonore correspond à un **transport d'énergie**. Elle développe au niveau de la surface une pression et dépense au cours de l'émission une certaine puissance par unité de surface ou Puissance Surfaccique **en watt. m<sup>-2</sup>**.

$W = E_t / (St)$  ; or  $X/t$  représente la célérité  $c$  :

D'où  $W = 1/2 \cdot \rho c \cdot v_0^2 = 1/2 \cdot Z \cdot v_0^2$

Comme  $p_0 = Zv_0$  donc :

$$W = \frac{1}{2} p_0^2 / \rho c$$



# NIVEAU DE PUISSANCE ACOUSTIQUE

Les **puissances acoustiques** varient dans un rapport de  **$10^{12}$** .

L'utilisation d'une échelle logarithmique décimale sera plus adaptée, on définit :

**Le Bel** = valeur du logarithme décimal du rapport de 2 puissances acoustiques.

$$I_{\text{Bel}} = \log W/W_0$$

On exprime généralement le niveau de puissance acoustique en **décibel (dB)**.

$$I_{\text{dBel}} = 10 \log W/W_0$$



- **Décibel(dB) absolus : rapport  $W/W_0$**

le décibel absolus est comparé à une référence universelle, de puissance  $W_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ .

$$I_{\text{dB}} = 10 \log W / W_0$$

$W_0$  représente la puissance acoustique la plus basse perceptible par l'oreille normale à 1000 Hz.

Le seuil de perception à 1000 Hz est donc :

$$I = 10 \log W_0 / W_0 = 0 \text{ dB.}$$

- **Décibel(dB) relatifs : rapport  $W_1/W_2$**

On peut comparer deux sons, de puissance  $W_1$  et  $W_2$  en utilisant le rapport :

$$I_{\text{dB}} = 10 \log W_1 / W_2$$

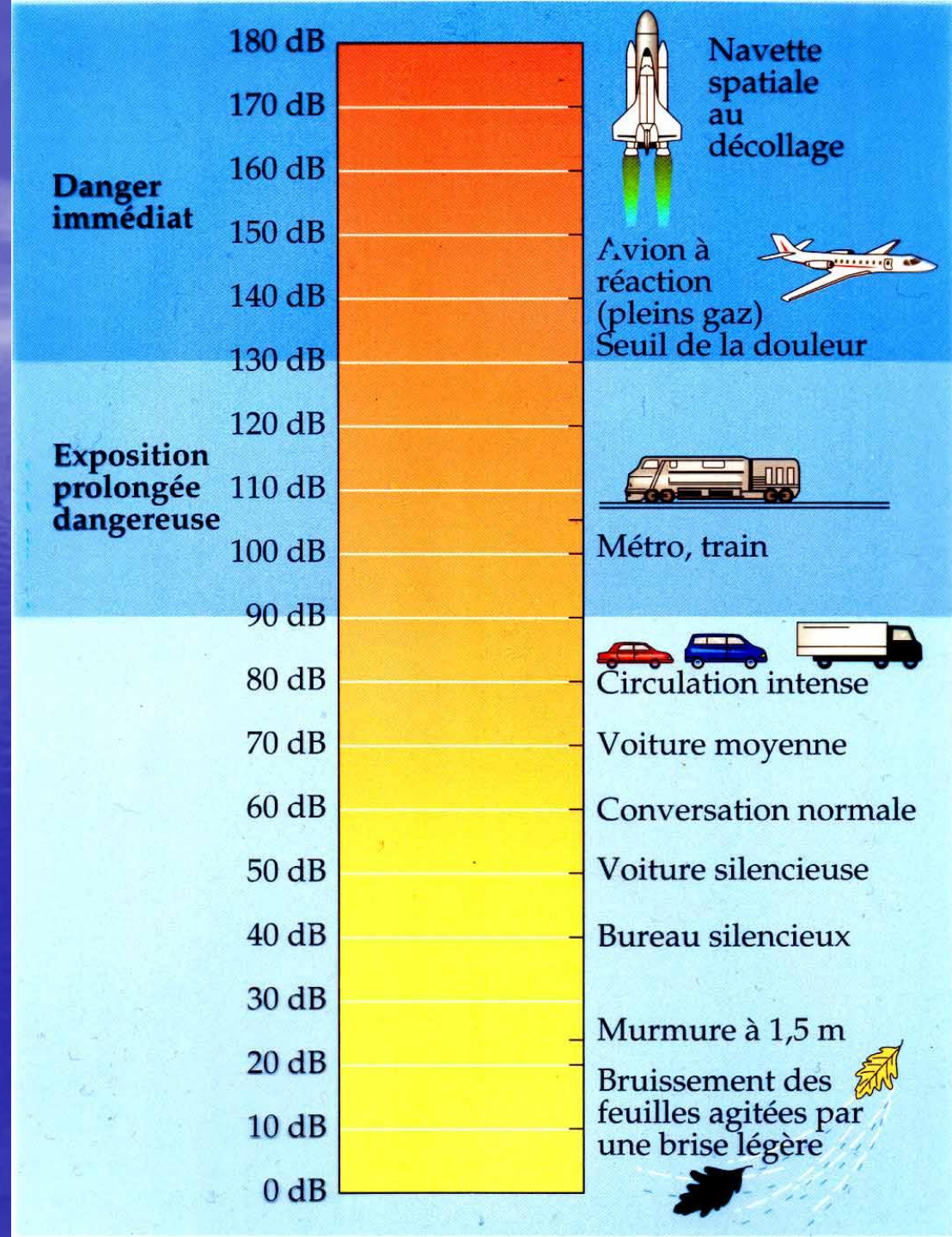
- L'échelle des sons audibles est comprise entre (0 et 120) dB.





