



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider-Biskra Faculté des Sciences et de la technologie Département : Architecture

Année universitaire : 2019—2020

1^{ère} année master : Architecture

Matière : **Equipement II Acoustique du bâtiment**

Enseignant : **Dr MEZERDI Toufik**

CHAPITRE 2 : CARECTERISATION PHYSIQUE ET PHYSIOLOGIQUE DES SONS ET DES BRUITS

Cour N°04 : Caractérisation énergétique des sons et des bruits

Cour N°04 Caractérisation énergétique des sons et des bruits





Cour N° 04

Plan du cours

1- Caractérisation énergétique des sons et des bruits

1-1 Puissance et niveau de puissance acoustique = Energie

1-1-1 Puissance acoustique

1-1-2 Niveau de puissance acoustique

1-1-3 Calcul du niveau de puissance acoustique

1-2 Pression et niveau de pression acoustique

1-2-1 Pression acoustique

1-2-2 Niveau de pression acoustique (ou SPL (Sound Pressure Level))

1-2-3 Calcul du niveau de pression acoustique

1-3 Intensité et niveau d'intensité acoustique

1-3-1 Intensité acoustique (Energie par S)

1-3-2 Niveau d'intensité acoustique (SIL (Sound Intensity Level))

1-3-3 Schéma de synthèse)

1-4 Le décibel et l'oreille humaine



1-5 Addition de niveaux des décibels

1-5-1 Deux niveaux sonores égaux :

1-5-2 Plusieurs sources de même niveau acoustique

1-5-3 Deux niveaux sonores différents :

1-5-4 Plusieurs sources sonores de niveaux acoustiques différents

1-6 Perception du son

1-6-1 La relation entre le niveau sonore et sensation auditif

1-6-2 La variation de la sensibilité de l'oreille selon la fréquence du son

1-6-3 Les courbes isosoniques

1-6-4 Les décibels pondérés

1-6-4-1 Exemple de pondération A

1-6-5 Le sonomètre

1-6-5-1 Comment fonctionne un sonomètre



1- Caractérisation énergétique des sons et des bruits

1-1 Puissance et niveau de puissance acoustique = Energie

1-1-1 Puissance acoustique

La puissance est une quantité d'énergie émise pendant un certain temps. Une source sonore diffuse de l'énergie acoustique. En général, l'énergie désigne tout ce qui permet d'effectuer un travail, fabriquer de la chaleur, de la lumière ou un mouvement. L'énergie se mesure en Joules (J). L'énergie acoustique correspond aux mouvements des molécules d'air propageant l'onde acoustique. Si une source acoustique émet un son d'énergie égale à E Joules pendant un intervalle de temps Δt secondes, alors on définit la puissance acoustique **P** de la source comme :

$$P = E/\Delta t$$

La puissance acoustique se mesure en Watts (W). Par exemple, si une source sonore émet un son d'énergie égale à 30 Joules pendant 5 secondes, sa puissance acoustique sera de 6 Watts.

La puissance acoustique est une donnée propre à une source : elle ne dépend pas de la distance à la source. Lorsque plusieurs sources émettent simultanément un signal sonore, ce sont leurs énergies, et donc leurs puissances qui s'additionnent.



Exemples Le tableau ci contre présente la puissance acoustique de quelques sources sonores. On peut voir que la puissance acoustique des sources les plus classiques est très faible.

Source	Puissance acoustique
Voix normale	0,01 mW = 0,00001 W = 1.10^{-5} W
Voix forte	0,1 mW = 0,0001 W = 1.10^{-4} W
Voix criée	1 mW = 0,001 W = 1.10^{-3} W
Haut-parleur	1 W
Avion	1 kW = 1000 W = 1.10^3 W

Puissance acoustique de quelques sources [1]

1-1-2 Niveau de puissance acoustique

on utilisera la notion plus pratique de **niveau de puissance acoustique L_w** :

$$L_w = 10 \log[W/W_0]$$

où,

• w = puissance acoustique de la source en Watt (W)

• w_0 = puissance acoustique de référence = 10^{-12} W

L_w est également exprimé en décibels (dB).

(Attention aux confusions avec le niveau sonore L_p !) Le niveau de puissance acoustique est une valeur caractéristique de sources sonores (machines, haut-parleurs, ...), alors que le niveau sonore en un lieu dépendra de l'éloignement de la source sonore, des caractéristiques de réverbération de la pièce, la tableau 01 donne quelque exemples



1-1-3 Calcul du niveau de puissance acoustique [2]

Le niveau de puissance acoustique, ou L_w , est calculé à l'aide de la formule :

$$L_w = 10 \log (\text{niveau de puissance acoustique/niveau de puissance de référence})$$

La puissance de référence est un billionième de watt $10^{-12} \text{ W} = (0,000000000001 \text{ W})$. Par conséquent,

$L_w = 10 \log (\text{niveau de puissance acoustique}/0,000000000001)$ Ainsi, le niveau de puissance acoustique d'un chuchotement normal, dont la puissance acoustique est de $0,0000001 (10^{-5} \text{ W})$, est calculé de la façon suivante :

$$L_w = 10 \log (0,0000001/0,00000000000001) = 50 \text{ dB (Tab 01)}$$

1-2 Pression et niveau de pression acoustique

1-2-1 Pression acoustique

Quand on appuie sa main contre un mur, on exerce une "pression" sur ce mur. En fait, la pression résulte d'une force F appliquée sur une surface S . La valeur de la pression est alors définie comme :

$$P = F/S$$



La pression se mesure en Pascal (Pa).

En acoustique, on distingue deux pressions particulières : La pression atmosphérique (aussi appelée pression statique) : c'est la pression qu'exerce l'atmosphère (toutes les molécules d'air) sur la Terre. Elle a une valeur qui varie en fonction des conditions climatiques mais elle vaut en moyenne :

$$P_0 = 1,013.105 \text{ Pa} \approx 105 \text{ Pa}$$

La pression acoustique (aussi appelée surpression acoustique). Lors de la propagation d'une onde acoustique, les molécules d'air en mouvement modifient légèrement la pression localement. Cette variation de pression est ce que l'on appelle la pression acoustique p. Ainsi, en un point de l'espace, la pression totale :

$$P_{tot} = P_0 + p$$

COMPARAISON DU NIVEAU DE PUISSANCE ACOUSTIQUE ET DE LA PUISSANCE ACOUSTIQUE		
	Niveau de puissance acoustique (dB)	Puissance acoustique (W)
Turboréacteur	170	100,000
	160	10,000
	150	1000
	140	100
	130	10
Compresseur	120	1
	110	10 ⁻¹
	100	10 ⁻²
	90	10 ⁻³
	80	10 ⁻⁴
Conversation	70	10 ⁻⁵
	60	10 ⁻⁶
	50	10 ⁻⁷
	40	10 ⁻⁸
	30	10 ⁻⁹
	20	10 ⁻¹⁰
	10	10 ⁻¹¹
	0	10 ⁻¹²

Tab 01: Puissance et niveau de puissance acoustique de quelque sources (Source: https://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/noise_basic.html)



Cette pression acoustique exerce une force sur le tympan. Elle met en vibration le tympan qui transmet les ondes au cerveau via les mécanismes de l'oreille moyenne et de l'oreille interne .

