

ACOUSTIQUE PHYSIQUE

Science qui étudie les problèmes physiques, physiologiques et psychologiques, liés à l'émission, la propagation et la réception des sons.

(du latin sonus (sonner) et du grec akouein (entendre))

1. SOURCE SONORE

1A Puissance(s) et Niveau de puissance acoustique d'une source

La source consomme une puissance électrique ou mécanique P .

Elle communique à chaque instant au milieu de propagation une énergie vibratoire qui se propage de proche en proche dans le milieu.

A cette énergie transmise correspond une puissance acoustique P_a .

La source rayonne cette puissance acoustique avec un certain rendement acoustique η .

La source est caractérisée par son niveau de puissance acoustique N_w (ou L_w).

$$\begin{aligned}
 &P : \text{puissance consommée (W)} \\
 &P_a : \text{puissance acoustique (W)} \\
 &\eta = \frac{P_a}{P} \\
 &N_w : \text{niveau de puissance acoustique (dB)} \\
 &N_w = 10 \log \frac{P_a}{P_0} \\
 &P_a = P_0 \cdot 10^{0,1 \cdot N_w} \\
 &P_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad \text{puissance de référence}
 \end{aligned}$$

1B Caractéristiques d'une source

La source rayonne des ondes sphériques de rayon R .

R représente la distance entre la source considérée comme ponctuelle et le récepteur.

- La source est omnidirectionnelle (ou isotrope*) en général, *elle émet alors sa puissance dans toutes les directions de l'espace de manière uniforme dans l'angle solide $\Omega = 4\pi$ stéradians.*
(* du grec : isos: semblable et trephô: je fais tourner)
- Certaines sources sont directives, elles rayonnent une quantité d'énergie variable avec la direction.
(par exemple le porte-voix, permet de concentrer toute l'énergie dans une direction donnée mais ne l'amplifie pas).

Exercice 1 :

1) Un haut-parleur consomme une puissance électrique $P = 20\text{W}$.

Sachant que son rendement est $\eta = 13/100$, calculer la puissance acoustique de ce haut-parleur.

2) Pour la voix ou un instrument de musique, le rendement acoustique n'est que de $1/1000$, car le son est produit par des procédés mécaniques.

Calculer la puissance mécanique P dépensée si une voix a une puissance acoustique $P_a = 10^{-5}\text{W}$.

3) Sur la notice d'une alarme électronique on trouve :

puissance électrique absorbée $P = 25\text{W}$ et puissance acoustique $P_a = 5\text{W}$

Calculer le rendement acoustique de la source.

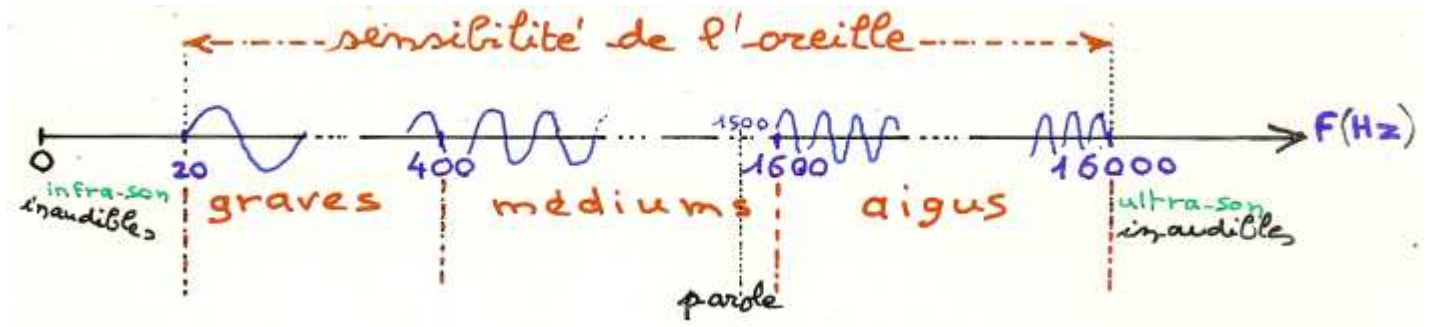
Exercice 2 : Calculer les valeurs manquantes du tableau :

source sonore	puissance acoustique P_a (W)	niveau de puissance acoustique N_w (dB)
voix	10^{-6} à 10^{-3}	
piano		
orchestre	5 à 100	110 à 120
quadrimateur		
haut-parleur	0,2 à 1	160

2. QUALITES d'un SON (hauteur, timbre, intensité)

2A Hauteur

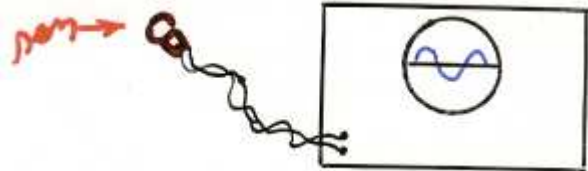
Elle indique si un son est plus ou moins aigu.
Elle dépend de la fréquence de la vibration.
(c'est un paramètre subjectif de la sensation auditive)



Méthode expérimentale pour visualiser une onde sonore :

La vibration sonore transmise par l'air à un microphone (relié à un oscillographe) impose à la membrane sensible de celui-ci une vibration de même fréquence et de même forme, $y = f(t)$, dont le graphe apparaît sur l'écran.

Le micro fait correspondre aux vibrations de l'air, des vibrations électriques.



2B Timbre

2B1 caractéristiques

Il ne se mesure pas.

Il donne la coloration du son.

Il dépend de la forme du signal (modes de production : corde pincée, frappée, grattée... ; point d'attaque)

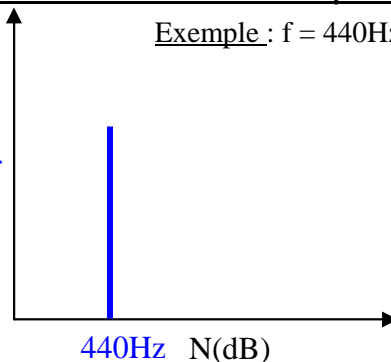
2B2 deux sons peuvent avoir une même fréquence f , mais un timbre différent.

Exemple : $f = 440\text{Hz}$

Diapason

Son simple (pur) sinusoïdal

Il comporte une *seule fréquence f*

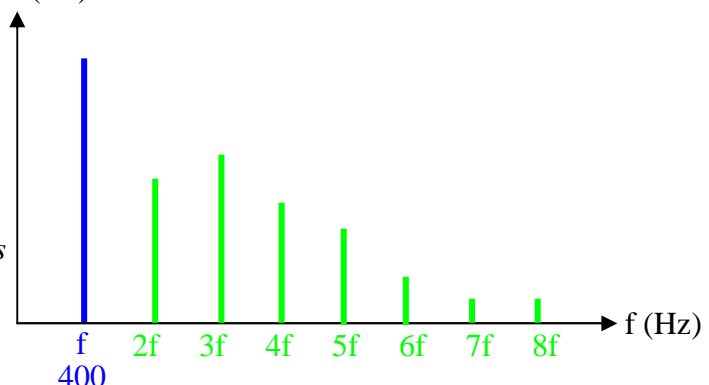


Flûte

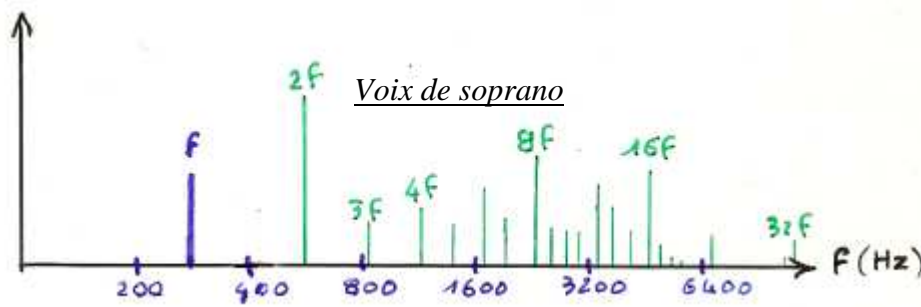
Son complexe périodique

Ensemble de sons purs

Il comporte le *fondamental de fréquence f* et des *harmoniques*



2_{B3} une **belle voix** est riche en **harmoniques**

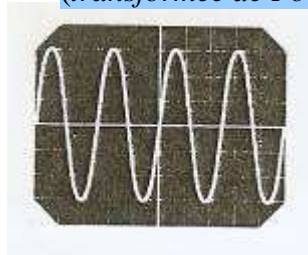


spectre de Fourier

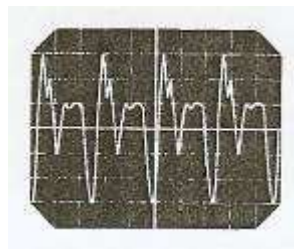
(échelle logarithmique)

2_{B4} exemples d'analyse de sons (transformée de Fourier)