Niveau de puissance acoustique en décibels de quelques sons familiers.

Les bruits constants de plus de 90 décibels peuvent causer des dommages permanents aux structures nerveuses de l'oreille.







# ABSORPTION-ATTENUATION

- Si la surface de l'obstacle n'est ni dure ni rigide, une partie du son peut être absorbée.
- Les phénomènes d'absorption vont réduire la puissance surfacique transmise selon une loi exponentielle :

$$W = W_0 e^{-kX}$$

- x est l'épaisseur du milieu traversé par l'onde.
- K coefficient d'atténuation linéaire qui augmente rapidement avec la fréquence ; il en résulte que la pénétration des sons diminue quand la fréquence augmente.



# PROPAGATION DES ONDES SONORES

- Il existe une autre cause d'affaiblissement du son pour des raisons purement géométriques.

En effet l'onde sonore étant sphérique, elle se propage dans toutes les directions. S'il n'y a pas de pertes (chaleur) dans le milieu de transmission (absorption), **la puissance surfacique décroît comme l'inverse carré de la distance**, en raison de l'augmentation de la surface au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source.

$$W_1 \cdot d_1^2 = W_2 \cdot d_2^2$$





# PHENOMENES AUX INTERFACES

onde incidente  
**(I)**

Onde réfléchie**(R)**

$\alpha_i$

$\alpha_r$

$$\alpha_i = \alpha_r$$

**RÉFLEXION**

① **G**

$$Z_1 = \rho_1 c_1$$

**Interface**

② **C<sub>2</sub>**

$$Z_2 = \rho_2 c_2$$

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_t} = \frac{c_1}{c_2}$$

$\alpha_t$

**RÉFRACTION**

onde réfractée **(T)**  
(transmise)

$$c_2 > c_1 \text{ et } Z_2 \gg Z_1$$



# REFRACTION-REFLEXION

- Comme en optique, il y a réfraction lorsque le son passe d'un milieu à un autre dans lequel l'impédance acoustique est différente.

**Interface air-eau**, une faible proportion de l'énergie ( $W_i$ ) du son est réfractée ( $W_t$ ), la plus grande partie étant réfléchie ( $W_r$ ).

- Dans un milieu déterminé, si la célérité du son varie d'un point à un autre (présence d'un gradient de température), la propagation des ondes, ne se fait plus en ligne droite, mais est courbée par réfraction.