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

L'oreille est un organe extrêmement sensible , perçoit des pressions acoustiques variant de $2 \cdot 10^{-5}$ PA à 20 PA

Le seuil d'audition correspond au son le plus faible (en intensité) que l'oreille est capable de percevoir. La pression acoustique correspondante vaut à 1000 Hz :

Cette pression est appelée pression de référence

$$p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} Pa.$$

Le seuil de douleur correspond à la pression acoustique d'intensité maximale que l'oreille peut supporter sans être endommagée

$$p_{douleur} = 20 Pa.$$



1-2-2 Niveau de pression acoustique (ou SPL (Sound Pressure Level))

les acousticiens caractérisent la pression acoustique par un niveau sonore, le niveau de pression efficace (SPL en anglais pour Sound Pressure Level) et s'exprimant en deciBel (dB). Ce niveau de pression est la valeur en dB de la pression efficace par rapport à une pression de référence [2] p_{ref} qui est prise généralement égale à 2×10^{-5} Pa pour l'air et 10^{-6} Pa pour l'eau [3]

Le niveau de puissance acoustique L_p :

$$L_p = 10 \log [p^2/p_0^2] = 20 \log [p/p_0]$$

où,

• p = pression acoustique efficace en Watt (W)

• p_0 = pression acoustique de référence (pression minimal audible pour un son pur de fréquence : 1000 Hz = 10^{-12} W)

L_p est également exprimé en décibels (dB).

1-2-3 Calcule du niveau de pression acoustique

Puisque la pression acoustique pour l'oreille humaine varie de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa à 20Pa, on trouve : (Tableau 02)

► Le niveau de pression acoustique du seuil d'audibilité est :

$$= 20 \log \frac{2 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-5}} = 0 \text{ dB}$$

► Le niveau de pression acoustique correspond au seuil de douleur est :

$$= 20 \log \frac{20}{2 \cdot 10^{-5}} = 120 \text{ dB}$$



1-3 Intensité et niveau d'intensité acoustique

1-3-1 Intensité acoustique (Energie par S)

L'intensité est un flux d'énergie transportée par unité de surface. L'intensité acoustique, ou intensité sonore, correspond donc à une quantité d'énergie acoustique E (en Joules) qui traverse une surface (réelle ou virtuelle) S (en m²) pendant un temps Δt (en secondes). Elle se définit comme :

$$I = E/S\Delta t$$

avec S en m² L'intensité acoustique se mesure en W/m²

Relation avec la puissance

On a vu que la puissance acoustique se définissait comme P = E/Δt . On voit donc que l'intensité acoustique se définit comme une puissance acoustique sur une surface, soit : I = P/S , avec P en W et S en m²

COMPARAISON DE LA PRESSION ACOUSTIQUE ET DU NIVEAU DE PRESSION ACOUSTIQUE		
Pression acoustique (Pa)		Niveau de pression acoustique (dB)
20	120	
10	110	Marteau pneumatique (à 5 pi)
5	100	Machine de fabrication de textiles Rotative
2	90	Camion diesel roulant à 40 mi/h (à 50 pi)
1	80	
0,5	70	Automobile roulant à 50 mi/h (à 50 pi)
0,2	60	Conversation (à 3 pi)
0,1	50	
0,05	40	Pièce silencieuse
0,02	30	
0,01	20	
0,005	10	
0,002	0	
0,001		
0,0005		
0,0002		
0,0001		
0,00005		
0,00002		

Tab 02: Pression et niveau de pression acoustique de quelque sources (Source: https://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/noise_basic.html)



Une source isotrope, ou homogène, est une source qui rayonne dans tout l'espace. Cette source émet des ondes sphériques, donc les fronts d'onde sont des sphères. La surface d'une sphère vaut $S = 4\pi r^2$ avec r le rayon de la sphère. L'intensité reçue sur un front d'onde vaudra donc : $I = P/4\pi r^2$ avec P la puissance acoustique de la source. Ainsi, une source isotrope de puissance P émettra des sons dont l'intensité sonore variera en fonction de la distance d à la source par la relation :

$$Intensité = \frac{Puissance}{4\pi d^2}$$

Relation avec la pression L'intensité et la pression acoustique sont reliées par la relation suivante :

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c}$$

avec c la célérité du son et ρ_0 la masse volumique du milieu.

Remarque : Cette relation n'est valable que pour le son direct provenant d'une source acoustique et non pour le son réfléchi ou réverbéré dans une salle.

Dans l'air, $\rho_0 \simeq 1,2 \text{ kg/m}^3$ et $c = 340 \text{ m/s}$, d'où :

$$I = \frac{p^2}{400} \text{ en } W/m^2 \text{ avec } p \text{ en Pa.}$$

Ainsi, le **seuil d'audition** correspond à une intensité sonore de :

$$I_{ref} = 10^{-12} W/m^2$$



Elle est appelée **intensité de référence** et correspond à la pression de référence $p_{ref} = 2.10^{-5} Pa$.

Et le **seuil de douleur** correspond à une intensité sonore de :

$$I_{douleur} = 1W/m^2$$

(correspondant à la pression $p_{douleur} = 20Pa$).

1-3-2 Niveau d'intensité acoustique (SIL (Sound Intensity Level)

Sensation de niveau sonore Comme on l'a vu précédemment, si l'on compare le son émis par une source sonore (par exemple une goutte d'eau) au son émis par 1000 sources identiques, on se rend compte que le niveau sonore ressenti n'est pas 1000 fois plus fort. L'oreille fonctionne comme **une échelle logarithmique** : le niveau sonore n'est pas directement proportionnel à la pression acoustique

Niveau de pression Le niveau de pression (ou niveau sonore) est défini comme : $L_p = 20 \log\left\{\frac{p}{p_{ref}}\right\} = 20 \log\left\{\frac{p}{2.10^{-5}}\right\}$ (avec p en Pa).

Ce niveau (Level en anglais) se mesure en décibel (dB) ou dB SPL (Sound Pressure Level).

Niveau d'intensité Le niveau sonore peut aussi se calculer à partir du niveau d'intensité :

$$L_I = 10 \log\left\{\frac{I}{I_{ref}}\right\} = 10 \log\left\{\frac{I}{1.10^{-12}}\right\}$$
 (avec I en W/m^2).



Toujours dans le cas d'un son direct émis par une source, le niveau d'intensité et le niveau de pression mesurés en un point de l'espace (par exemple sur un microphone placé dans une salle) sont équivalents : $L_I = L_p$

• On notera donc dans la suite le niveau sonore L_p , qu'il soit calculé à partir du niveau d'intensité ou du niveau de pression

Démonstration : comme $I = \frac{p^2}{400}$, on a :

$$L_I = 10 \log \left\{ \frac{I}{I_{ref}} \right\} = 10 \log \left\{ \frac{\frac{p^2}{400}}{\frac{p_{ref}^2}{400}} \right\} = 10 \log \left\{ \frac{p^2}{p_{ref}^2} \right\} = 10 \log \left\{ \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^2 \right\} = 10 \times 2 \log \left\{ \frac{p}{p_{ref}} \right\} = 20 \log \left\{ \frac{p}{p_{ref}} \right\}$$

Ainsi, au seuil d'audition :

$$L_{Iref} = 10 \log \left\{ \frac{1.10^{-12}}{1.10^{-12}} \right\} = 10 \log(1) = 10 \times 0 = 0dB = L_{pref}$$

et au seuil de douleur,

$$L_{Idouleur} = 10 \log \left\{ \frac{1}{1.10^{-12}} \right\} = 10 \log \{1.10^{12}\} = 10 \times 12 = 120dB = L_{pdouleur}$$

Le niveau sonore est mesuré par un appareil nommé **sonomètre**.