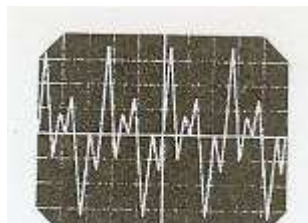
Son pur de fréquence f



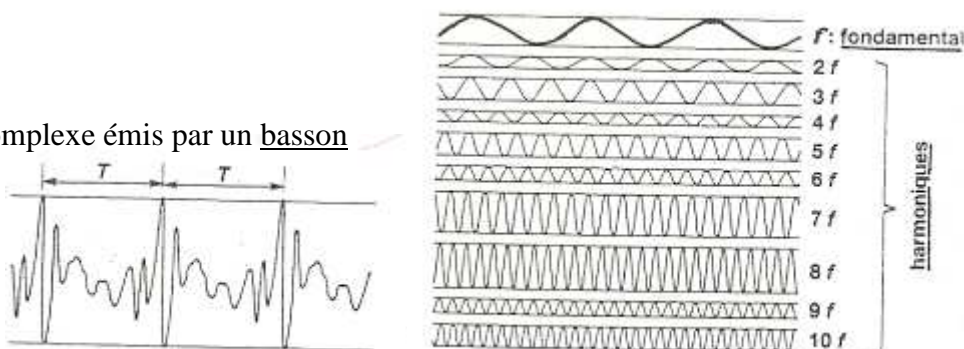
Son complexe émis par une flûte



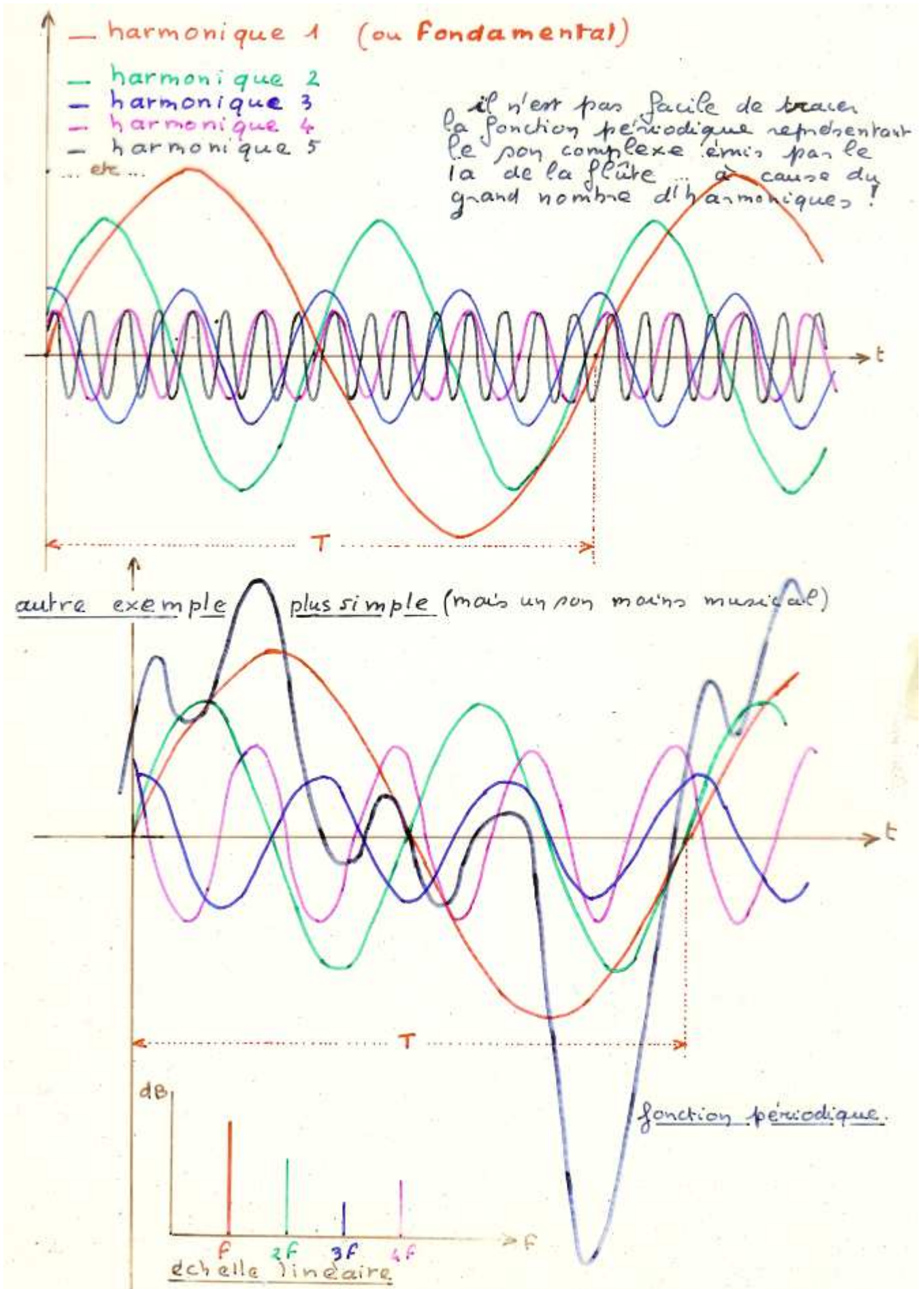
Son complexe émis par un saxophone



Son complexe émis par un basson



2_{B5} autres exemples



2c Intensité

2c1 caractéristiques

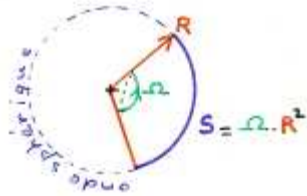
L'intensité indique si le son est plus ou moins fort.

Elle relève de l'énergie dépensée lors de la vibration du tympan de l'oreille.

Elle se traduit par l'amplitude plus ou moins grande des déformations du tympan.

La valeur efficace de la pression p_{eff} exercée sur le tympan donne une mesure de l'intensité.

2c2 intensité acoustique, puissance acoustique, pression acoustique



I : intensité acoustique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$). du champ direct.

(elle représente la puissance par unité de surface à laquelle l'énergie acoustique est rayonnée)

S : surface d'onde (m^2)

Ω : angle solide d'émission de la source (sr)

R : distance entre la source et le récepteur (m)

ρ : masse volumique de l'air ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

C : célérité de l'onde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

p_{eff} : pression efficace de la pression acoustique instantanée (Pa)

P_a : puissance acoustique

$$I = \frac{P_a}{S} \quad \text{et} \quad I = \frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot C}$$

$$S = \Omega \cdot R^2$$

$$S = 4\pi \cdot R^2, \text{ surface d'onde sphérique}$$

Exercice 3 :

Une **source sonore ponctuelle** émet uniformément dans toutes les directions.

L'absorption par l'air est négligeable, la puissance acoustique de la source est $P_a = 10^{-2} \text{ W}$.

1) Donner l'expression littérale de l'intensité acoustique I en un point en fonction de la puissance acoustique de la source et de la distance R du point à la source.

2) Calculer I en un point situé à 5m de la source.

3) Calculer la pression acoustique efficace p_{eff} , sachant qu'à 20°C, la masse volumique de l'air est $\rho = 1,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et la célérité du son dans l'air $C = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Exercice 4 :

Au **seuil d'audibilité** d'un son, de fréquence 1000Hz, la **pression efficace de référence** est $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

1) Calculer l'intensité acoustique de référence I_0 en un point où existe une pression p_0 .

($C = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $\rho = 1,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

2) Sachant que cette intensité I_0 est reçue en un point d'une onde sphérique, situé à 1m d'une source ponctuelle, calculer la puissance acoustique de cette source.

Exercice 5 :

La **plus faible** puissance acoustique pour une source étant $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$ (puissance de référence),

calculer la distance R à la source d'un point M d'une onde sphérique, point où l'intensité acoustique est $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, I_0 étant l'intensité de référence.

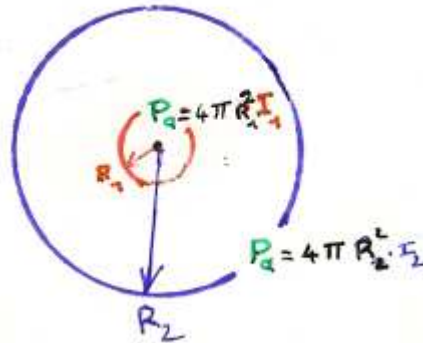
Exercice 6 :

Un son est émis dans un angle solide $\Omega = 1,57$ sr.

Calculer l'intensité acoustique en un point de la calotte sphérique distant de 2,5 m de la source de puissance acoustique $5 \cdot 10^{-2}$ W.

2c3 intensité sonore et distance à la sourceExercice 7 :

Si on suppose que la puissance acoustique se répartit de manière uniforme sur toute la surface d'onde sphérique et si on suppose qu'il n'y a aucun phénomène d'absorption et de frottements, l'intensité sonore décroît ($I_2 < I_1$) car la puissance acoustique $P_a = 4\pi \cdot R^2 \cdot I$ se conserve au cours de la propagation.



$$4\pi \cdot R_1^2 \cdot I_1 = 4\pi \cdot R_2^2 \cdot I_2$$

$$R_1^2 \cdot I_1 = R_2^2 \cdot I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$$

Exprimer I_2 en fonction de I_1 quand la distance est multipliée :

1) par 2 ($R_2 = 2 R_1$).

2) par 10 ($R_2 = 10 R_1$).

Application : $I_1 = 10^{-7} \text{ W.m}^{-2}$ et $R_1 = 3 \text{ m}$.

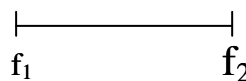
3. ANALYSE du SON**3A Définition**

Analyser un son c'est chercher la répartition sonore dans les différentes fréquences, par **bande de fréquences**.

3B Intervalle3B1 définition

L'intervalle de deux sons indique la différence de hauteur de ces sons.

(rapport de leur fréquence)



$$\frac{f_2}{f_1} = i$$

3B2 exemples

sixte: $i = \frac{5}{3}$; quinte: $i = \frac{3}{2}$; quarte: $i = \frac{4}{3}$

Gammes musicales :

Séries de hauteur de sons particulièrement agréables à l'oreille, correspondant à des intervalles bien définis.

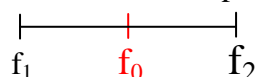
3C Octave

octave $i = 2$

(f, 2f) (2f, 4f) (4f, 8f) (8f, 16f)

3D Centre d'une octave

Une **bande d'octave** est représentée par sa **fréquence centrale** f_0



$$f_0 = f_1 \cdot \sqrt{2} = f_1 \cdot 2^{\frac{1}{2}} \text{ ou } \frac{f_2}{\sqrt{2}}$$

$$f_{\text{minimum}} = f_1 = f_0 / \sqrt{2} \text{ et } f_0 \cdot \sqrt{2} = 2 \cdot f_1 = f_2 = f_{\text{maximum}}$$

3E Demie-octaves

Une bande d'octave est constitué de deux demie-octaves : $f_1 - f_0$ et $f_0 - f_2$.

3F Bandes d'octave dans le bâtiment

Dans le bâtiment le spectre sonore est sectionné en **6 bandes d'octaves centrées sur :**
125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz

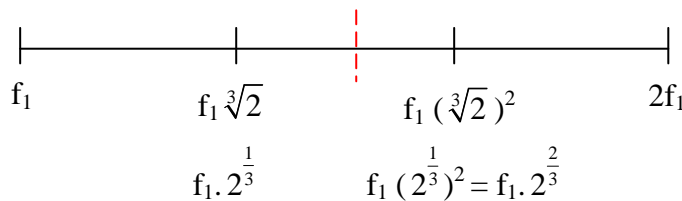
On rajoute parfois (atelier d'imprimerie,...) **2 bandes centrées sur 62,5 et 8000 Hz.**

Exercice 8 :

- 1) Calculer pour chaque **octave** précédente la fréquence minimum f_1 et la fréquence maximum f_2 .
- 2) Reporter ces 8 bandes d'octaves (f_1, f_0, f_2) sur une échelle logarithmique.

3G Tiers d'octaves

Une **bande d'octave** peut aussi être découpée par **tiers de bande d'octave** :



Exercice 9 :

Décomposer la bande d'octave centrée sur $f_0 = 2000$ Hz par tiers de bande d'octave.

4. TROIS NIVEAUX

4A Niveau de puissance acoustique N_w (source)

• La source acoustique considérée ponctuelle, possède une puissance acoustique P_a et un niveau de puissance acoustique

$$N_w = 10 \log \frac{P_a}{P_0}$$

$P_0 = 10^{-12}$ W étant la puissance de référence

Elle rayonne de manière uniforme dans l'espace dans un cône d'angle solide Ω .

4B Niveaux acoustiques (ou niveaux sonores N) (N_i ou N_p) (point d'écoute)

• En un point, distant de la source de R , de l'onde acoustique de surface $S = \Omega \cdot R^2$, où existe une pression efficace p_{eff} ,

l'intensité acoustique est $I = \frac{P_a}{S}$ ou $I = \frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot C}$ (ρ est la masse volumique de l'air et C la célérité du son dans l'air)

$I_0 = 10^{-12}$ W.m⁻² est l'intensité acoustique de référence et $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa est la pression acoustique de référence

$$I_0 = \frac{p_0^2}{\rho \cdot C}$$

En ce point on définit le niveau acoustique $N = 10 \log \frac{I}{I_0}$

$$\text{Et comme } \frac{I}{I_0} = \frac{\frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot C}}{\frac{p_0^2}{\rho \cdot C}} = \frac{p_{eff}^2}{p_0^2} = \left(\frac{p_{eff}}{p_0} \right)^2 \quad N = 10 \log \left(\frac{p_{eff}}{p_0} \right)^2 = 20 \log \frac{p_{eff}}{p_0}$$

Source

P_a : puissance acoustique (W)
 N_w : niveau de puissance acoustique (dB)

$$N_w = 10 \log \frac{P_a}{P_0} \text{ et } P_a = P_0 \cdot 10^{0,1 \cdot N_w}$$

Onde sonore

I : intensité acoustique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

p_{eff} : pression acoustique (Pa)

$$I = \frac{P_a}{S} \left(\frac{P_a}{\Omega \cdot R^2} \right) = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho \cdot C}$$

N_i (ou L_i) : niveau d'intensité acoustique (dB)

N_p (ou L_p) : niveau de pression acoustique (dB)

$$10 \log \frac{I}{I_0} = N_i = N_p = 20 \log \frac{p_{\text{eff}}}{p_0}$$

$$I = I_0 \cdot 10^{0,1 \cdot N_i} \text{ et } p_{\text{eff}} = p_0 \cdot 10^{0,05 \cdot N_p}$$

Valeurs de référence

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

I_0 : intensité sonore au seuil d'audibilité par l'oreille humaine ($f = 1000\text{Hz}$).

4c Seuil de la douleur - Seuil d'audibilité**Seuil de la douleur**

N (N_i ou N_p) = 120 dB ; $I = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; p (p_{eff}) = 20 Pa

Seuil d'audibilité

$N = 0 \text{ dB}$; $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

4D Loi de Weber-Fechner**4D1 les oreilles, les yeux et les muscles**

Les oreilles ne mesurent pas les grandeurs de la même façon que les yeux et les muscles.