# REFLEXION-TRANSMISSION

- Le facteur de transmission (T)

$$T = \frac{W_t}{W_i} = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

- Le facteur de réflexion (R)

$$R = \frac{W_r}{W_i} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)^2$$

Sachant que  $W_i = W_r + W_t$  donc :  **$R + T = 1$**

Exemple :

$$\left. \begin{array}{l} Z_{\text{air}} = 300 \\ Z_{\text{eau}} = 1,5 \cdot 10^6 \end{array} \right\} T = 1,7 \cdot 10^{-3}$$

Le millième de l'énergie incidente véhiculée dans l'air est transmise dans un milieu aqueux.

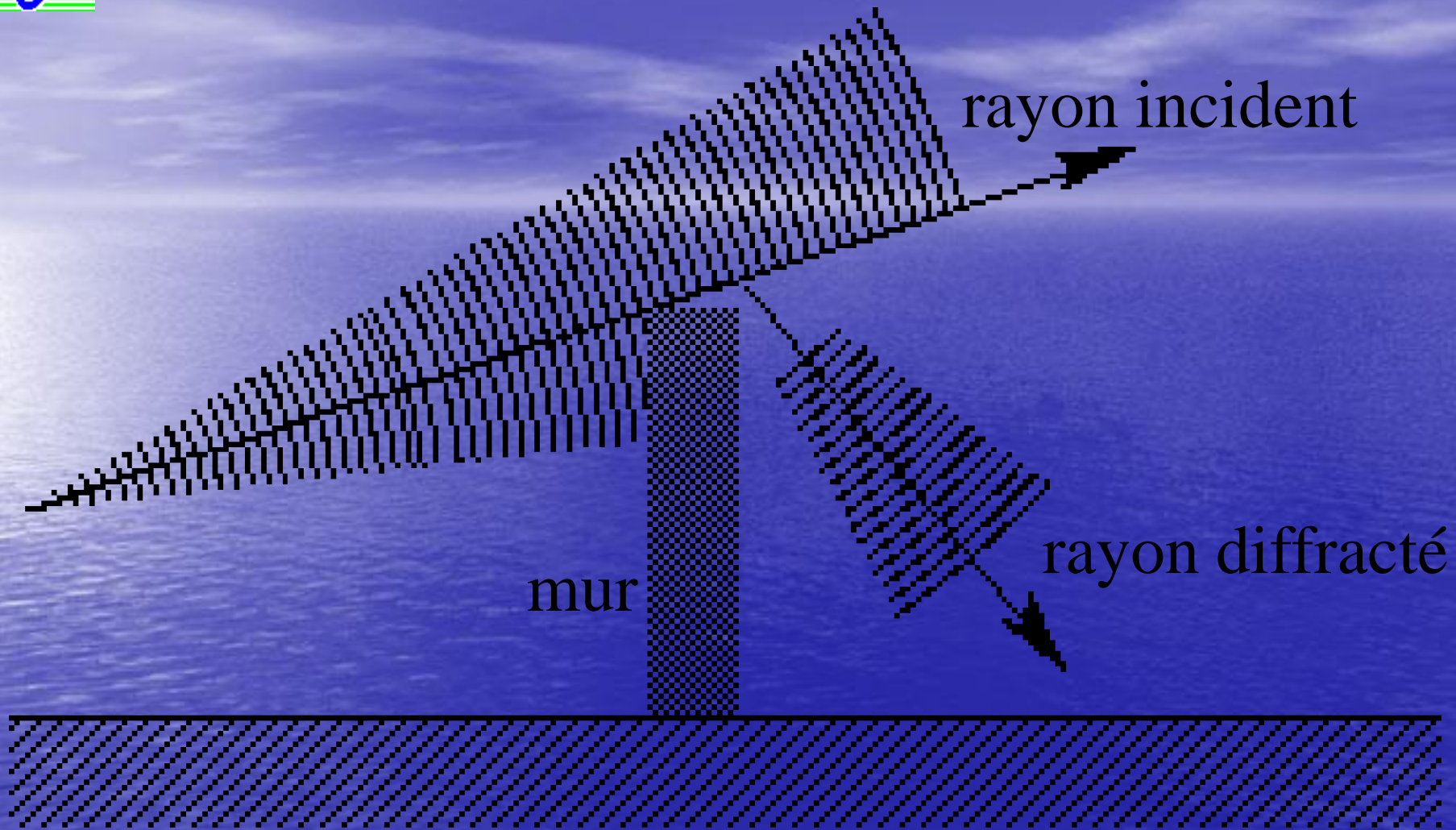


# DIFFRACTION D'UN SON

Les ondes sonores peuvent aussi " contourner " les obstacles, ce qui correspond au phénomène ondulatoire de **diffraction**. En effet ce phénomène de diffraction de l'onde sonore dépend de la longueur d'onde  $\lambda$  et de la taille de l'obstacle.

- Si la longueur d'onde de la vibration est faible par rapport à la dimension de l'obstacle, le son n'est plus diffracté, il se propage en ligne droite. Cas des hautes fréquences.