Application : un sonomètre mesure le niveau sonore $L_1=40dB$, Calculer l'intensité sonore **I₁** Correspondante , puis

Calculer le niveau sonore L_2 correspondant à une intensité sonore **I₂** = $1,0 \times 10^{-5} Wm^{-2}$

Réponses

• $L_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0}$ soit $\frac{L_1}{10} = \log \frac{I_1}{I_0}$ d'où $10^{\frac{L_1}{10}} = \frac{I_1}{I_0}$. Ainsi: $I_1 = I_0 \times 10^{\frac{L_1}{10}} = 10^{-12} \times 10^{\frac{40}{10}} = 1,0 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2}$.

$$L_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \left(\frac{1,0 \times 10^{-5}}{10^{-12}} \right) = 10 \log (1,0 \times 10^7) = 70 \text{ dB.}$$

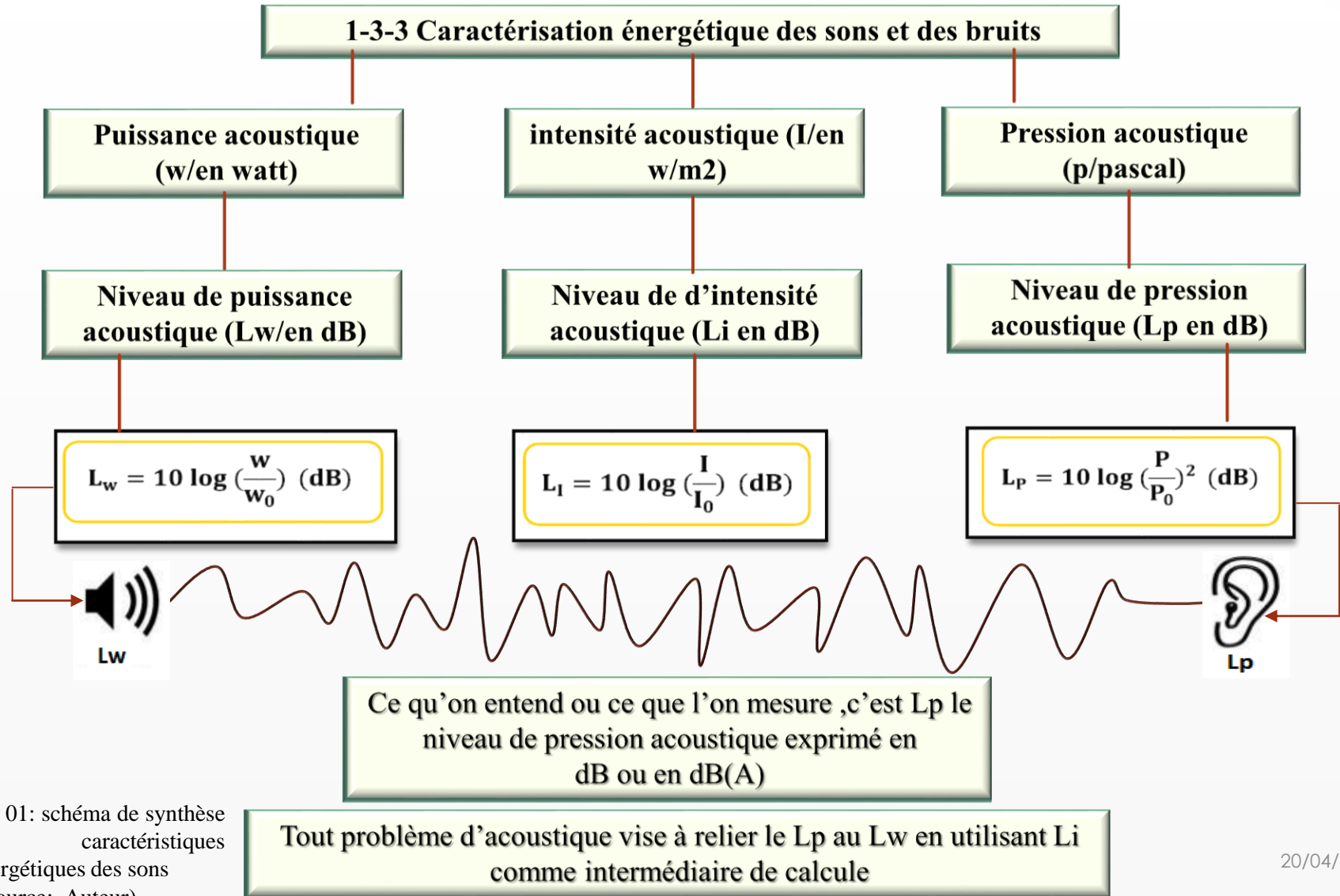


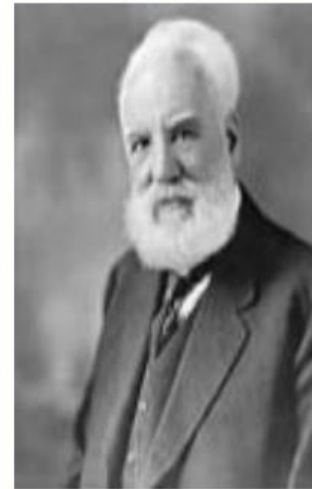
Fig 01: schéma de synthèse des caractéristiques énergétiques des sons (Source: Auteur)



1-4 Le décibel et l'oreille humaine

Si l'oreille humaine est capable de supporter des variations de pression allant de $20 \mu\text{Pa}$ à 20Pa , elle ne perçoit pas un doublement de pression acoustique comme un doublement de niveau de bruit. Pour faciliter la manipulation des valeurs caractérisant l'amplitude d'un bruit, cette large plage de pressions a été

transposée en utilisant une fonction logarithmique qui a eu pour effet de « dilater » les valeurs les plus faibles et de « comprimer » les valeurs les plus élevées. Les résultats de cette fonction s'expriment en **décibel**. L'échelle ainsi obtenue s'échelonne entre 0 dB, seuil de perception ($20 \mu\text{Pa}$) et 120 dB, seuil de douleur (20 Pa) [4].



Alexandre Graham Bell
(1847-1922, inventeur américain d'origine anglaise)

L'unité retenue pour le *niveau sonore* est le *décibel (dB)*, sous multiple du bel, ainsi nommé en l'honneur du physicien Alexandre Graham Bell. Cette unité présente l'avantage de bien se calquer sur la sensibilité différentielle de l'ouïe, puisqu'un écart de 1 décibel entre deux niveaux de bruit correspond sensiblement à la plus petite différence de niveau sonore décelable par l'oreille humaine.



Démontrée précédemment, l'échelle de Décibels commence au seuil d'audibilité soit 0 dB et se termine au-delà de la limite supportable pour l'homme soit 120 dB. Cela n'exclut pas l'existence d'ondes de niveau sonore inférieur à 0 dB dont les vibrations ne sont pas significatives pour le tympan. Entre ces deux valeurs, il existe un nombre incalculable de bruits que nous supportons au quotidien. [5] ,Le tableau 03 regroupe quelques bruits récurrents que nous sommes susceptibles de subir dans une vie.

L'échelle des décibels a pour avantage d'échelonner un grand nombre de niveaux sonores sur une échelle relativement petite

Tab 03: Quelques bruits et perception auditives représentant les niveaux sonores(Source: Fondation Recherche Médicale. Guide de l'audition. Paris : Dauphin, 2006).