Exemples

- une longueur de 20cm nous paraît double de celle de 10cm
- une masse de 2kg nous paraît double d'une masse de 1kg
- le son de 2 violons ne donne pas l'impression d'un son 2 fois plus fort que celui d'un violon seul...

4D2 les oreilles et le cerveau

...et pourtant l'intensité sonore reçue par les oreilles est double, mais le cerveau perçoit une intensité atténuée et aux oreilles la sensation est la même en passant de 1 violon à 2 violons qu'en passant de 100 à 200 violons !

4D3 loi**Loi de Weber – Fechner :**

Nos impressions sonores (subjectives) varient comme
le logarithme des excitations physiques qui en sont la cause.
 (quand l'intensité varie de 1 à 10 ; de 10 à 100 ; de 100 à 1000...
 l'impression sonore varie de 0 à 1 ; de 1 à 2 ; de 2 à 3...)

Weber Ernst 1795-1878
 Physiologue allemand

Fechner Gustav 1801-1887
 Physicien allemand

4^E Exemples de niveaux acoustiques N

Exemples	Impression subjective	I (W.m ⁻²)	N _i (dB)	P _{eff} (Pa)	Conversation	Exemples
Sirène à 15m des transatlantiques	Destruction de l'oreille	10 ²	140	2.10 ²	Impossible	Explosion (mélange tonnant)
Turboréacteur		10	130			Atelier extrêmement bruyant (chaudronnerie emboutissage)
Moteur d'avion à 6m	Seuil de la douleur	1	120	2.10		<i>protection individuelle contre le bruit</i>
Riveteuse	Bruit insupportable (douloureux)	10 ⁻¹	110		En criant	Atelier très bruyant (raboteuse, scie à bois presse à découper)
Marteau-pilon		10 ⁻²	100	2		
Moteur d'auto sur banc d'essai	Bruit très pénible	10 ⁻³	90		Difficile	Atelier courant (tournage, ajustage)
Métro		10 ⁻⁴	80	2.10 ⁻¹		
Moto		10 ⁻⁵	70		En parlant fort	Appartement avec télévision
Chute du Niagara	Ambiance supportable mais bruyante	10 ⁻⁶	60	2.10 ⁻²		
Rue à gros trafic		10 ⁻⁷	50		A voix normale	Appartement bruyant (bureau d'employé)
Réfectoire bruyant	Bruit courant	10 ⁻⁸	40	2.10 ⁻³		
Passage de voiture		10 ⁻⁹	30		A voix basse	Appartement calme
Grand magasin	Calme	10 ⁻¹⁰	20	2.10 ⁻⁴		Classe
Rue animée	Silencieux (très calme)	10 ⁻¹¹	10			Hôpital
Rue tranquille		10 ⁻¹²	0	2.10 ⁻⁵		Studio d'enregistrement
Jardin calme						Laboratoire d'acoustique
Voilier						
Frémissement d'une feuille	Silence (inhabituel)					

Exercice 10 :

Une **explosion** de puissance sonore $P_a = 1 \text{ kW}$ se produit à 500 m d'altitude.

Le son se propage dans toutes les directions (*source isotrope ou omnidirectionnelle*) avec la célérité $C = 340 \text{ m.s}^{-1}$.

- 1) Combien de temps le son mettra-t-il pour arriver au sol ?
- 2) Calculer l'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore au niveau du sol.

Exercice 11 :

Une **onde** acoustique de surface $S = 25 \text{ m}^2$ transporte une puissance $P_a = 1 \text{ mW}$.

Calculer :

- 1) l'intensité acoustique.
- 2) le niveau d'intensité.
- 3) la pression acoustique efficace.

Exercice 12 :

Une source sonore omnidirectionnelle émet dans toutes les directions.

Un sonomètre placé à 5 m de la source indique un niveau sonore de 70 dB.

Exprimer littéralement, puis calculer :

- 1) l'intensité acoustique au niveau du sonomètre.
- 2) la puissance acoustique émise par la source.
- 3) le niveau de puissance de cette source.

Exercice 13 :

- 1) Calculer le niveau sonore à 2 m d'une source isotrope de puissance acoustique $P_a = 0,04 \text{ W}$ émettant des ondes sphériques
- 2) On prend la même source que précédemment, mais on mesure 70 dB.
A quelle distance se trouve-t-on de la source ?

Exercice 14 :

Calculer :

- 1) le niveau acoustique correspondant à une pression efficace de 0,5 Pa.
- 2) la pression efficace correspondant au seuil de la douleur.

Exercice 15 :

Une source sonore rayonne dans un demi-espace ($\Omega = 2\pi \text{ sr}$).

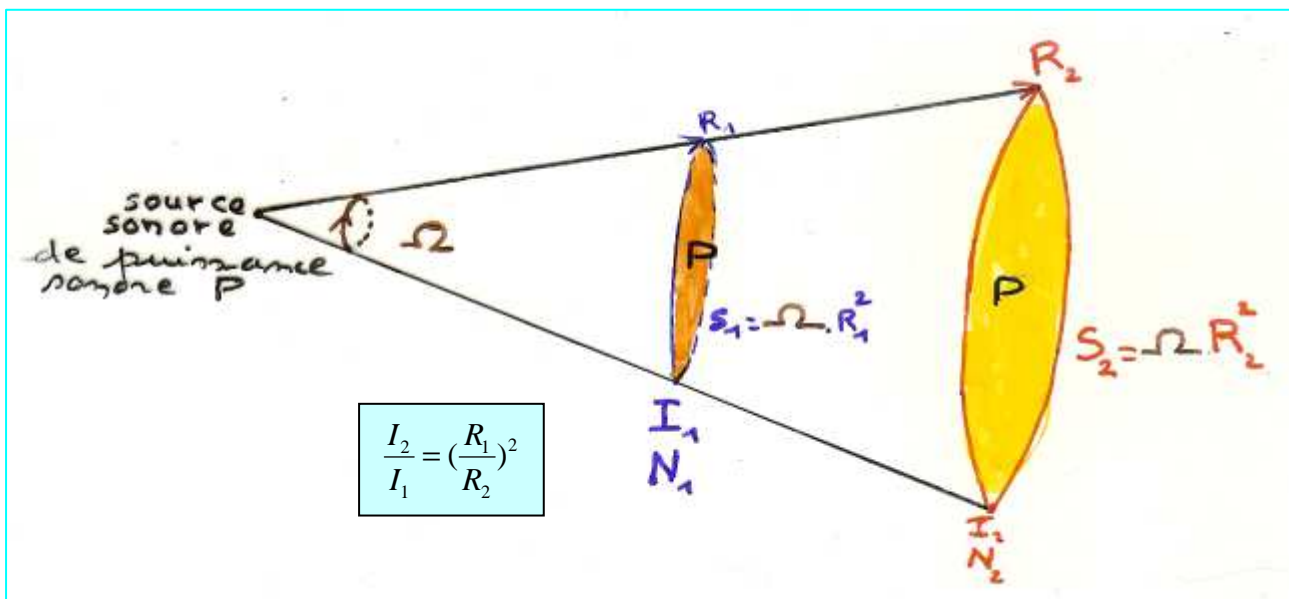
- 1) Exprimer littéralement le niveau sonore N en fonction de la puissance acoustique P_a de la source, de la distance R à la source et de l'angle solide Ω .
- 2) Calculer N pour $P_a = 0,5 \text{ W}$ et $R = 20 \text{ cm}$.
Que devient ce niveau sonore quand la distance double ($R = 40 \text{ cm}$) ?

Exercice 16 :

De combien chute un niveau acoustique quand l'intensité acoustique I est divisée par 10^x ?

Application : $x = 6$

4F Intensités sonores, niveaux sonores et distance à la source

Exercice 17 :

Une source sonore isotrope de puissance P_a , émet dans un angle solide Ω .

Aux distances R_1 et R_2 on relève les niveaux sonores N_1 et N_2 .

- 1) Etablir la relation littérale exprimant N_2 en fonction de N_1 , R_1 et R_2 : $N_2 = N_1 + 20 \log \frac{R_1}{R_2}$

Applications :

- a- montrer que si $R_2 = 2R_1$, le niveau chute de...6 dB.
 b- de combien chute le niveau quand la distance est décuplée ?

2) Etablir une relation littérale entre R_1 , R_2 , N_1 et N_2 : $\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 = 10^{(0,1.N_1 - 0,1.N_2)}$

Application

En un point situé à 4,9 m de la source le niveau sonore est égal à 73 dB.

On s'éloigne de la source d'une distance x .

Le niveau chute de 3 dB.

Calculer x .

•5. CHAMP DIRECT, relation entre N_w et N

Relation entre le niveau de puissance acoustique N_w de la source de puissance acoustique P_a et le niveau acoustique N de l'onde émise par la source, à la distance R et dans l'angle solide Ω :

$$N = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{P_a}{\Omega \cdot R^2}}{I_0} = 10 \log \frac{P_a}{I_0 \cdot \Omega \cdot R^2} = 10 \log \frac{P_a}{I_0} + 10 \log \frac{1}{\Omega \cdot R^2} = N_w + 10 \log \frac{1}{\Omega \cdot R^2}$$

($I_0 = P_0 = 10^{-12}$)

$$N = 10 \log \frac{P_a}{I_0 \cdot \Omega \cdot R^2}$$

$$N = N_w + 10 \log \frac{1}{\Omega \cdot R^2}$$

$$N = N_w + 10 \log(\Omega \cdot R^2)^{-1} = N_w - 10 \log(\Omega \cdot R^2)$$

• Si $\Omega = 4\pi$; $N = N_w + 10 \log \frac{1}{4\pi \cdot R^2} = N_w + 10 \log \frac{1}{4\pi} + 10 \log \frac{1}{R^2}$

$$N = N_w - 11 - 20 \log R$$

Exercice 18 :

La corne d'une sirène a la forme d'un cône dont l'angle d'ouverture est de 30°.

- 1) Calculer l'angle solide Ω .
- 2) Quel est le niveau de puissance de cette source sonore, de puissance 0,214 W.
- 3) Calculer les niveaux d'intensité à 10 cm et à 50 cm de la source.
 En déduire de combien chute le niveau sonore quand la distance est quintuplée.

Exercices 19 :

- 1) Calculer le niveau d'intensité à 3 m d'une source isotrope, de puissance acoustique 0,03 W, qui rayonne dans tout l'espace.
- 2) Une chaudière est équivalente à une source sonore qui émet uniformément dans toutes les directions.
 A 3 m de la source le niveau sonore est de 70 dB.
 Calculer la puissance acoustique émise par la source.

Exercice 20 :

Un haut-parleur dont le niveau de puissance est $N_w = 90$ dB émet un son contenu dans un trièdre.
 (1/4 d'espace : $\Omega = \pi$ sr)

- 1) Quelle est la puissance du haut-parleur ?
- 2) Calculer le niveau d'intensité à 10 cm du haut-parleur.
- 3) A quelle distance du haut-parleur a-t-on :
 a- $N_1 = 90$ dB ?
 b- $N_2 = 50$ dB ?

•Exercice 21 :

$$N = 10 \log \frac{P_a}{I_0 \cdot \Omega R^2}$$

A partir de cette relation exprimer littéralement la **variation du niveau N** quand :

1) La puissance acoustique P_a de la source est multipliée par x (Ω et R gardant les mêmes valeurs).

Application : $x = 2$

2) L'angle solide Ω par multiplié par x (P_a et R gardant les mêmes valeurs).

Application : $x = 1/3$

3) La distance R est multipliée par x (P_a et Ω gardant les mêmes valeurs).

Application : $x = 10$

•Exercices 22 :

1) On **multiplie par x** la puissance acoustique P_a d'une source.

Par combien doit-on multiplier la distance R à la source pour que le niveau d'intensité N_i reste le même ?

2) Que fait le niveau de pression N_p à une distance R , quand l'espace se réduit de moitié, pour une source donnée ?

3) Etablir la relation littérale entre Ω et R pour que le niveau d'intensité acoustique N soit égal au niveau de puissance de la source.