- Si la longueur d'onde de la vibration est grande par rapport à l'obstacle, la diffraction est importante ; l'onde sonore contourne l'obstacle. Cas des faibles fréquences ; (on dit : les murs ont des oreilles).





**Ombre acoustique**



# SONS COMPLEXES OU SONS MUSICAUX

- Un son complexe est dû à une vibration périodique mais non sinusoïdale du milieu matériel. Le théorème de Fourier permet d'affirmer que tout son complexe de fréquence  $N$  est la somme de sons purs de fréquences respectives  $N, 2N, 3N, \dots, nN$ .

$$f(t) = a_1 \sin(2\pi Nt + \phi_1) + a_2 \sin(4\pi Nt + \phi_2) + \dots + a_n \sin(2\pi nNt + \phi_n).$$

- Le son 1 de fréquence  $N$  est appelé le **fondamental**, les autres sons 2, 3, ...  $n$  sont les **harmoniques**.

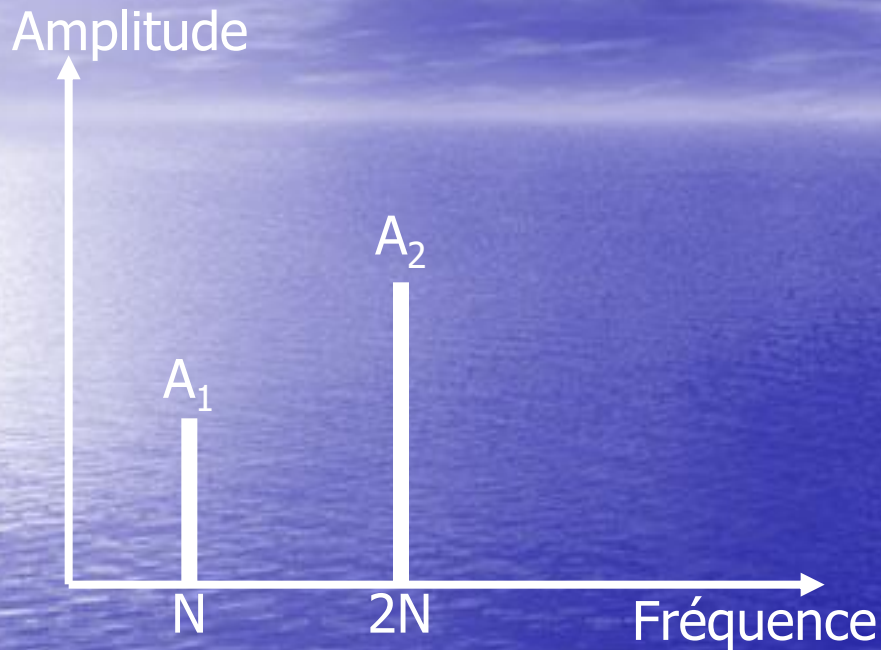
Cette décomposition d'un son complexe en sons purs s'appelle analyse harmonique ou analyse spectrale.