Perception des bruits par l'oreille		Exemple de bruit courant	Intensité en décibel	Possibilité de conversation dans le milieu bruyant	
Douleur insupportable et destruction du système auditif. Exige une protection		Fusée au décollage	190	Communication impossible	
		Tir de fusil	170		
		Explosion de pétards ou pistolet	160		
		Avion au décollage	140		
		Marteau piqueur	130		
Seuil de douleur, difficile à supporter et traumatisme auditif si exposition trop longue		Départ de formule 1	120	En criant	
		Train, concert, discothèque	110		
		Tronçonneuse	105		
Seuil à risque auditif		Baladeur au maximum légal, marteau piqueur à 5 m	100	En criant	
		Sirène de police	95		
		Klaxon de voiture à 4m	90		
Bruit fort mais supportable		Circulation bruyante, aspirateur, cantine	85	Voix forte, conversation et compréhension difficile	
		bruyante ou tondeuse	80		
Seuil de pénibilité, bruits fatiguants		Circulation normale	75	Conversation avec un bruit de fond	
		Télévision, repas	70		
			65		
Seuil de confort auditif	Bruit courant	Rue calme	60	Conversation dans le calme	
		Bruits d'intérieur, lave-vaisselle et lave-linge	50		
	Calme	Pièce calme	40	Voix chuchotée	
		Très calme	Vent léger dans des feuillages		30
		Silence inhabituel	Désert, laboratoire acoustique, forêt		20
Seuil d'audibilité		Chambre sourde	10		
			0		

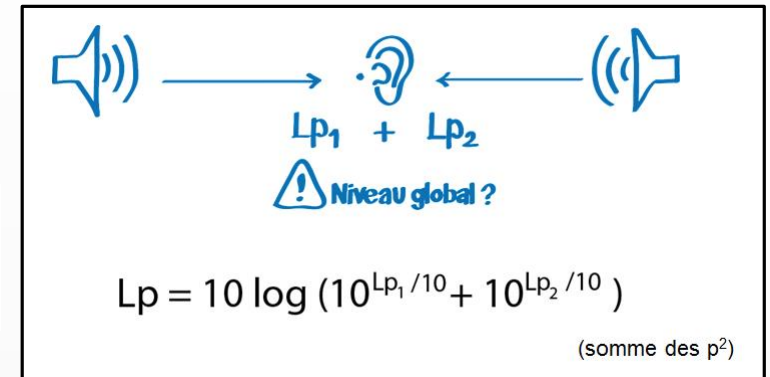


1-5 Addition de niveaux des décibels

Compte tenu de leur échelle logarithmique les règles d'addition classiques ne s'appliquent donc pas aux niveaux de bruit. Par exemple, deux conversations identiques et simultanées, dont le niveau sonore est de 50 dB(A), ne donneront pas un niveau sonore de 100 dB(A), mais un niveau sonore de 53 dB(A).

Formule d'addition des niveaux de bruit de L1 à Ln:

$$\sum_1^n Ln = 10 \cdot \log (10^{L1/10} + 10^{L2/10} + \dots + 10^{Ln/10})$$



1-5-1 Deux niveaux sonores égaux :

Soient L_{p1} et L_{p2} les niveaux de pression acoustique de deux sources sonores tels que $L_{p1} = L_{p2}$. Le niveau de pression acoustique total $L_{p_{total}} = L_{p1} + L_{p2}$ est déterminé comme suit :

$$L_{p1} = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2$$

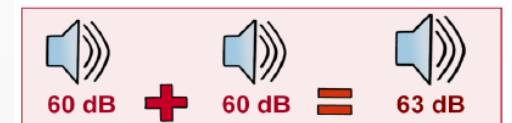
$$L_{p1} = 10 \log \left(\frac{P_1^2}{P_0^2} \right)$$

$$L_{p_{total}} = 10 \log 2 + 10 \log \left(\frac{P_1^2}{P_0^2} \right)$$

$$L_{p1} = 10 \log \left(\frac{P_1^2}{P_0^2} \right)$$

$$L_{p_{total}} = 10 \log \left(\frac{P_1^2 + P_1^2}{P_0^2} \right)$$

$$L_{p_{total}} = 3 + L_{p1}$$





1-5-2 Plusieurs sources de même niveau acoustique

Dans le cas de n sources sonores de même niveau acoustique, l'augmentation du niveau considéré est :

$$\Delta L = 10 \log n$$

n: nombre de sources

1-5-3 Deux niveaux sonores différents :

Soient L_{P1} et L_{P2} les niveaux de pression acoustique de deux sources sonores tels que $L_{P1} > L_{P2}$. Le niveau de pression acoustique total $L_{Ptotal} = L_{P1} + L_{P2}$ est déterminé comme suit :

K(dB): Déterminé d'après le tableau suivant en fonction de $\Delta L = L_{P1} - L_{P2}$

$$L_{Ptotal} = L_{P1} + K(dB)$$

$\Delta L(dB)$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
K(dB)	3	2,8	2,5	2,3	2,1	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,1	0,04

L'augmentation du niveau acoustique résultant peut être déterminée par le diagramme suivant :



Fig 02: Diagramme de détermination des valeurs K(dB) <http://acoustiquebatiment.e-monsite.com/pages/caracteristiques-energetiques-des-sons.html>

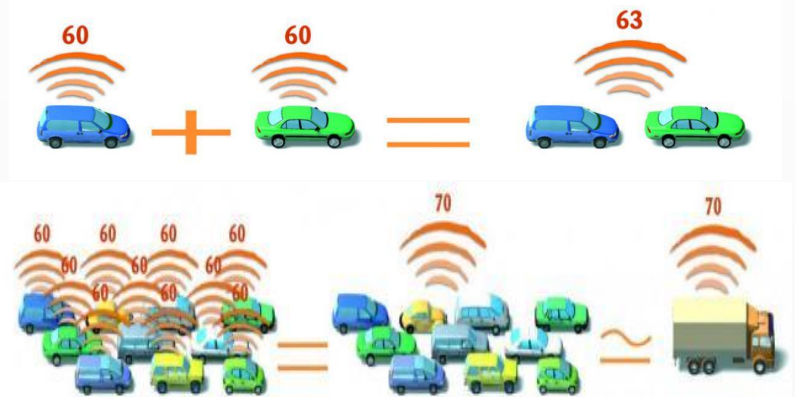


1-5-4 Plusieurs sources sonores de niveaux acoustiques différents

Dans le cas de plusieurs sources sonores de niveaux acoustiques différents, le niveau de pression total résultant est obtenu par la relation suivante :

$$L_{Ptotal} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \text{ (dB)}$$

- 2 sources sonores de même intensité Ceci revient à dire que lorsque le trafic routier diminue de moitié, toutes choses égales par ailleurs, le gain acoustique sera de 3 dB.
- 10 sources sonores de même intensité, il faudrait diviser par 10 le trafic automobile pour réduire de 10 dB le niveau sonore d'une rue, à condition que la vitesse des véhicules soit la même.
- 10 dB d'écart entre 2 sources sonores Lorsqu'il y a 10 dB d'écart au plus entre 2 sources sonores, on ne perçoit que la source qui a le plus fort niveau. C'est « l'effet de masque ».





1-6 Perception du son

1-6-1 La relation entre le niveau sonore et sensation auditif

La sensation auditive ne varie pas de manière linéaire avec la variation du niveau sonore. Ainsi, une différence de 3 dB (énergie sonore multipliée par deux) sera perceptible mais il faudra un écart de 10 dB (énergie sonore multipliée par 10) pour avoir l'impression d'un bruit deux fois plus fort (Tab 04).

Augmenter le niveau sonore de :	C'est multiplier l'énergie sonore par :	C'est faire varier la sensation auditive :
3 dB	2	Légèrement : on fait la différence entre deux lieux où le niveau diffère de 3 dB, mais il faut tendre l'oreille.
5 dB	3	Nettement : on ressent une aggravation ou on constate une amélioration lorsque le bruit augmente ou diminue de 5 dB.
10 dB	10	Comme si le bruit était deux fois plus fort.
20 dB	100	Comme si le bruit était 4 fois plus fort. Une variation de 20 dB peut réveiller ou distraire l'attention.
50 dB	100 000	Comme si le bruit était 30 fois plus fort. Une variation brutale de 50 dB fait sursauter.

Tab 04: Perception des niveaux sonores. (Source:<https://www.bruitparif.fr/perception/>)



1-6-2 La variation de la sensibilité de l'oreille selon la fréquence du son

L'oreille humaine perçoit les sons dans une gamme de fréquence qui va de 20 hertz (très grave) à 20 000 hertz (très aigu). L'oreille humaine n'est pas sensible de la même façon aux différentes fréquences (Fig 03).