6. PLUSIEURS SOURCES

6A Intensité acoustique totale (globale) et niveau acoustique total (global)

En l'absence de tout phénomène d'interférences, pour la **superposition d'ondes** (de fréquences identiques ou différentes) provenant d'une ou plusieurs sources :

- I_{Totale} : **intensité acoustique totale** résultant de la superposition des ondes.
- $p_{\text{eff Totale}}$: valeur efficace de la **pression acoustique** résultante de toutes les ondes.
- N_{Total} : **niveau d'intensité acoustique total** résultant de toutes les ondes.

I_i : intensité acoustique de chaque onde

N_i : niveau sonore de chaque onde

pression acoustique de chaque onde

$$\frac{I_{\text{Totale}}}{I_0} = \frac{\sum I_i}{I_0} = \frac{\sum I_0 \cdot 10^{0,1 \cdot N_i}}{I_0} = \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot N_i}$$

$$I_{\text{totale}} = \sum_{i=1}^n I_i \quad I_{\text{totale}} = I_0 \cdot \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot N_i}$$

$$p_{\text{eff Total}}^2 = \sum_{i=1}^n p_{\text{eff } i}^2$$

$$N_{\text{Total}} = 10 \log \frac{I_{\text{Total}}}{I_0} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot N_i}$$

Exercices 23 :

Une **chaudière** constitue une source sonore qui émet uniformément dans toutes les directions.

On admet que le niveau sonore en un point M de l'espace à 3 m de la source est de 70dB.

On place une deuxième chaudière identique à la précédente à 3 m du point M.

1) Calculer l'intensité acoustique totale en M.

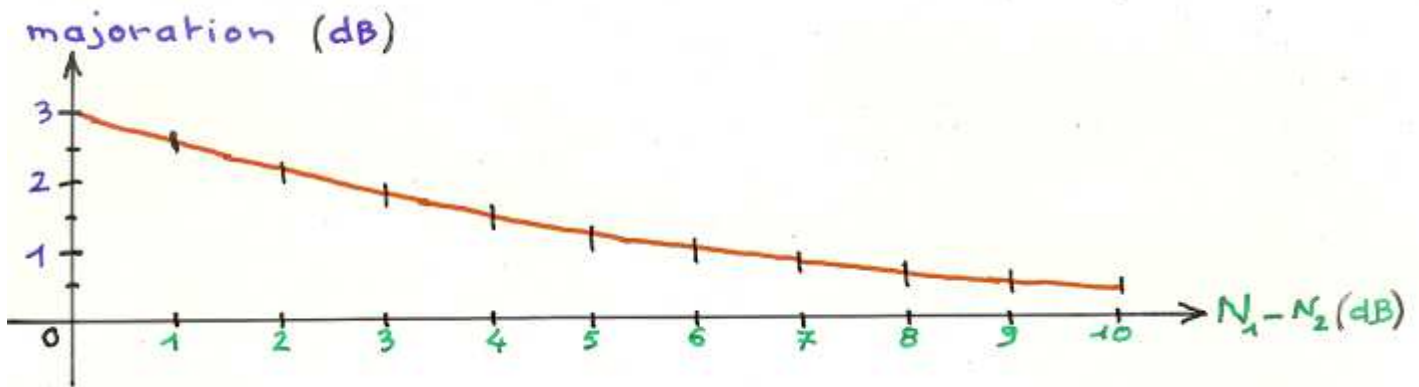
2) Calculer le niveau sonore total en M.

3) a- Quelle est l'augmentation du niveau sonore ?

b- Vérifier le résultat précédent en utilisant l'**abaque** * suivant :

(la **majoration** est à ajouter au niveau le plus élevé N_1 , pour obtenir le niveau total).

6B Abaque pour deux niveaux N_1 et N_2 (du latin abacus : *table à calcul*)



Exercice 24 :

En un même point, arrivent 3 sons de niveaux sonores : 60 dB, 65 dB et 70 dB.

- 1) Calculer l'intensité acoustique totale.
- 2) Quel est le niveau acoustique total ?

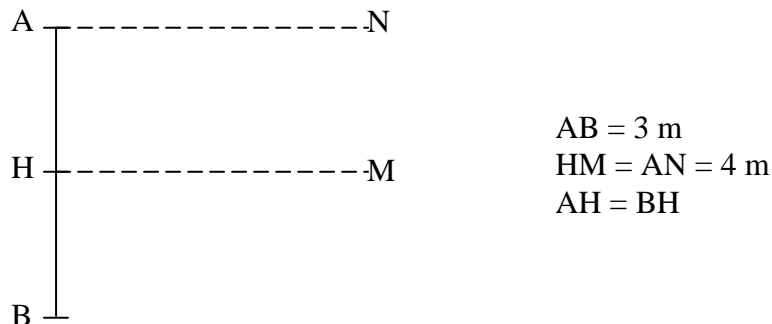
Exercice 25 :

En un même point, arrivent 2 sons dont le niveau d'intensité résultant est égal à 85,7 dB.

Le niveau d'un des 2 sons est 83 dB.

- 1) Calculer l'intensité sonore totale, l'intensité de chaque son.
- 2) Quelle est le niveau sonore du son manquant ?

•Exercice 26 :



Le haut-parleur A émet seul 70 dB au point M.

Le haut-parleur B émet seul 75 dB au point M.

Les surfaces d'ondes de chaque haut-parleur sont des demi-sphères.

Calculer :

- 1) la puissance acoustique de chaque haut-parleur.
- 2) le niveau acoustique total en M.
- 3) le niveau acoustique total en N.

7. MESURES ACOUSTIQUES

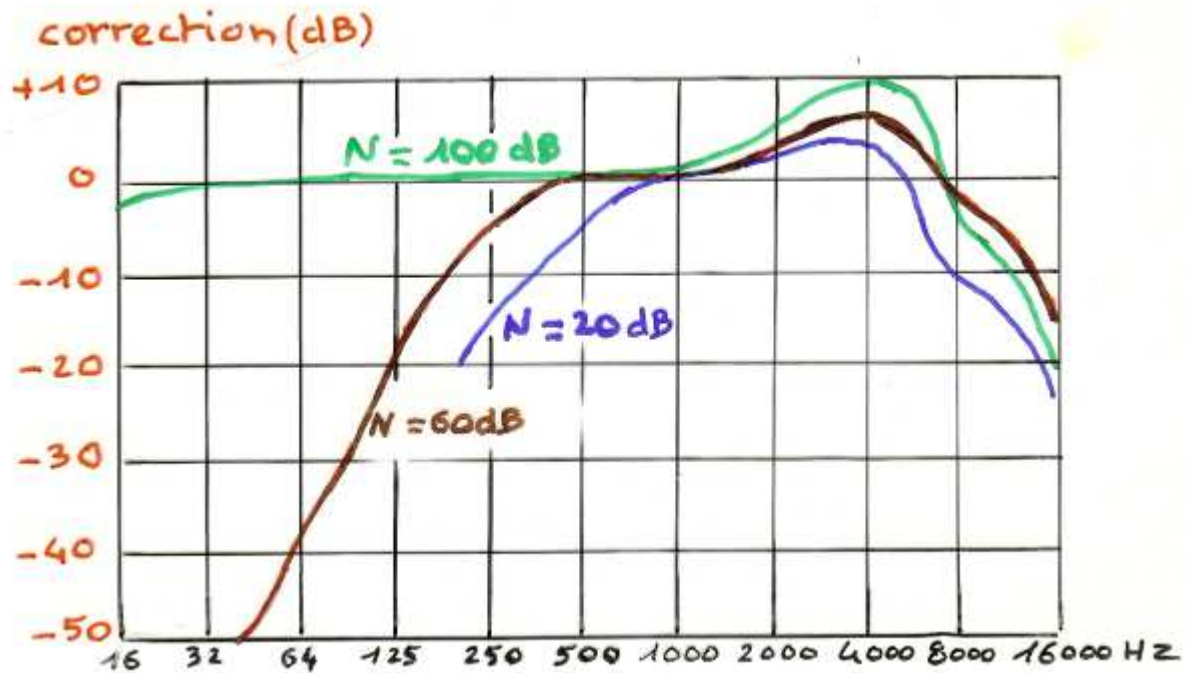
7A La courbe de réponse de l'oreille n'est pas fidèle

L'oreille ne juge pas le son en proportion directe de son intensité, mais suivant une relation plus complexe qui dépend de la fréquence f , du niveau acoustique N .

- N faibles : l'oreille a un maximum de sensibilité entre 500 et 5000Hz
elle est peu sensible aux sons graves
peu sensible aux sons aigus
- N fort : l'oreille a une sensibilité indépendante de la fréquence

Pour apprécier expérimentalement la **sensibilité de l'oreille** on utilise des sons purs de fréquence $f = 1000\text{Hz}$ et de niveau d'intensité acoustique ajustable.

Cet aspect physiologique du fonctionnement de l'oreille est intégré par la pondération A (*correction*).



On transforme le spectre sonore (*exprimé en dB*) qui traduit un son physique en spectre sonore (*exprimé en dBA*) qui traduit le même son perçu par l'oreille.

On établit des courbes d'égales sensations sonores de l'oreille quelque soit la fréquence.

Courbes d'égales sonies (chaque courbe d'égale sonie est désignée par le niveau sonore à $f = 1000\text{Hz}$).

La sonie est exprimée en **phones**

(du grec phone : voix)

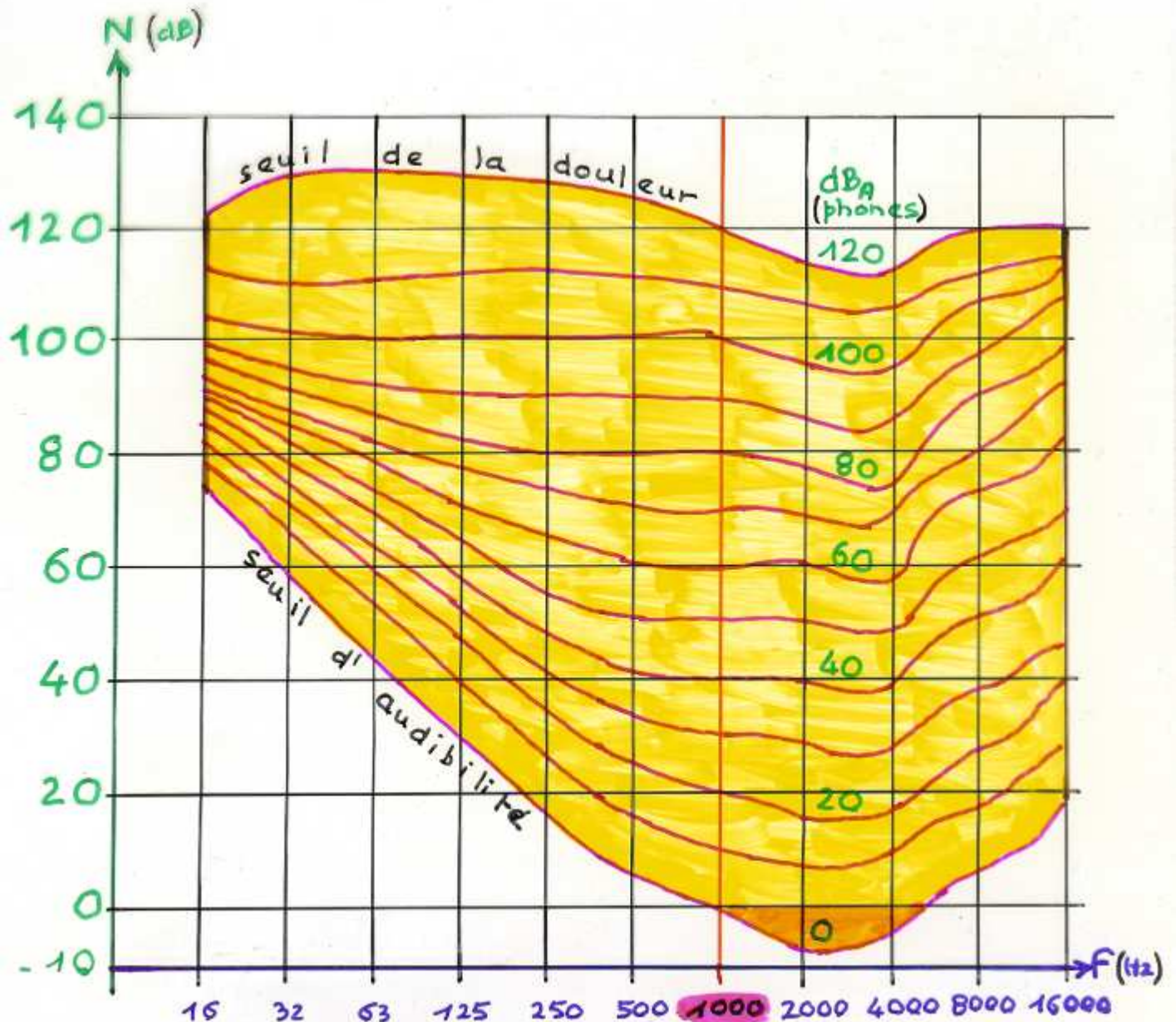
7B AUDIOGRAMME (dB et dBA)

(CHAMP d'AUDIBILITE) : **réseau de courbes d'isophonie** (diagramme de Fletcher)

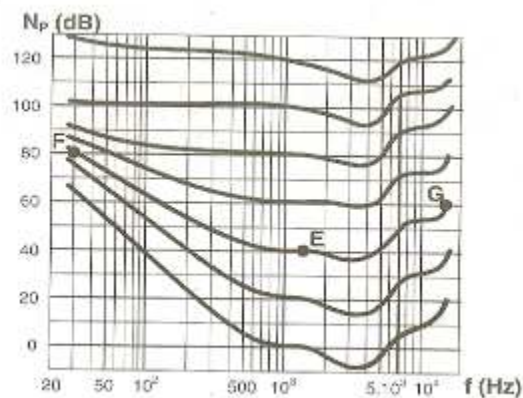
Il se réfère à des sons purs.