On dresse  $a_i = f(N)$  : c'est le spectre en amplitude ou  $\phi_i = f(N)$  c'est le spectre de phase.

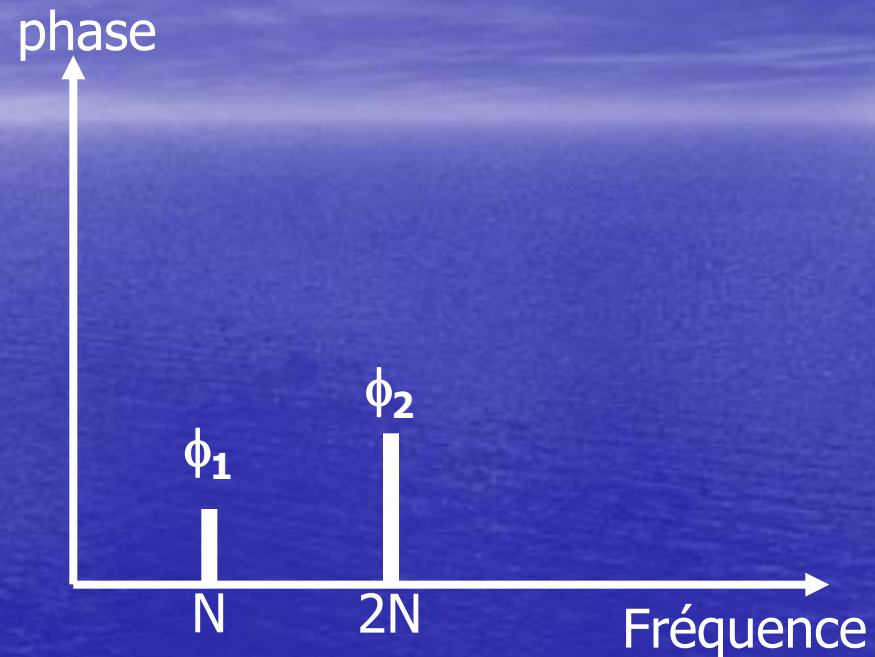




# ANALYSE HARMONIQUE



**Spectre en amplitude**



**Spectre en phase**

Cette décomposition d'un son complexe en sons purs s'appelle analyse harmonique ou analyse spectrale.



# PSYCHO-ACOUSTIQUE

- La psycho-acoustique a pour objet l'étude expérimentale des relations quantitatives entre le stimulus acoustique mesurable physiquement et les réponses de l'ensemble du système auditif sensations et perceptions auditifs.
- Un son périodique est défini par trois paramètres physiques : Fréquence, Puissance et le spectre.  
A ces trois paramètres physiques correspondent trois **qualités physiologiques** donc subjectives, qui sont :
  - **Tonie ou la hauteur**
  - **Sonie ou l'intensité**
  - **Le timbre.**





# TONIE OU HAUTEUR D'UN SON

- C'est la qualité qui permet d'affirmer q'un son est aigu ou grave.

Cette grandeur psycho-acoustique est liée étroitement à la grandeur physique fréquence du son,  $H=f(N)$ .

Un son parait d'autant plus aigu que sa fréquence est plus élevée.

## ➤ **Seuil différentiel relatif de fréquence S.D.F = $\Delta N/N$**

La sensation varie comme le logarithme de l'excitation.

Si  $N$  est la fréquence du stimulus et si  $\Delta N$  est la plus petite variation de fréquence qui donne une sensation de hauteur distincte, la loi de Weber indique que :  **$\Delta N/N = \text{cste}$** , (valable entre 500Hz et 7000Hz).

donc  $\Delta H = K \Delta N/N = K \Delta(\text{Log}N)$  d'où :  $H_1 - H_2 = K \text{Log}N_1/N_2$



# SONIE OU INTENSITE SONORE

- C'est la sensation qui nous fait dire q'un son parait fort ou faible. Cette sensation est essentiellement liée à la puissance surfacique acoustique mais dépend aussi de la fréquence. En effet 2 sons de même puissance acoustique mais de fréquence différente auront une sonie différente. L'unité de sonie est le phone.
- **Le phone** : est une unité physiologique sans dimension traduisant le niveau d'isosonie, alors le décibel est une unité physique du niveau de puissance acoustique :

$$ndB = 10 \log W_2 / W_1 = 20 \log P_2 / P_1$$

Par convention, à 1000Hz l'échelle des phones est la même que celle des décibels.