Dans la gamme des niveaux sonores de la vie courante (30 à 80 dB), la sensibilité de l'oreille est la plus grande aux fréquences moyennes qui correspondent aux fréquences conversationnelles. Ainsi, à niveau équivalent, un son grave ou aigu sera perçu moins fort qu'un son médium.

Notre ouïe est relativement plus sensible aux fréquences comprises entre 200 et 4.000 Hz, fréquences correspondant à la gamme de fréquences de la voix (Fig 04)

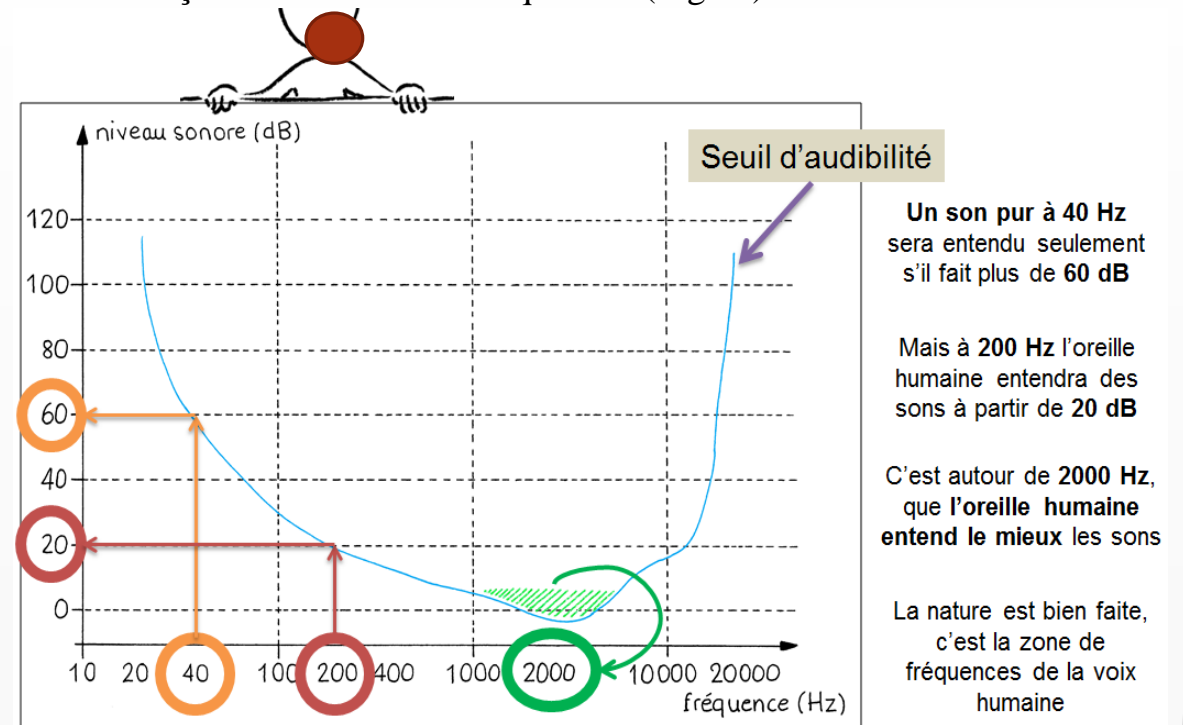


Fig 03: Sensibilité de l'oreille humain aux différentes fréquences (Source: <https://www.bruitparif.fr/perception/>)



1-6-3 Les courbes isosoniques

Lors des mesures de niveau de pression acoustique et d'intensité, la fréquence du son n'a pas d'influence sur ces calculs. Or, nous savons que l'appareil auditif humain a une sensibilité plus ou moins grande à un son en fonction de celle-ci. Les courbes isosoniques ou « d'égale sensation » ou courbes dites de Fletcher et Munson représentées à la (figure mm) sont les variations de niveaux de pression acoustique pour une même sensation auditive ou sonie en fonction de la fréquence. L'unité de mesure d'un

niveau de sonie est le phone. Le phone correspond au niveau de pression acoustique mesuré à 1 000 Hz d'une sonie. Pour exemple, un son de 30 dB SPL à une fréquence de 100 Hz à la même sonie qu'un son de 10 dB SPL à 1000 Hz. Ils sont donc représentés graphiquement sur une même courbe isosonique et ont un niveau de sonie égal à 10 phones.

Chaque courbe représente une et même sensation auditive ou sonie. En fonction de la sensibilité de l'appareil auditif pour une fréquence donnée, la ligne augmente ou diminue dans les décibels (mesurés de façon objective par un sonomètre) pour atteindre cette même sensation sonore subjective [6].

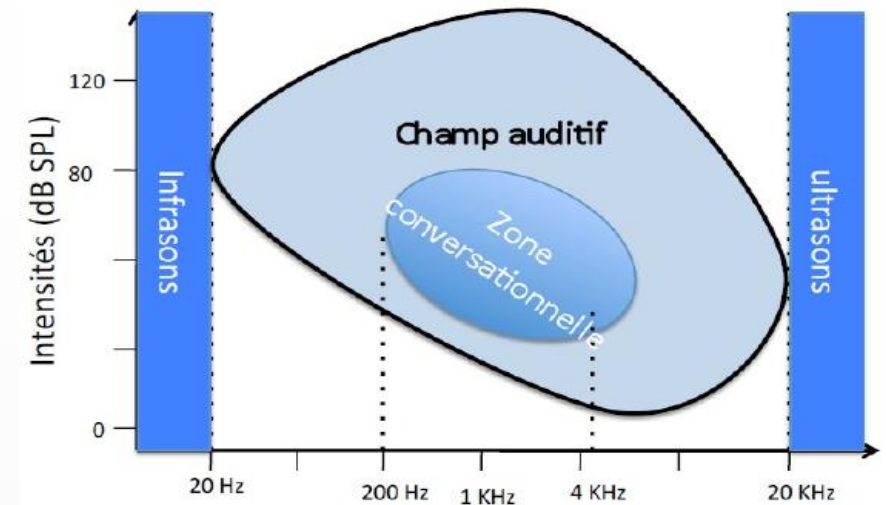


Fig 04: zone de fréquences de la voix humaine , (Source: <https://www.studocu.com/fr/document/universite-de-tours/paces-ue-8/notes-de-cours/ue8-33-mecanismes-de-laudition-bakhos-pdf/2191752/view>)



Chacune des courbes correspond a une même sensation subjective, appelée parfois *phone* à partir d'un bruit émis a des fréquences différentes.

La sensation auditive ne suit pas la courbe du niveau sonore en décibel mesure de façon objective par un sonomètre. Par exemple, la sensation auditive obtenue a partir d'une source monochromatique de fréquence égale a 1 kHz et de niveau égal à 60 dB serait différente si cette source émettait maintenant à une fréquence plus faible (par exemple 125 Hz) avec un niveau sonore émis identique. En effet, d'après le graphe, l'auditeur doit augmenter le niveau sonore de la source de 5 dB à cette fréquence plus faible pour ressentir la même sensation auditive.