Il est inapplicable à un individu donné (indicatif).

(l'oreille peut avoir des troubles auditifs : *presbyacousie*,...)



Exemple : un son pur de fréquence $f = 1000$ Hz et de niveau d'intensité acoustique $N = 40$ dB donne la même sensation d'intensité qu'un son pur de fréquence $f = 125$ Hz et de niveau $N = 58$ dB.



E (40dB)

G (60dB)

F (80dB)

Ces points produisent la même sensation sonore bien que leurs niveaux d'intensité acoustique respectifs soient différents.

Exercice 27 :

- 1) Un son pur de fréquence $f = 125$ Hz et de niveau sonore $N = 20$ dB est-il perçu par l'oreille ?
- 2) Au seuil d'audibilité, pour certaines fréquences au-delà de 1000 Hz, pourquoi le niveau sonore est-il négatif ?

Exercice 28 :

On considère 4 sons de fréquences 63 Hz, 1000 Hz, 4000 Hz et 16000 Hz.

Sachant que leur niveau d'intensité acoustique respectifs sont : 80 dB, 50 dB, 70 dB et 90 dB, calculer :

- 1) Le niveau du son résultant...en dB.
- 2) Le niveau du son résultant...en dB(A), en ayant au préalable pondéré chaque son.

7c SONOMETRE

Transducteur qui transforme un signal mécanique (la vibration sonore) en signal électrique.

Ce signal électrique peut être mesuré, mis en mémoire, analysé, traité de différentes manières.

Quand il sert à mesurer des niveaux d'intensité acoustique (en dB), sa réponse est linéaire, sa sensibilité est indépendante de la fréquence.

Pour que le sonomètre puisse **simuler la sensation subjective de l'oreille**, il est muni de **dispositifs de pondération**.

Il comporte un commutateur qui permet d'introduire trois réseaux électriques correspondant aux niveaux d'intensité acoustique :

- Pondération A ($N < 55\text{dB}$)

La plus utilisée dans le bâtiment, pour l'isolation réglementaire, où l'on s'attache à obtenir des bruits d'ambiance de l'ordre de 30 à 40dB.

- Pondération B ($55\text{dB} < N < 85\text{dB}$)

- Pondération C ($N > 85\text{dB}$)

Les mesures corrigées sont exprimées respectivement en dB(A), en dB(B) ou en dB(C).

(il existe une autre pondération (D), elle concerne les bruits provoqués par les avions et autres aéronefs)

Les courbes de réponse des sonomètres et les courbes d'isotonie sont globalement analogues.

Les sonomètres sont munis de filtres passe-bandes permettant de mesurer le niveau d'intensité dans une bande de fréquence choisie, ceci pour effectuer l'**analyse d'un bruit**.

Ils fonctionnent alors en analyseurs de spectre :

- filtre d'octave
- filtre de demie-octave
- filtre tiers d'octave

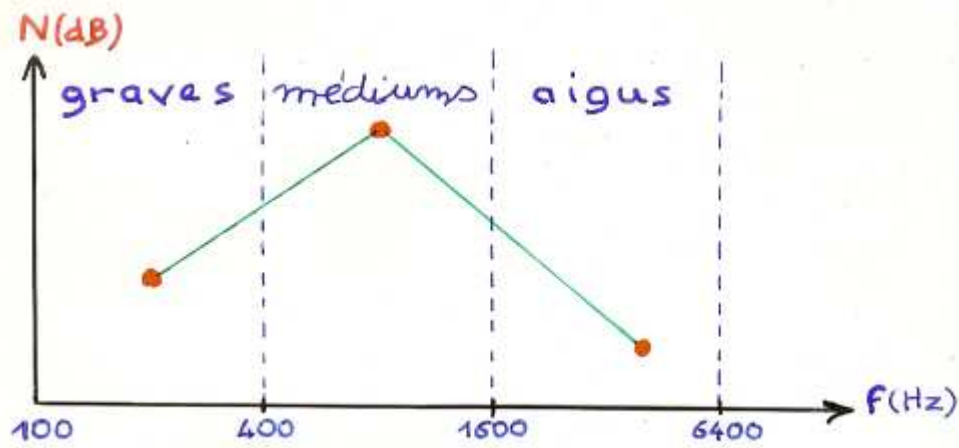
8. BRUIT**8A Définition**

Mélange de sons de fréquences différentes
et de niveaux d'intensité acoustiques différents
qui engendre une SENSATION AUDITIVE DESAGREABLE

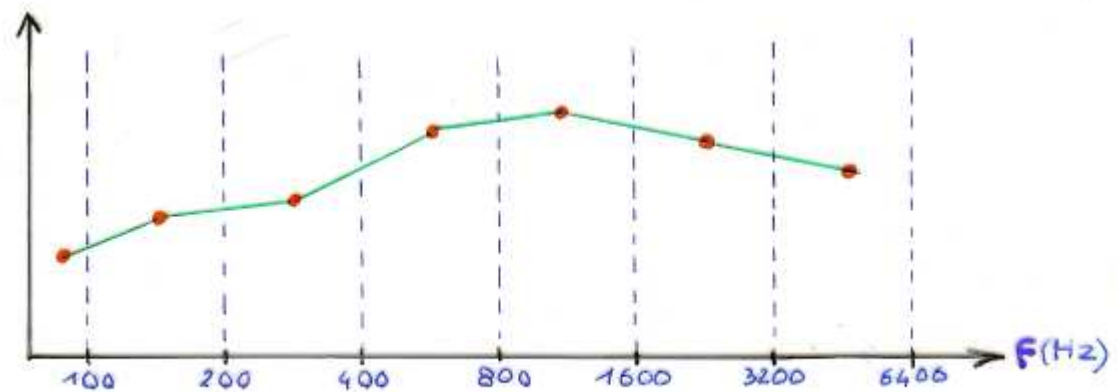
8B Analyse

La hauteur d'un bruit ne peut pas être définie par une seule fréquence, il faut l'analyser par bandes de fréquences avec un sonomètre ; l'analyse se traduit par une courbe :

<<spectre du bruit>>



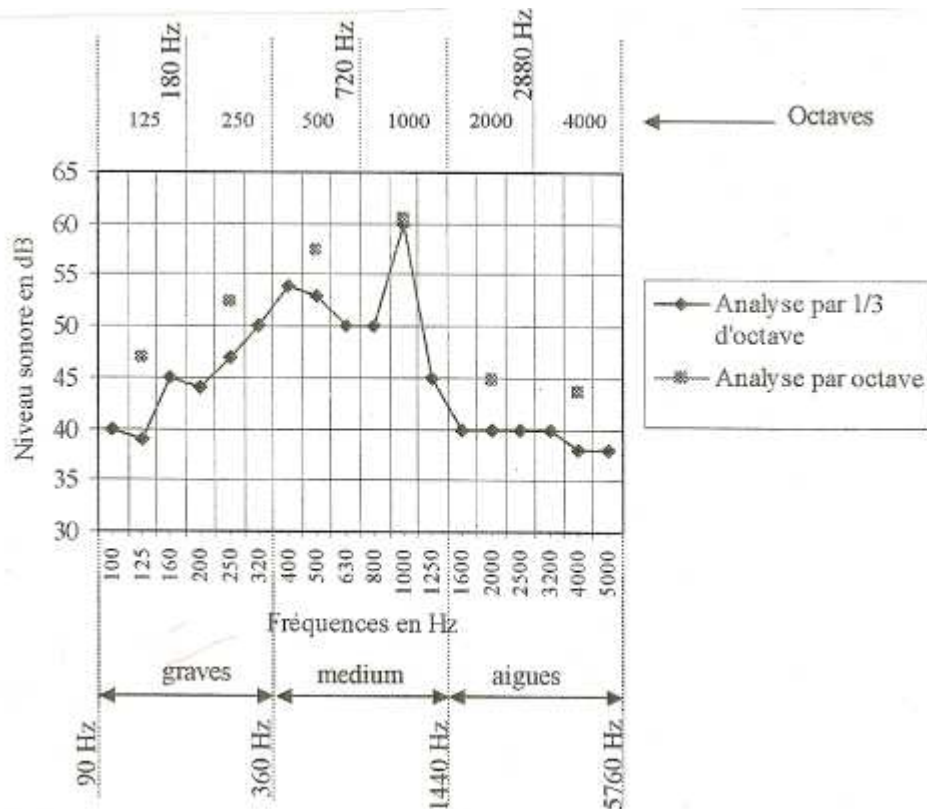
analyse sommaire



analyse par octave

Exercice 29 :

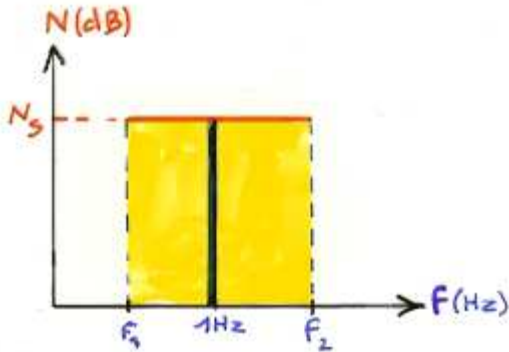
Calculer le niveau total du bruit, dont le spectre sonore est donné ci-dessous :



8c Niveau de bande

•Exercice 30 :

Calcul d'un niveau de bande dans le cas où chacune de ses fréquences a le même niveau N_s (niveau spectral élémentaire).



$$N_{\Delta f} = 10 \log \frac{I_{\Delta f}}{I_0} ; I_{\Delta f} = I_s \cdot \Delta f ; \Delta f = f_2 - f_1$$

$I_{\Delta f}$: intensité sonore de la bande

$I_s = I_0 \cdot 10^{0,1 \cdot N_s}$: intensité sonore spectrale pour chaque fréquence

$$N_{\Delta f} = 10 \log \frac{I_s \cdot \Delta f}{I_0} = 10 \log \frac{I_s}{I_0} + 10 \log \Delta f$$

$$N_{\Delta f} = N_s + 10 \log(f_2 - f_1)$$

Application :

Soit l'octave centrée sur la fréquence $f_0 = 1000$ Hz.