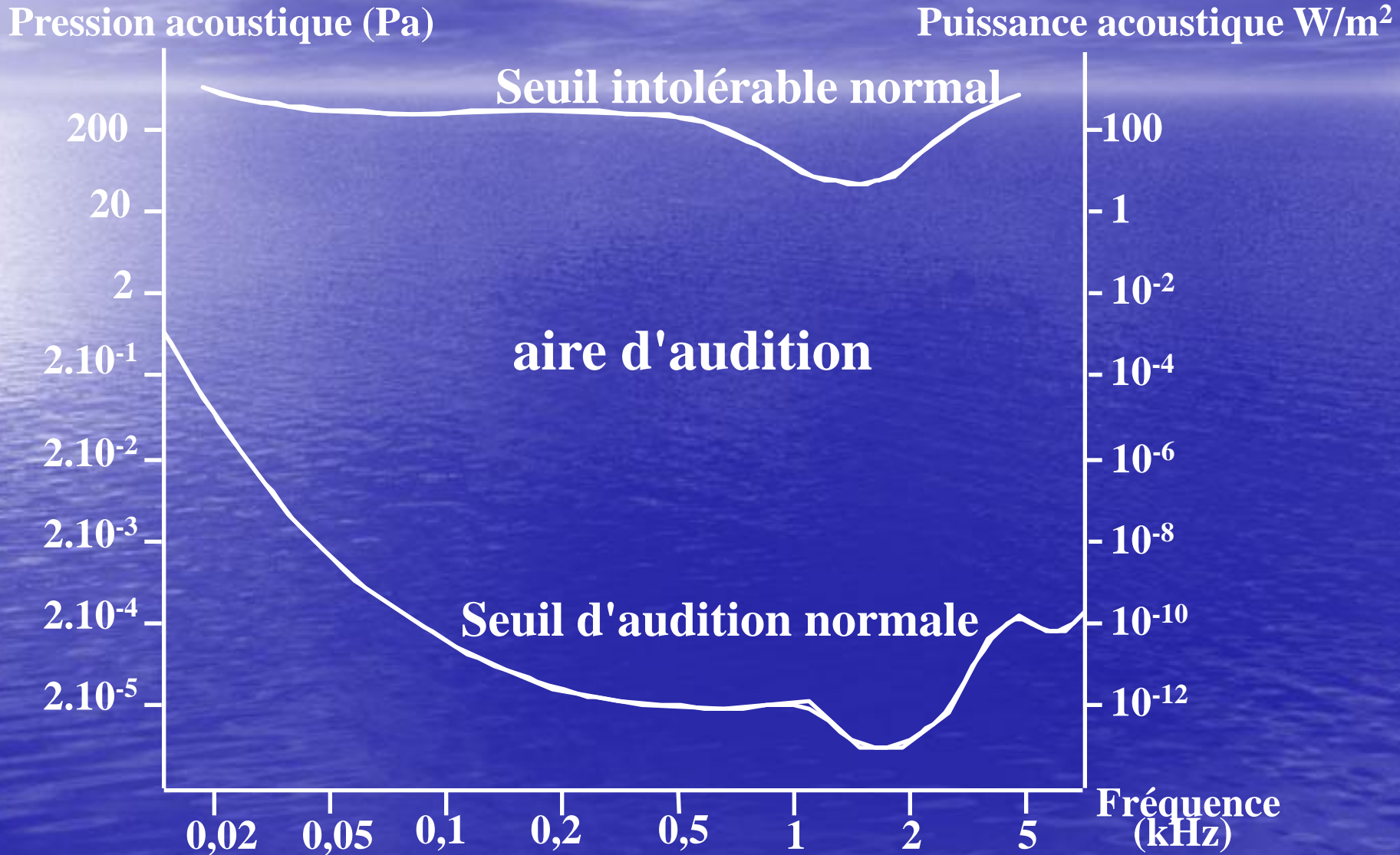


# SEUIL ABSOLU

- **Seuil absolu** : C'est la puissance acoustique la plus petite qui produit une sensation sonore.
- Le seuil absolu à 1000Hz ( $W=10^{-12}$ Watts.m<sup>-2</sup>) est pris comme niveau zéro pour les décibels absolus.