La sensation auditive est moins variable pour des fréquences plus élevées, et la courbe de sensibilités devient plus plate. Nous venons ici de mettre le doigt sur un point important en acoustique, la différence existant entre la sensation auditive et le niveau réel de pression en un point. L'ingénieur acousticien doit donc tenir compte de cette différence par l'utilisation d'un *filtre*, à appliquer sur les mesures, diminuant les niveaux des basses fréquences, pour lesquelles l'oreille est moins sensibles, laissant inchangés les niveaux dans les mediums, et diminuant aussi les très hautes fréquences. Ce filtre est appelé *pondération* [8]

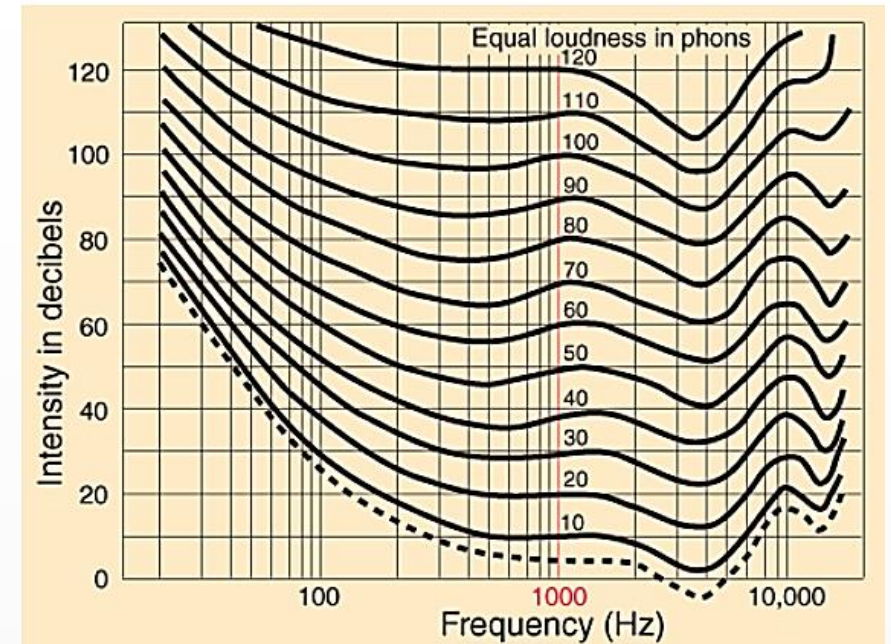


Fig 05: Les courbes isosoniques d'après les normes ISO 26:2003 [7]



1-6-4 Les décibels pondérés

Les mesures physiques du son ne permettent pas de définir totalement la sensation auditive. Comme nous venons de le voir, la sensibilité auditive n'est pas seulement liée au niveau sonore. Pour tenir compte de ce différentiel de sensibilité fréquentielle, des systèmes de pondération ont été établis afin de représenter au plus proche la sensation auditive. Pour cela, les sonomètres utilisent des filtres qui suivent les courbes de pondération A, B ou C normalisées (CEI 61672-1, NF EN 61672-1). Les décibels pondérés ainsi mesurés sont notés respectivement.

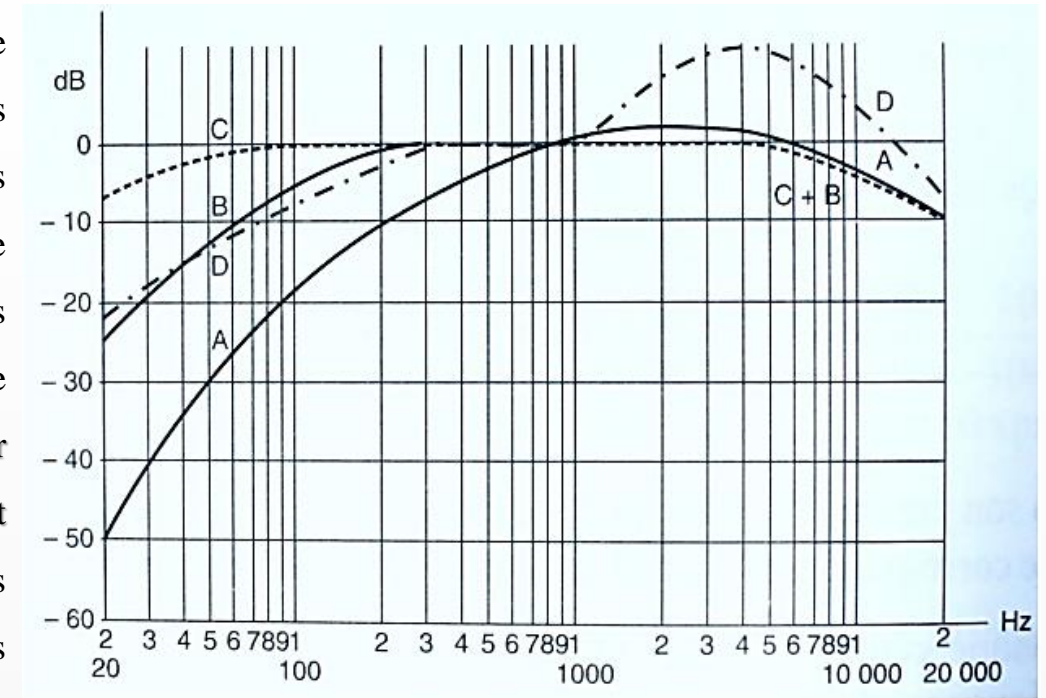


Fig 06: Coubes de pondération A,B,C,D du sonomètre [9]

dB(A), dB(B), dB(C). La figure 06 représente les courbes de pondération des sonomètres. La pondération A (Tab 05) utilise un filtre qui se base sur la courbe isosonique de 40 phons (Fig 07). Les faibles fréquences deviennent alors les fréquences les moins filtrées



Fréquence (Hz)	Pondération A (dB)
63	-26.2
125	-16.2
250	-8.7
500	-3.2
1000	0.0
2000	1.2
4000	1.0
8000	-1.1
16000	-6.7

Tab 05: Pondération A [10]

Pour exemple, un niveau sonore de 65 dB équivaut à 40 dB(A) à 100 Hz avec une pondération A. La pondération A étant la pondération la plus utilisée, elle est calquée sur la sensibilité moyenne de l'oreille à l'intensité des bruits courants.

La pondération C reproduit la sensibilité moyenne de l'oreille aux bruits d'intensité élevée et utilise pour le mesurage des niveaux de pression acoustique de crête. [11] Il existe également des pondérations temporelles normalisées CEI 61672-1, les pondérations F, S et I. [12]