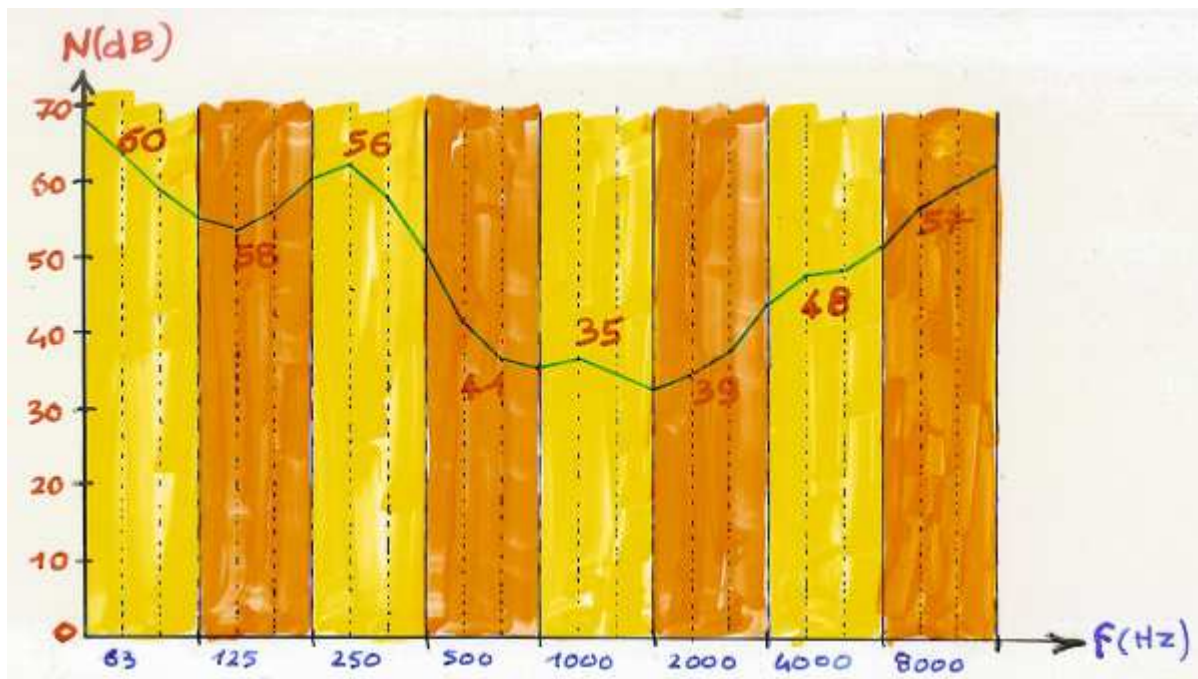
Chaque fréquence de l'octave a pour niveau spectral : 40 dB.

Calculer de trois façons différentes le niveau (total) de cette bande.

- 1) en considérant toute l'octave.
- 2) en faisant l'analyse par demi-octave, puis en calculant le niveau total.
- 3) en faisant l'analyse par tiers d'octave, puis en calculant le niveau total.

Exercice 31 : Dans un atelier le spectre du bruit, et le niveau sonore dans chaque bande d'octave (chaque octave étant repérée par sa fréquence centrale f_0) sont donnés par un tableau ou un graphe :

- 1) Calculer le niveau d'intensité du bruit résultant...en dB.
- 2) Calculer le niveau d'intensité du bruit résultant...en dB(A).



fréquence centrale f_0 (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
niveau d'intensité (dB)	60	58	56	41	35	39	48	57
pondération (dBA)	-28	-16	-9	-3	0	+1	+1	-3

Exercice 32 : Le casque antibruit.

Un générateur de bruit fournit une puissance acoustique **uniformément répartie** ; la même puissance acoustique $P_{a1} = 1.10^{-3} \text{ W}$ est émise dans chacune des 8 bandes d'octave.

Ce générateur de bruit (*considéré comme source sonore ponctuelle S*), émet de façon omnidirectionnelle. On l'utilise en champ libre (aucune réverbération).

On considère un point M situé à $d = 2 \text{ m}$ de S.

- 1) Calculer pour cette source la puissance acoustique globale P_a délivrée, puis le niveau L_w de puissance acoustique.
- 2) Déterminer le niveau d'intensité acoustique au point M.

Une personne, au point M, est munie d'un casque antibruit, dont l'**atténuation** dépend des fréquences :

bande numéro :	1	2	3	4	5	6	7	8
fréquence centrale f_0 (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
niveau acoustique <i>non atténué</i> (dB)	73	73	73	73	73	73	73	73
atténuation moyenne (dB)	12	14	18	23	36	31	35	34
niveau acoustique atténué (dB)								

- 3) a- A partir du tableau retrouver le résultat de la question 2).
- b- Compléter le tableau.
- c- Calculer le niveau d'intensité atténué total au point M.
- d- Pour le bruit étudié, quelle **atténuation globale** (en dB) apporte ce casque ?

En réalité il faut tenir compte aussi de la **pondération** :

- 4) Sachant que celle-ci est d'environ : -28, -16, -9, -3, 0, +1, +1 et -3...dB(A) respectivement pour les octaves de 1 à 8.
 - a- En déduire le niveau acoustique atténué pondéré pour chaque octave.
 - b- Calculer le niveau acoustique total au point M.
- Comparer ce résultat à celui obtenu à 3) c.

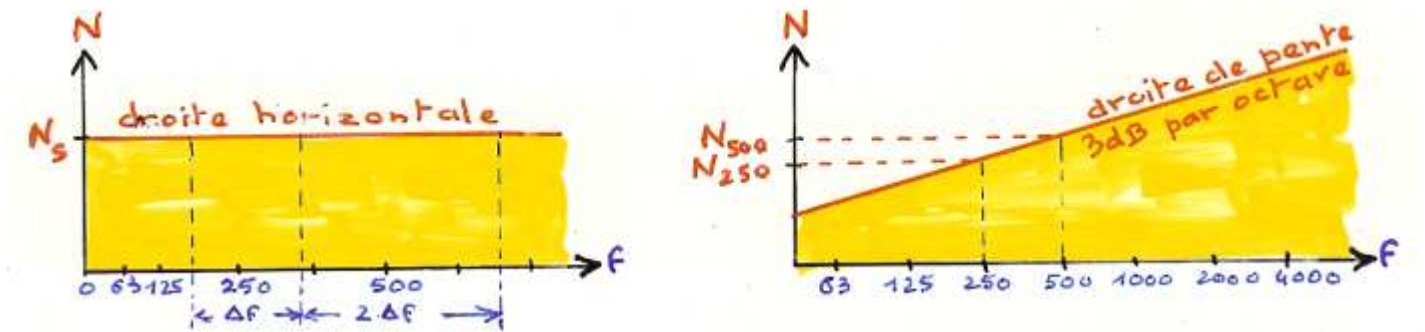
8_D Bruits normalisés

Il existe des **BRUITS NORMALISÉS** qui modélisent des situations concrètes :

- le trafic routier
- le **bâtiment**
- ...

8_D1 bruit blanc

Il simule le sifflement (*uniforme*)



Chaque bande d'octave ayant une largeur double de la précédente contient deux fois plus d'énergie :

$$\begin{aligned}
 N_{\Delta f} &= N_s + 10 \log \Delta f \\
 N_{2\Delta f} &= N_s + 10 \log 2 \cdot \Delta f = N_s + 10 \log \Delta f + 10 \log 2 \\
 N_{2\Delta f} &= N_{\Delta f} + 3 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

8_{D2} bruit rose

Il simule les bruits aériens, ceux émis à l'intérieur des bâtiments (*voix, musique...*) et ceux du trafic aérien. Chaque bande d'octave contient la même énergie.

8_{D3} bruit routier

Il simule les bruits émis par le trafic routier.

Il est plus riche en sons graves que le bruit rose et moins riche en sons aigus.

Correction à appliquer au bruit rose pour le transformer en bruit routier :

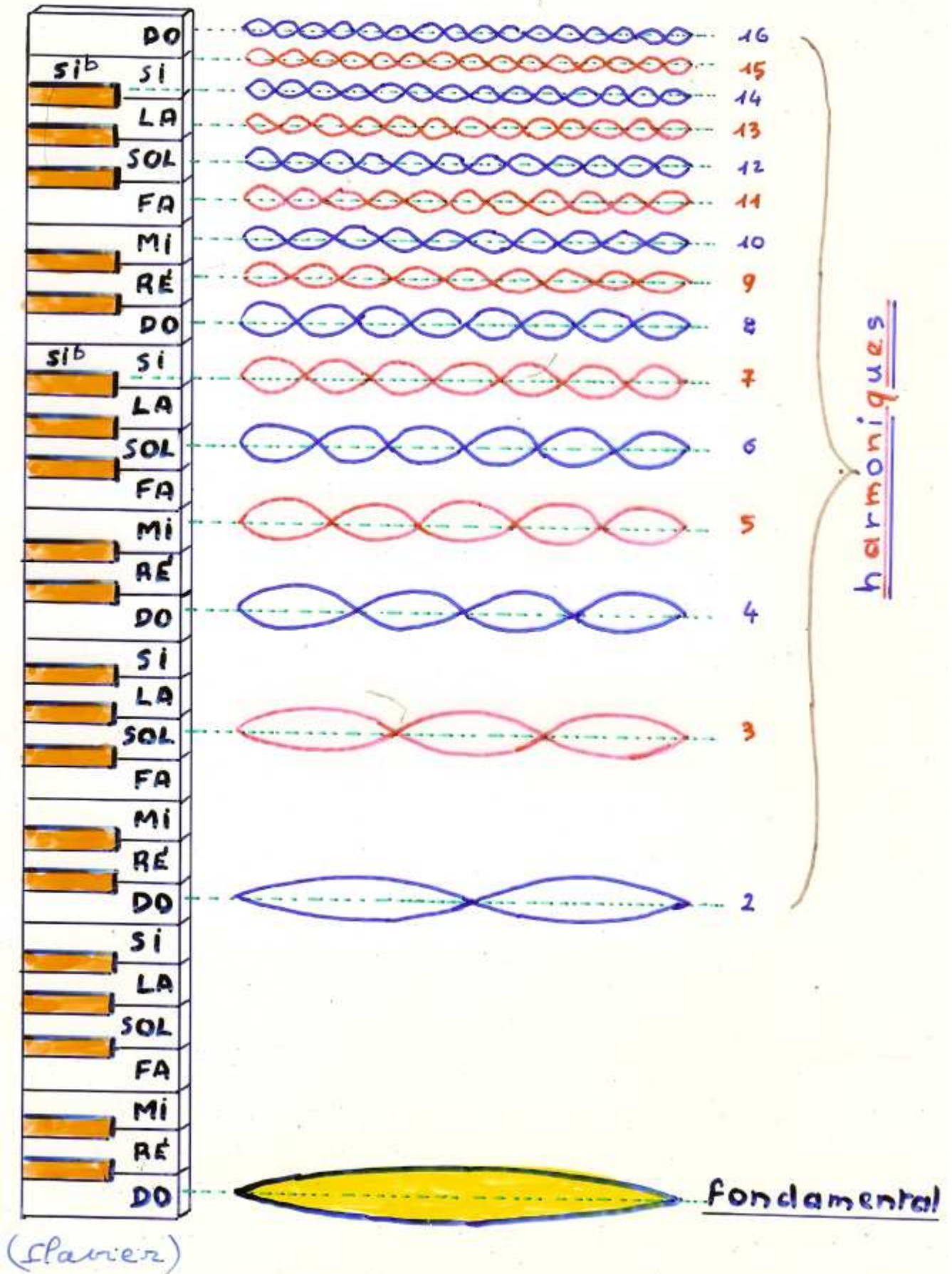
f_0 (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
correction (dBA)	+6	+5	+1	0	-2	-8

Exercice 33 : Compléter le tableau pour chaque bande d'octave.