- Le seuil absolu varie avec la fréquence, il passe par un minimum très évasé entre (1000 et 5000)Hz.
- La surface comprise entre les courbes du seuil absolu et du seuil douloureux s'appelle champ auditif tonal.



# COURBE DES SEUILS







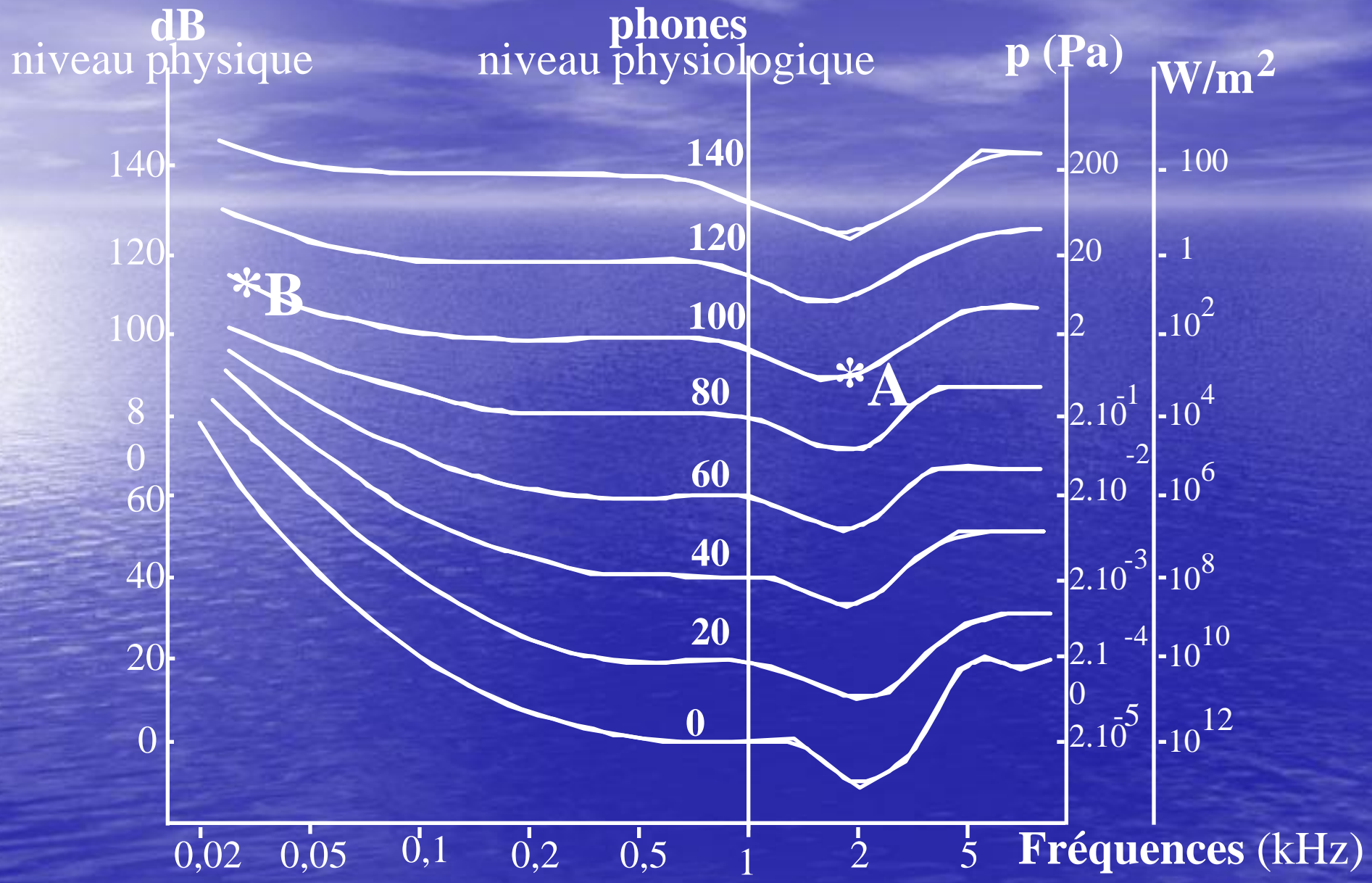
# SEUIL DIFFERENTIEL RELATIF DE PUISSANCE ACOUSTIQUE ( $\Delta W/W$ )

