

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder les notions de base de l'acoustique. L'objectif est d'apporter à l'étudiant des éléments d'éclaircissement sur les notions physiques de l'acoustique. Une pluralité de définitions accompagnées d'illustrations (figures et schémas) est présentée dans le but de simplifier la complexité de la thématique. Nous allons également éclaircir comment l'être humain perçoit le son en faisant appel à quelques notions relatives à la médecine. Dans cette partie, il est primordial de rappeler puis sensibiliser l'étudiant à la multidisciplinarité de l'architecture.

1. L'acoustique

Étymologiquement parlant, le mot « *Acoustique* » vient du grec et signifie entendre. L'acoustique est la science ou disons, une partie des sciences physiques relative à l'étude des sons et les bruits (tout ce qui a rapport aux sons). Elle étudie le son du point de vue de leur émission, leur propagation et de leur réception (Figure I.1).



Figure I.1 : Les domaines d'étude de l'acoustique (Auteur, 2020)

2. La source sonore

On appelle « source sonore », tout sujet émettant des ondes sonores: un homme parlant, machine en marche, haut-parleur, feuillage devant le vent etc. Il existe deux types de sources sonores: sources ponctuelles et sources linéaires (Tran, 1996).

2.1. La source ponctuelle

C'est toute source dont les dimensions sont négligeablement petites par rapport aux distances de propagation des ondes tels que : un instrument musical, une voiture en marche, un haut- parleur etc. (Tran, 1996). Elle peut être fixe (instrument

musical) ou mobile (voiture en marche). Les ondes ponctuelles produisent des ondes sphériques dans l'atmosphère (Figure I.2).

2.2. La source linéaire

C'est toute source se composant de plusieurs sources ponctuelles qui se rangent en ligne (une ligne de voiture en marche) (Figure I.3). Les ondes linéaires produisent des ondes cylindriques (Tran, 1996).

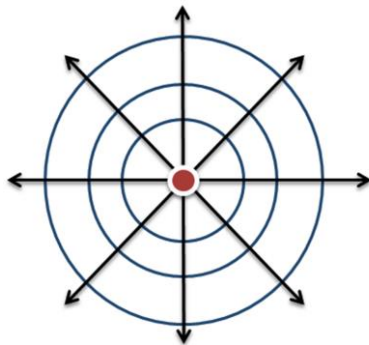


Figure I.2 : La propagation d'une onde sonore ponctuelle (Tran, 1996)

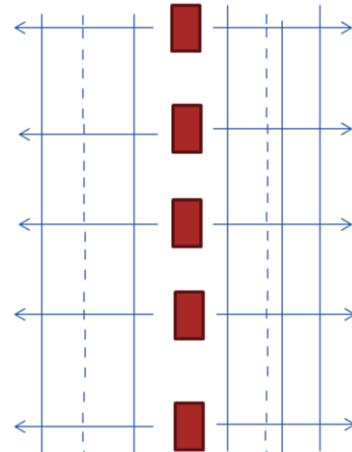


Figure I.3 : La propagation d'une onde sonore linéaire (Tran, 1996)

On distingue également deux types de propagation sonore dans l'air : la propagation omnidirectionnelle et la propagation directionnelle. La première, se produit dans l'air libre sans la présence d'un quelconque obstacle (Figure I.4-a). Par contre, la propagation directionnelle se produit dans un air limité par un ou plusieurs obstacles (Figure I.4-b, I.4-c). Les obstacles pourraient être le sol, les murs, les objets etc.