fréquence centrale (Hz)			500			
bruit blanc (dB)					72	
bruit rose (dB)				69		

9. ACOUSTIQUE MUSICALE

9A Piano



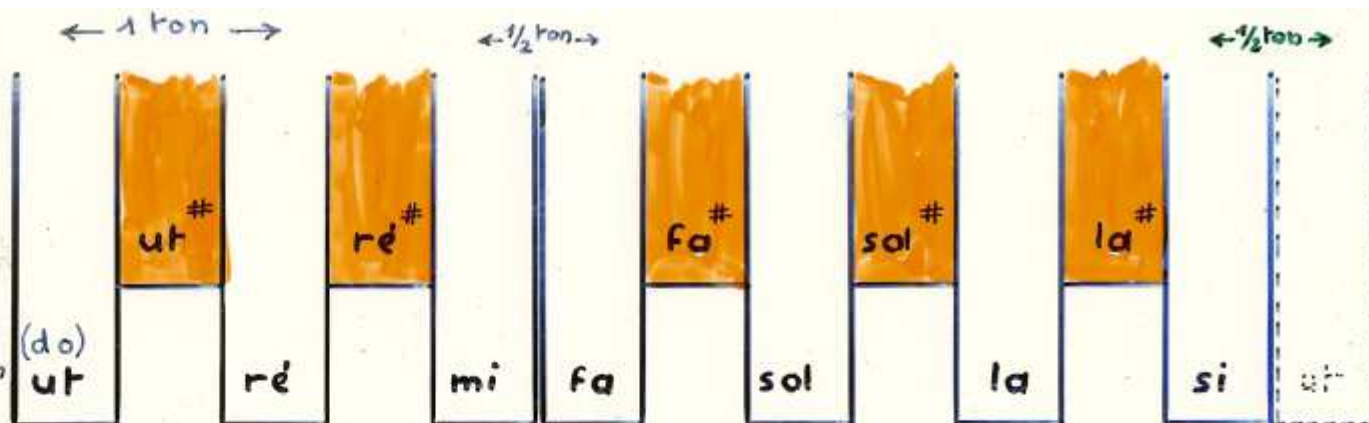
FRÉQUENCES des NOTES

gamme
tempérée

(ou de Bach)

Jean-Sébastien
(1685-1750)

- compositeur
allemand -



OCTAVES

$F \times 2$ ↑

7	2092,8	2217,6	2348,8	2489,6	2636,8	2793,6	2960	3136	3321,6	3520	3728	3950
6	1046,4	1108,8	1174,4	1244,8	1318,4	1396,8	1480	1568	1660,8	1760	1864	1975
5	523,2	554,4	587,2	622,4	659,2	698,4	740	784	830,4	880	932	988
4	261,6	277,2	293,6	311,2	329,6	349,2	370	392	415,2	440	466	494
3	130,8	138,6	146,8	155,6	164,8	174,6	185	196	207,6	220	233	247
2	65,4	69,3	73,4	77,8	82,4	87,3	92,5	98	103,8	110	116,5	123,5
1	32,7	34,65	36,7	38,9	41,2	43,65	46,25	49	51,9	55	58,25	61,75

diéser une note c'est multiplier sa fréquence
par $2^{1/12}$ - bémoliser c'est diviser par $2^{1/12}$.

$f(\text{sol b}) < f(\text{fa}^\#)$ très légèrement, alors Bach
tempéra la gamme en prenant $f(\text{sol b}) = f(\text{fa}^\#)$.

DEMI - TONS

$$F \times 2^{1/12}$$

$$\left(2^{1/12} = \sqrt[12]{2} = 1,059\right)$$

9B Gamme tempérée (ou chromatique)

Elle comporte **12 notes** séparées d'un demi-ton.

L'octave est divisée en 12 demi-tons équidistants.

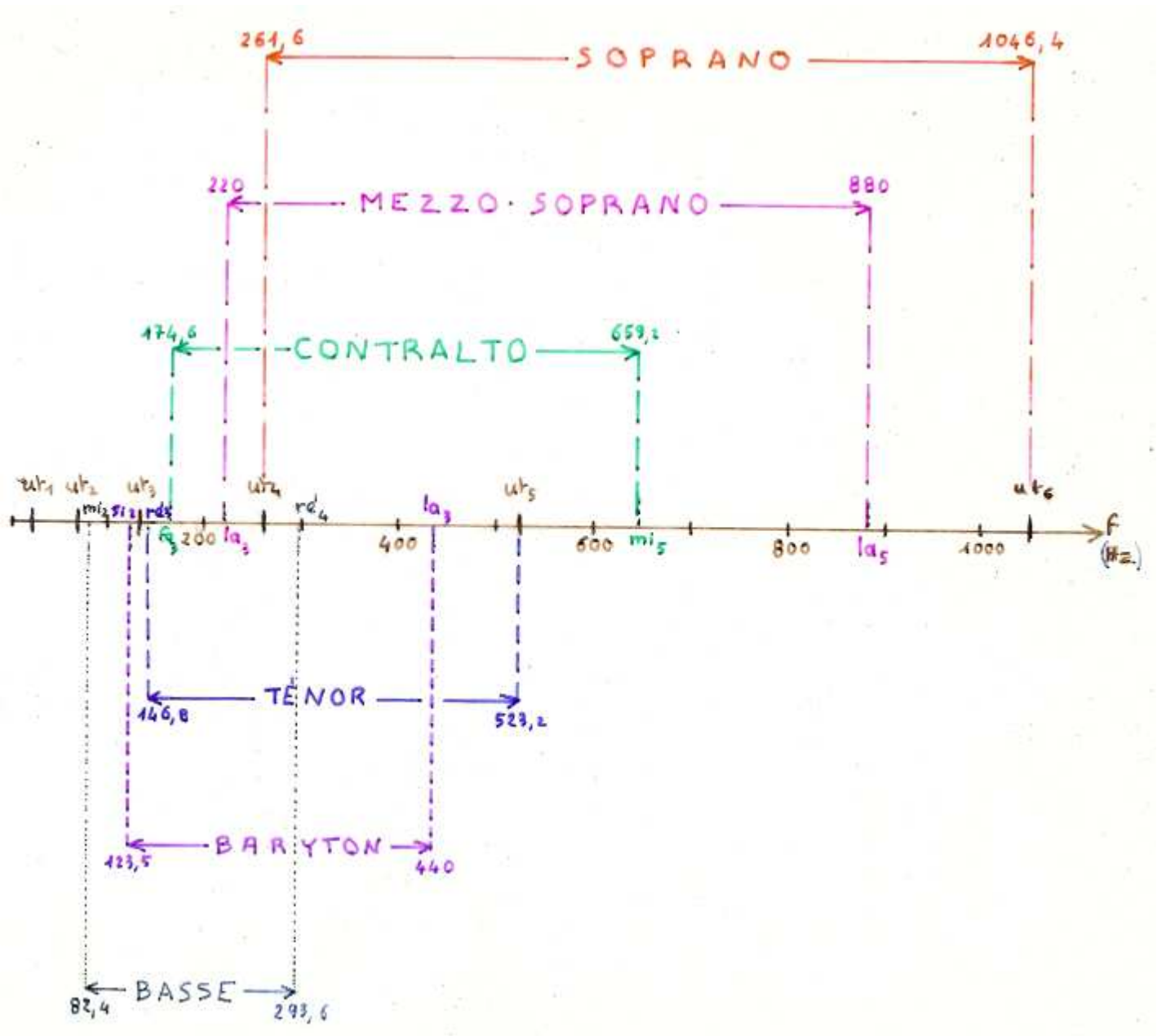
L'intervalle entre deux notes successives est $i = \frac{f_2}{f_1} = \sqrt[12]{2} \approx 1,06$.

Convention internationale : fréquence du **la₄ = 440 Hz**, ce qui impose toutes les autres notes de la gamme.

C'est sur ce principe de la gamme tempérée que sont construits : pianos, orgues,...

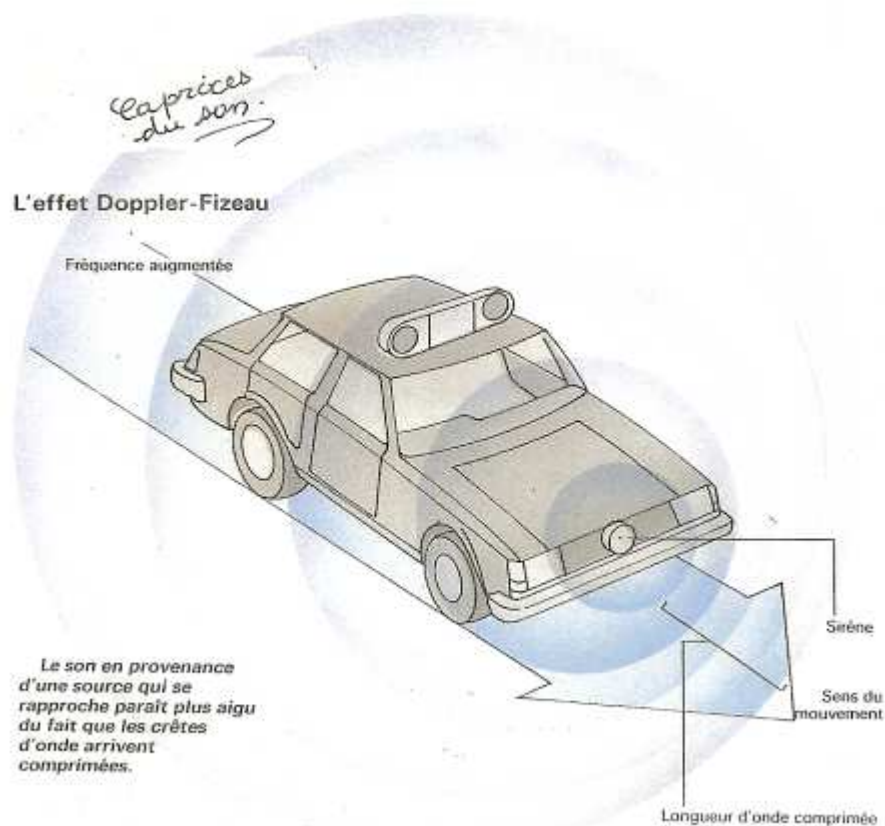
(en réalité f (fa# légèrement supérieure à f(sol b))).

9C La voix humaine



10. Les CAPRICES du SON

10A Doppler-Fizeau



Phénomène ondulatoire familier.

Exemple :

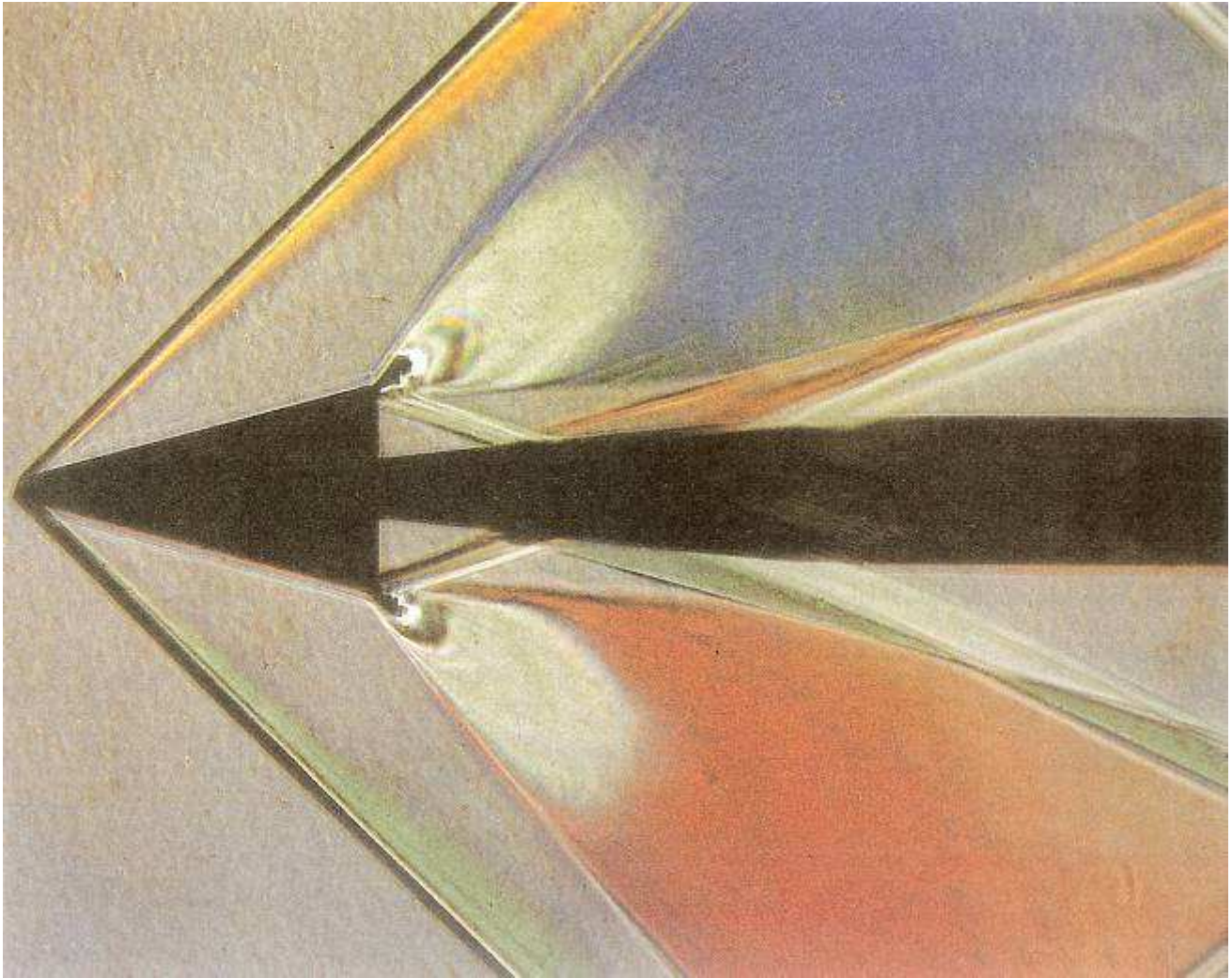
Variation de la hauteur du son au passage d'une sirène au passage d'un camion de pompiers.