- Si  $\Delta W$  est la plus petite variation de puissance acoustique perceptible et si  $\Delta S$  est la variation de sonie tout juste discernable correspondante à ce  $\Delta W$ , la loi de Weber indique que :

$$\Delta S = K \Delta W/W = K \Delta(\text{Log} W) = K \text{Log} W_1/W_2$$

- Très fréquemment, on admet que le seuil différentiel relatif correspondrait à une variation de 1dB.

# LA SONIE COURBES ISOSONNIQUES NORMALISÉES







# LE TIMBRE

- C'est la qualité qui permet de distinguer 2 sons de même hauteur et de même sonie mais émis par 2 instruments différents.

La même note jouée au piano ou au violon donne une sensation différente.

L'oreille est donc capable de réaliser l'analyse harmonique d'un son complexe.

Le timbre est directement lié au spectre et il correspond à la richesse en harmonique.



# AUDITION MONAURALE

- **Loi d'Ohm :**

En audition monaurale, l'oreille n'apprécie pas les différences de phases entre les différents partiels d'un son complexe, elle n'apprécie que les différences d'amplitude.

Cette loi n'est vraie que pour les sons continus, elle n'est plus valable pour les sons transitoires tels que le langage parlé.





# AUDITION BINAURALE

- L'audition avec les deux oreilles permet d'augmenter la sensation de sonie (amélioration de 3dB à 6dB).
- Elle permet de reconnaître les différences de phase c.à.d. le temps d'arrivée des sons dans les 2 oreilles.
  - Pour ( $N < 800\text{Hz}$ ) , la localisation des sources acoustiques aériennes provient des différences de phase entre les ondes acoustiques reçues dans chaque oreille.
  - Pour ( $N > 3000\text{Hz}$ ), la localisation dépend uniquement des différences d'intensité perçues par chaque oreille.
  - Pour ( $800 < N < 3000\text{Hz}$ ), l'orientation auditive est moins bonne.



# SONS SUBJECTIFS

- L'oreille fait subir à une onde sonore des distorsions:
  - Si on fait entendre un son complexe très puissant, l'oreille perçoit les premiers harmoniques.
  - Si on fait entendre simultanément deux sons de fréquence  $N_1$  et  $N_2$ , l'oreille entend distinctement le son différentiel ( $N_1 - N_2$ ) et plus faiblement le son additionnel ( $N_1 + N_2$ ).





# EFFET DE MASQUE

- Lorsqu'on fait entendre simultanément à la même oreille deux sons de fréquences différentes, le plus intense (son masquant) gêne l'audition de l'autre (son masqué).

Les sons les plus faciles à masquer sont les graves.



# FATIGUE AUDITIVE

- Après exposition prolongée à un son intense (travailleurs professionnellement exposés au bruit), les performances de l'oreille sont moins bonnes. Le seuil est plus élevé que normalement, la fréquence  $N=4000\text{Hz}$  est la plus touchée.

Cette fatigue auditive est une surdité transitoire, après une période de récupération plus ou moins longue, l'oreille reprend ses capacités initiales.