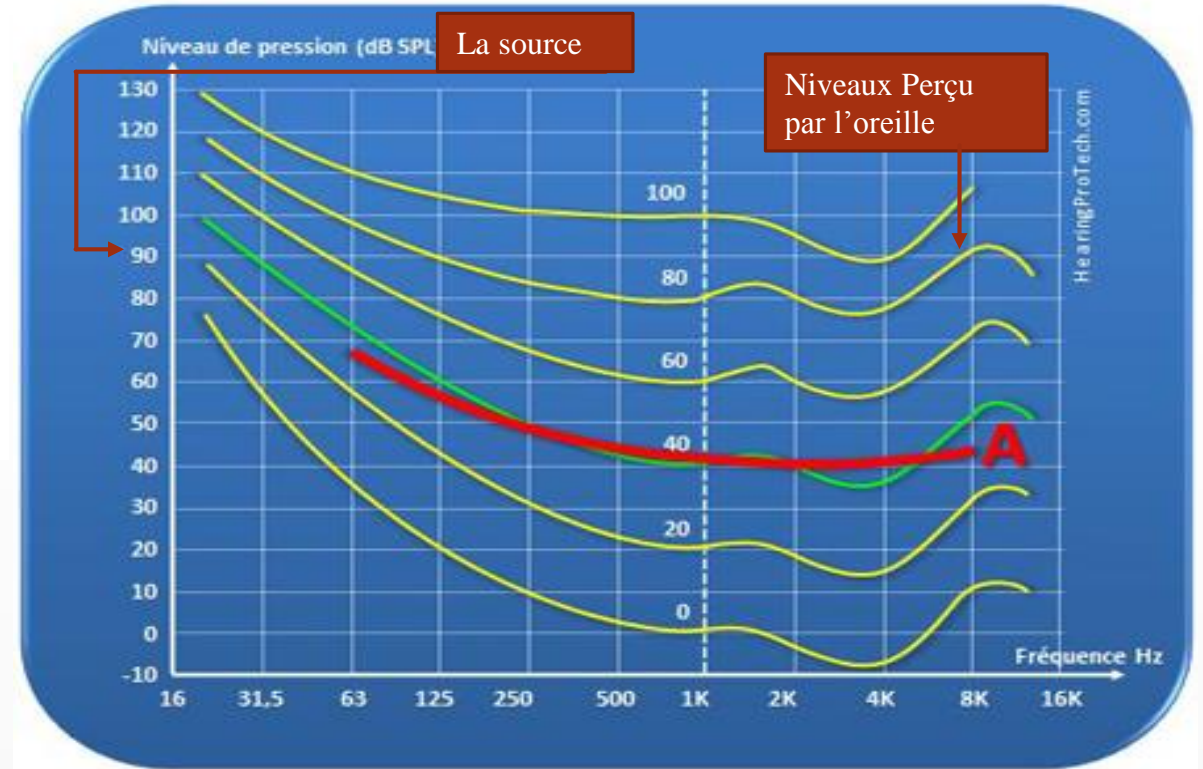


Fig 07: La pondération du dB(A) est calquée sur la perception de l'oreille humaine (courbe isosonique) à 40 dB SPL sur la fréquence des 1KHz (source : <https://www.hearingprotech.com/fr/les-themes/le-bruit/caracterisation-du-son.html>)



Par commodités, seule la pondération A reste utilisée.

Les coefficients de la pondération A sont de -15,5 à 125 Hz, -8,5 à 250 Hz, -3 à 500 Hz, 0 à 1000 Hz, 1 à 2000 Hz et 1 à 4000 Hz. Un niveau de bruit pondéré « A » s'exprime en dB(A) (Fig 08)

Par analogie avec définition de Lp, le niveau de pression acoustique pondéré

$$L_p(A) = 10 \log(p_A^2/p_0^2)$$

Où pA est la pression efficace pondérée A en Pa, p0 la pression acoustique de référence correspondant au seuil d'audibilité d'un son à 1000 Hz = 2.10⁻⁵ Pa.

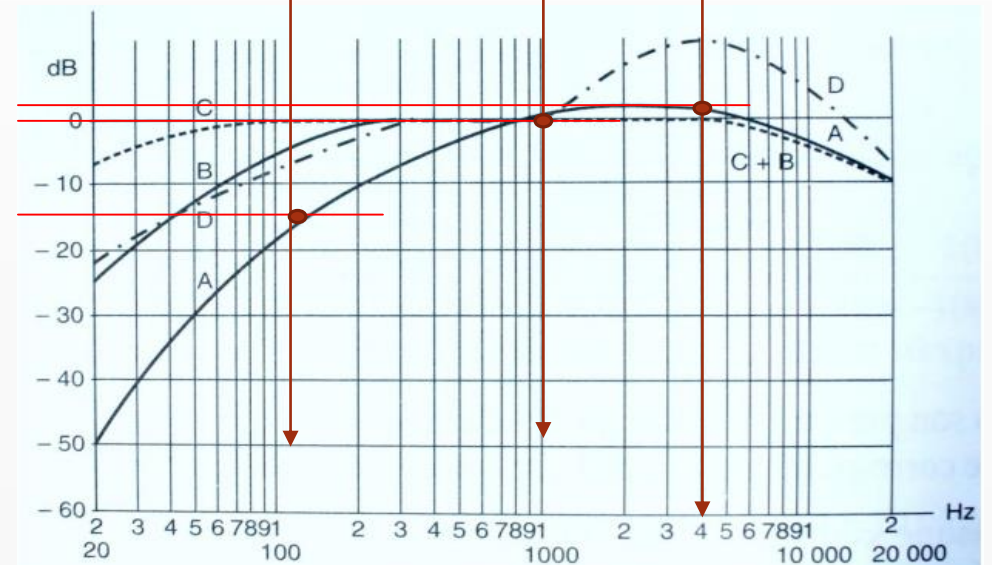
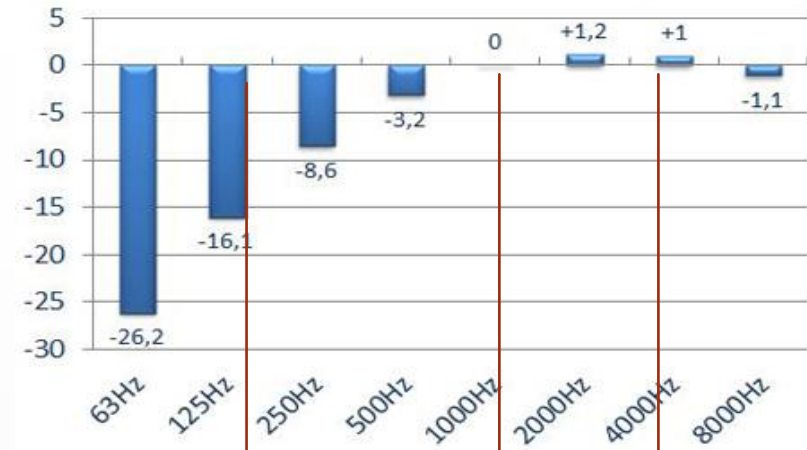


Fig 08: Projection de fréquences au coefficient de pondération (source:Auteur)



1-6-4-1 Exemple de pondération A

Mesure d'un passage d'avion

Les avions produisent des sons avec beaucoup de basses fréquences

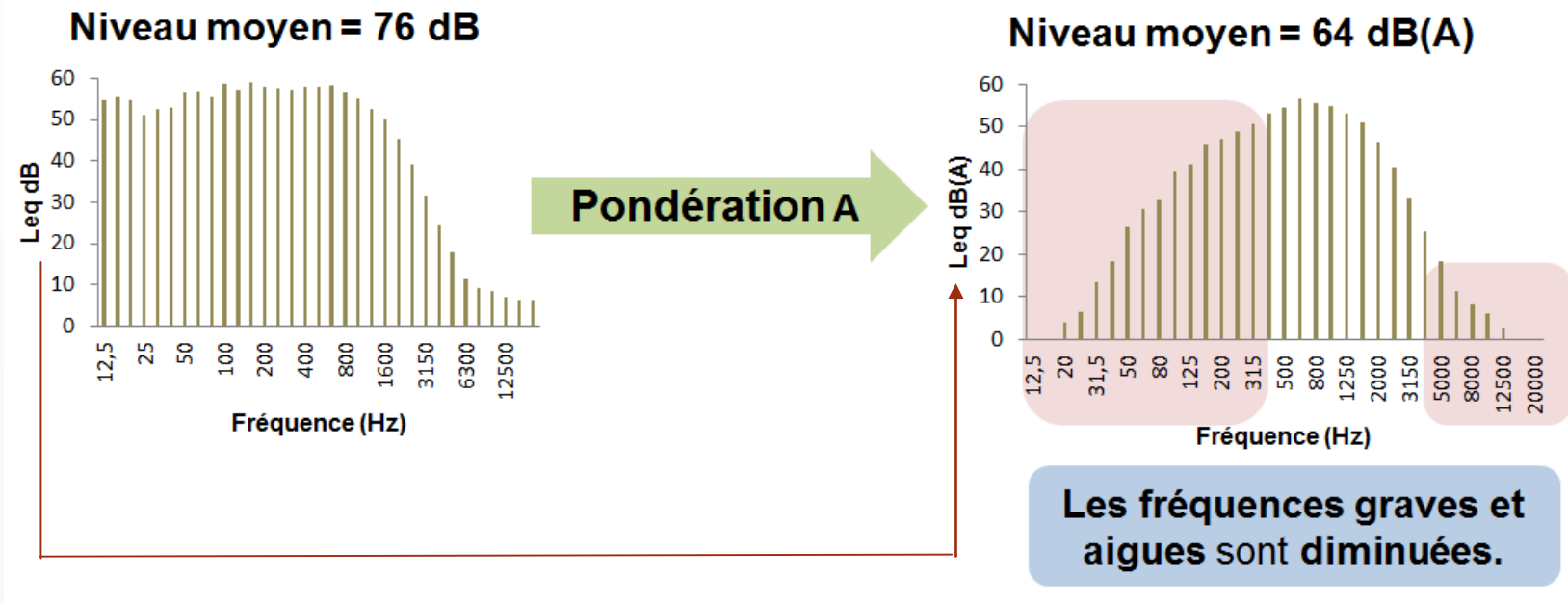


Fig 09: Exemple de pondération A (source <https://www.bruitparif.fr/perception/>)