Tant que la source du son se rapproche de l'observateur, chaque compression est émise plus près que la précédente.

En conséquence, l'onde qui atteint l'observateur est elle-même comprimée, sa fréquence semblant plus élevée au fur et à mesure que la source se rapproche.

Le phénomène s'inverse dès que l'observateur est dépassé, et la hauteur du son diminue.

10_B « Boom » supersonique



La source du son se déplace plus vite que le son qu'elle produit.

Exemple

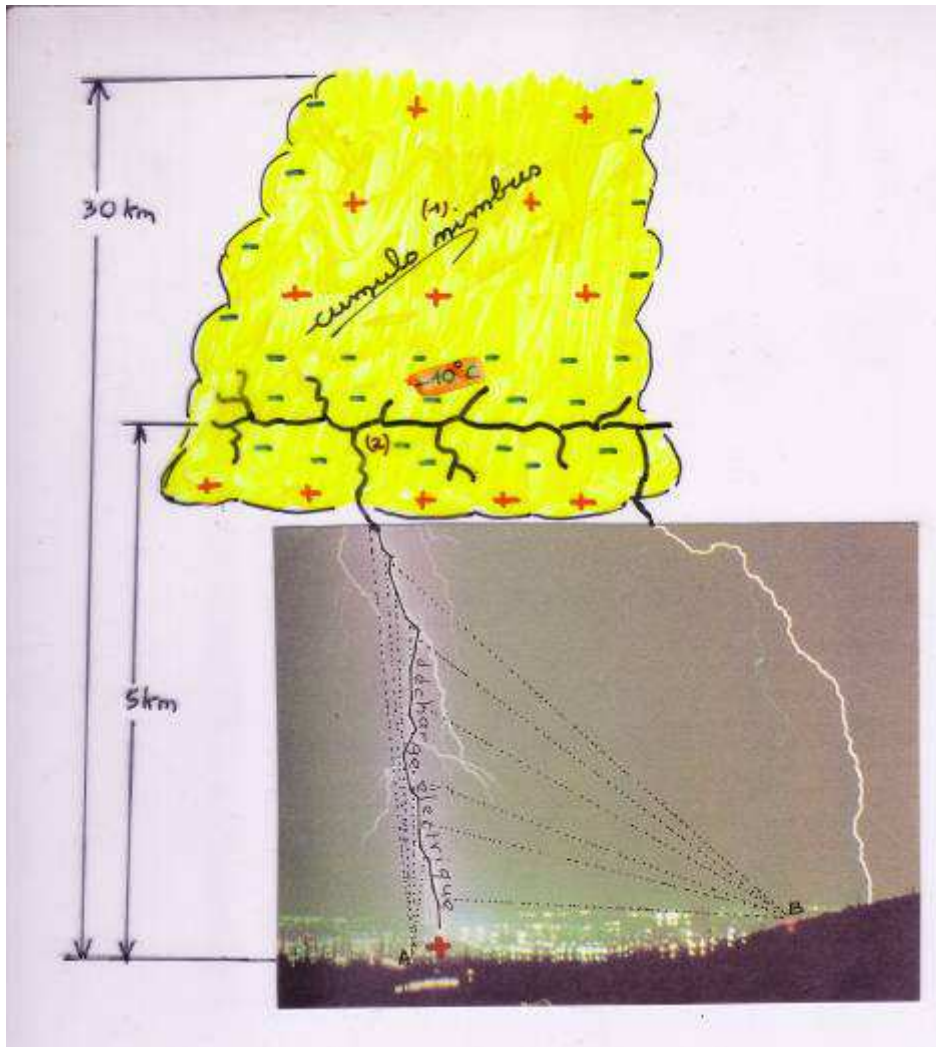
Les avions supersoniques, dont la vitesse de pointe dépasse celle du son.

Les compressions successives atteignent l'observateur quasiment en même temps et s'additionnent pour produire un bruit d'explosion.

Ce « boom » se produit de façon continue, et se déplace dans le sillage de la source sonore, tant que celle-ci se déplace plus vite que le son.

10c TONNERRE et foudre

Bruit impressionnant et intense entre tous.
Effet secondaire de la foudre.



Au centre du cumulo nimbus (1), les paillettes de glace sont stables. Globalement, la charge est neutre.

Dans la zone (2), la température est de -10°C .

Les gouttelettes d'eau, en gelant, libèrent des électrons qui forment la charge négative, **source** de la **foudre**.

Il existe une très grande différence de potentiel (*plusieurs millions de volts*) entre le sol et le nuage.

Au moment de la décharge électrique (*déplacement de charges électriques*), le courant qui passe entre le nuage et le sol chauffe l'air qui se comporte comme un filament de lampe à incandescence.

Dans le canal de l'éclair, la température et la pression atteignent des valeurs extrêmement élevées : 30000°C et jusqu'à 100 atmosphères.

Par échauffement, il y a compression des couches d'air.

Il y a alors production d'une onde de choc qui se transforme, en partie, en onde sonore.

En fait, chacun des **traits** constituant l'éclair – il y en a de toutes les longueurs, mais l'essentiel du bruit est créé par la formation des traits de 5 à 100 m de long – peut être considéré comme un **générateur sonore**.

Placé en A, un observateur reçoit successivement des ondes sonores dont les trajets sont d'inégaux longueurs, il entend un **roulement**.

Placé en B, un observateur reçoit les sons émis par chaque trait au même instant (les longueurs des trajets sont sensiblement égales), il perçoit un **claquement sec** et **violent**.

Quand au **grondement** que l'on entend loin de l'orage, il est le résultat de multiples réflexions du son sur le relief environnant.

Pour savoir à quelle distance (en km) se trouve l'orage, il suffit de compter le nombre de secondes séparant l'éclair du tonnerre et de diviser par trois (*vitesse du son* : $v \approx 330 \text{ m.s}^{-1}$).

Pour que la foudre puisse tomber, il faut qu'au préalable une petite décharge (« *traceur par bonds* ») de faible intensité ait pu tracer, en quelque sorte, le chemin que l'éclair principal empruntera.

Le canal conducteur ainsi créé va permettre le passage d'un courant extrêmement intense (100000 A).

Quand la foudre tombe, c'est plusieurs billions de watts qui sont libérés en une fraction de seconde.

C'est une puissance colossale aux effets souvent ravageurs.

Parfois la foudre se met « en boule » : ce serait, en fait, un plasma, c'est-à-dire un gaz complètement ionisé formé d'électrons négatifs et d'ions positifs.

Protection :

- se coucher sur le sol
- s'abriter dans une voiture
- utiliser un paratonnerre (*cable de cuivre*) : il capte le « feu du ciel ».

Il fût inventé par Benjamin Franklin (1706 – 1790), savant et homme politique américain.



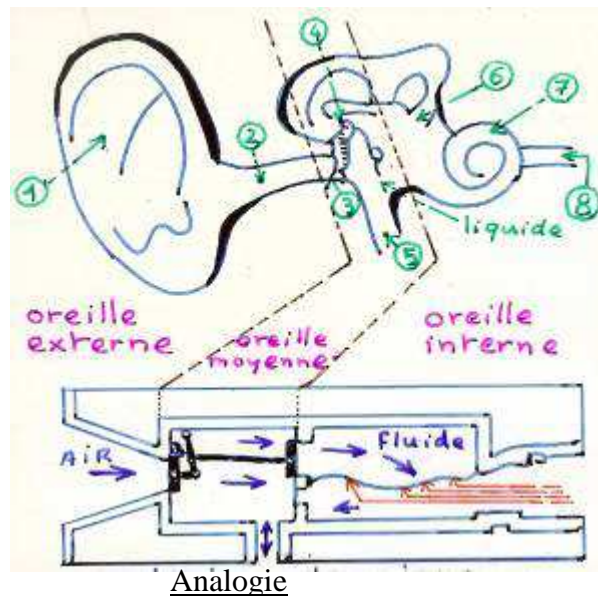
11. L'OREILLE et l'OUÏE

11A Description et fonctionnement

Les sons se propagent aussi dans l'os crânien (os du rocher).

Son : sensation sonore engendrée par une onde acoustique.

Bruit : mélange de sons, « tout phénomène indésirable »



1. Pavillon

2. Conduit auditif externe

3. Tympan

Les vibrations de l'air lui appliquent une suite de surpressions et de dépressions, par rapport à la pression atmosphérique qui correspond à l'état d'équilibre du tympan.

C'est une membrane circulaire non tendue qui subit une série de déformations.

Ces déformations sont transmises à l'appareil où elles sont recueillies, élaborées, transformées en signaux sensoriels.

4. Chaîne des osselets (marteau soudé au tympan, enclume et étrier)

Système amplificateur de transmission solide.

Il amplifie de cinquante à soixante fois.

Il est maintenu par des ligaments et des muscles.

Ces derniers ont la propriété de se contracter d'une manière réflexe sous l'influence de bruits intenses et protègent l'oreille, principalement aux basses et hautes fréquences.

Le temps de réponse de ces muscles n'est pas nul, les sons brusquement intenses sont donc les plus dangereux pour l'oreille.

5. Trompe d'Eustache

Conduit permettant l'équilibre des pressions de part et d'autre du tympan.

Elle fait communiquer l'oreille moyenne avec l'arrière gorge.

6. Vestibule

Partie réceptrice de l'appareil d'équilibration.

7. Organe de Corti

Dans le limaçon, il recueille les signaux.

Les cellules nerveuses excitées transforment l'onde sonore en énergie nerveuse (électrique).

Cette dernière est transmise à l'écorce cérébrale par le **nerf auditif**.

8. Nerf auditif

Il transforme cette énergie en sensation consciente.

11_B Action du bruit sur le système nerveux

Si un silence excessif peut paraître insolite à l'homme, l'excès de bruit finit par déséquilibrer son système nerveux.

- Le repos et le sommeil ne sont possibles que dans le calme.
- L'effet nocif du bruit se manifeste par des troubles de mémoire et des troubles de l'activité mentale, mais aussi par l'apparition de malaises, de contrariétés,...
 - Le rythme cardiaque se modifie sous l'influence du bruit.
- Les erreurs de fabrication, les accidents du travail, augmentent dans l'industrie avec l'intensité sonore.
- La conversation entre deux personnes devient difficile, pénible et épuisante dans un milieu bruyant.
- Les sons aigus (*enfants, sifflets, avertisseurs sonores*,...) perturbent l'attention et gênent la concentration de l'esprit.
 - Le bruit devient chez certains une habitude, un besoin, une drogue.
 - Les ultrasons ($f > 16000$ Hz) provoquent des troubles physiques.
 - Les infrasons ($f < 20$ Hz) causent : fatigue, oppression, nausées,...