1-6-5 Le sonomètre

un décibel mètre ou sonomètre se définit généralement comme un indicateur de niveau sonore. Il s'agit d'un outil qui sert à mesurer le niveau de pression acoustique ambiante dans un cadre précis. Un décibel mètre est donc le plus souvent utilisé pour tester la conformité avec les lois locales de bruit, assurer les normes de sécurité de l'audience dans l'industrie et examiner l'acoustique dans la conception de l'environnement.

Alors que les premiers sonomètres commercialisés dans les années 60 ressemblaient à des voltmètres avec un microphone, les mathématiques (Fourrier), l'informatique et l'électronique numérique ont transformés le sonomètre en laboratoire d'acoustique.[13]

Les sonomètres analogiques permettent uniquement de mesurer des niveaux de pression acoustique L_p , ou $L_p(A)$ avec une constante d'intégration (ou pondération) temporelle de signal variable.(Fig 10)



Fig 10: Sonomètre analogique (Source: https://www.general-acoustics.fr/data/_uploaded/file/coursCloud.pdf)



Les sonomètres modernes permettent non-seulement de faire des mesures de niveaux de bruit mais également d'en faire une analyse spectrale. Le spectre d'un bruit est une représentation de la répartition énergétique du niveau de bruit pour chaque bande de fréquence (Fig 11) en dB. Les sonomètres numériques sont dotés d'un système d'échantillonnage et de stockage qui sont, pour les modèles professionnels, associés à des logiciels de traitement.

1-6-5-1 Comment fonctionne un sonomètre

Le sonomètre est en effet, équipé d'un microphone omnidirectionnel qui capte les sons en temps réel, détecte les changements de niveau de pression de l'air et converti le son en signaux électriques. Tous ces éléments sont ensuite évalués par des composants de circuit de l'appareil. convertit ensuite la pression acoustique en signal électrique, le filtre selon une courbe normalisée, en produit la valeur efficace qu'elle intègre sur une durée choisie.

Une fois l'analyse faite, le niveau sonore calculé en décibels s'affiche clairement sur le sonomètre. Il faut noter que les limites d'usage du sonomètre dépendent des performances du microphone.[13]

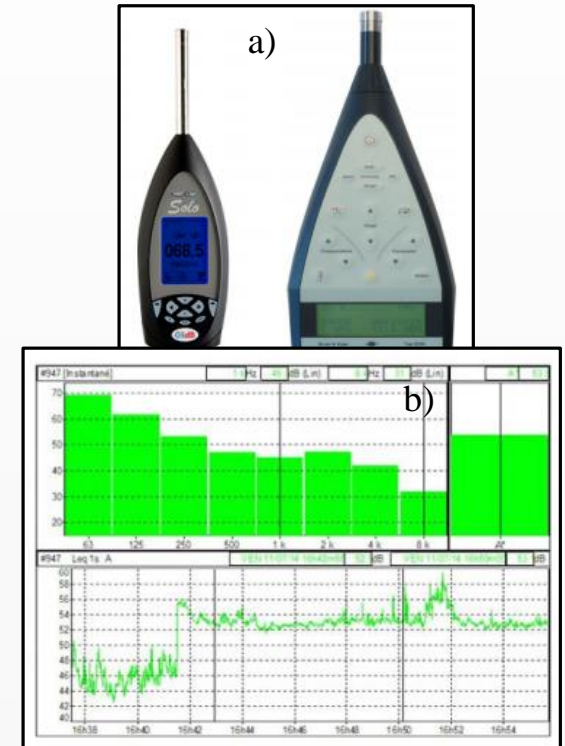


Fig 11: a) sonomètre numérique ; b) logiciel de traitement (Source: https://www.général-acoustics.fr/data/_uploaded/file/coursCloud.pdf)



Références bibliographiques

- [1] Meisser, M. (2005). Acoustique du bâtiment: évolutions ressenties au cours des quinze dernières années. *Acoustique & techniques, Vol42-43*.
- [2] Guibert, E. (2007) Cours d'Acoustique Techniciens Supérieurs Son Ière année. Consulté à l'adresse « <https://docplayer.fr/926387-Cours-d-acoustique-niveaux-sonores-puissance-pression-intensite.html> » le 05/05/2019
- [3] American National Standard Preferred Reference Quantities for Acoustical Levels -ANSI SI.8-1969 (R1974). American National Standard Institute, New-York, 1974. 34
- [4] BOULAND Catherine, DELLISSE Georges, DE VILLERS Juliette (2018) NOTIONS ACOUSTIQUES ET INDICES DE GENE, Consulté à l'adresse « https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/bru%202 » le 07/01/2020
- [5] Goust , J.(2007) Audition et vie professionnelle Consulté à l'adresse « <https://www.sa-autrement.com/livre/9782878806892-audition-et-vie-professionnelle-jerome-goust/>» le 07/12/2019
- [6] ANTONIO FISCHETTI (2003) Initiation à l'acoustique Cours et exercices corrigés ; consulté a l'adresse « <https://www.belin-education.com/initiation-lacoustique> » le 02/03/2020
- [7] ISO. Acoustique, lignes isosoniques normales. www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail.htm?csnumber=34222. (consulté en ligne le 15 janvier 2016).
- [8] Delcros, F. (2016). *Les ondes sonores et leurs impacts sur la sante* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [9] Mercier, D. (1994). *Le livre des techniques du son*. Eyrolle.
- [10] Denis Duhamel. 2013 Acoustique. École d'ingénieur. France. Consulté a l'adresse « <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-01510839> » le 05/08/2019
- [11] Michael BOCKHOFF, Jean JACQUES, Thierry LOYAU, Léon THIERY 2008 Mesures en acoustique industrielle. Partie 1 consulté a l'adresse « <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesures-acoustiques-et-vibratoires-42420210/mesures-en-acoustique-industrielle-partie-1-r6030/> » le 20/02/2020
- [12] ISO 1996-1:2003. Acoustique-Description, mesurage et évaluation du bruit de l'environnement-partie 1 : grandeurs fondamentales et methodes d'évaluation. <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:1996:-1:ed-2:v1:fr>. (consulté en ligne le 6 juillet 2015).
- [13] Licence Professionnelle Environnement & Construction IUT GC - Université de La Rochelle/ACOUSTIQUE DU BATIMENT ET DE L'ENVIRONNEMENT Christophe Cloud – cours V2.0



Site internet

https://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/noise_basic.html)

Fondation Recherche Medicale. Guide de l'audition. Paris : Dauphin, 2006.

<http://acoustiquebatiment.e-monsite.com/pages/caracteristiques-energetiques-des-sons.html>

<https://www.bruitparif.fr/perception/>

<https://www.studocu.com/fr/document/universite-de-tours/paces-ue-8/notes-de-cours/ue8-33-mecanismes-de-laudition-bakhos-pdf/2191752/view>

<https://www.annabac.com/sujet-corrige-bac/audition-humaine>