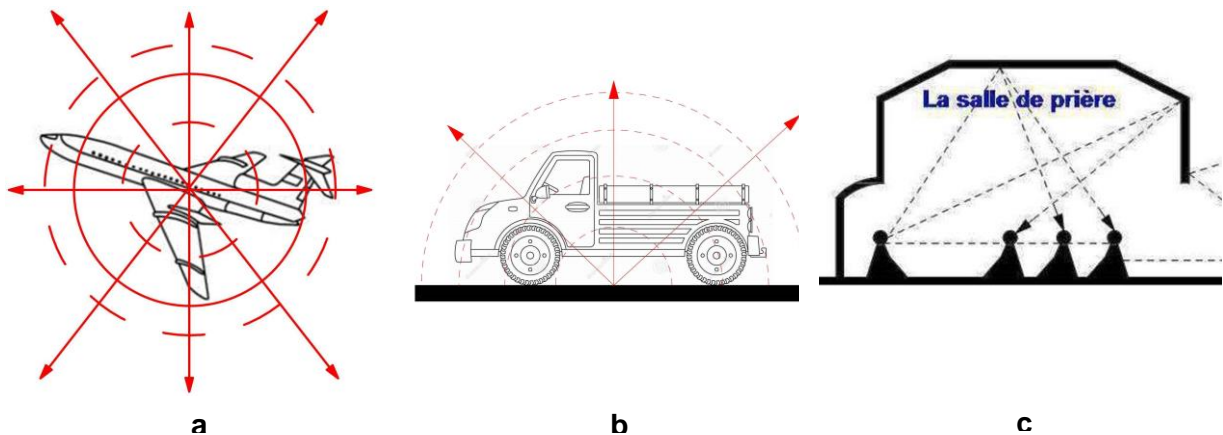


Figure I.4 : La propagation omnidirectionnelle et la propagation directionnelle. (a) onde sonore générée par un avion qui vole, (b) onde sonore générée par une voiture en marche dont l'obstacle est le sol, (c) onde sonore générée par un Sheikh qui donne une leçon à ses Tolbas dans une salle de prière d'une medersa dont les obstacles sont les parois (Auteur, 2020).

3. Les ondes

L'onde se définit comme une perturbation qui se propage. On distingue deux types : les ondes mécaniques et les ondes électromagnétiques (Margollé *et al*, 2016).

3.1. L'onde mécanique et l'onde électromagnétique

Une onde est une perturbation ou une oscillation qui se propage à travers un milieu (l'air, une corde, l'eau, la terre). C'est un déplacement de l'énergie qui se produit de proche en proche sans transport de matière.

Les ondes électromagnétiques (lumière) n'ont pas besoin d'un support matériel pour se propager. Elles peuvent se propager dans le vide (les communications radio dans l'espace, la lumière venue des étoiles etc.).

3.2. L'onde transversale et l'onde longitudinale

3.2.1. L'onde transversale

Une onde est dite transversale si les particules oscillent dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Pour qu'une onde transversale puisse se propager, il faut que le milieu soit suffisamment rigide. Si on prend l'exemple de la corde (Figure I.5), les particules vont osciller verticalement. Autrement dit, elles bougent alternativement en haut puis en bas. Un autre exemple est celui des ondes à la surface de l'eau (Figure I.6) où la direction de l'oscillation est perpendiculaire à la direction de propagation.

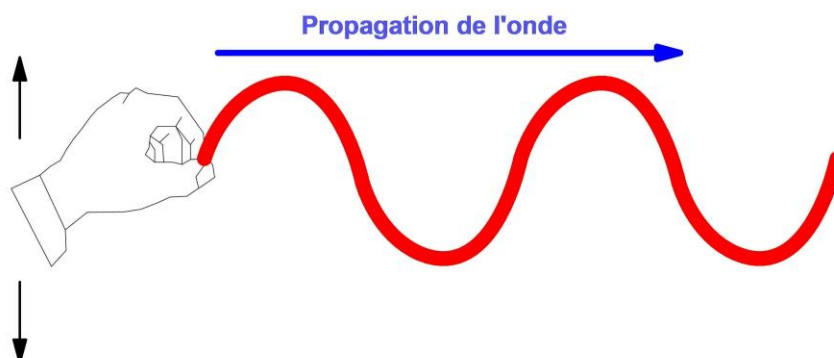


Figure I.5 : une onde transversale générée par une corde (Auteur, 2020)

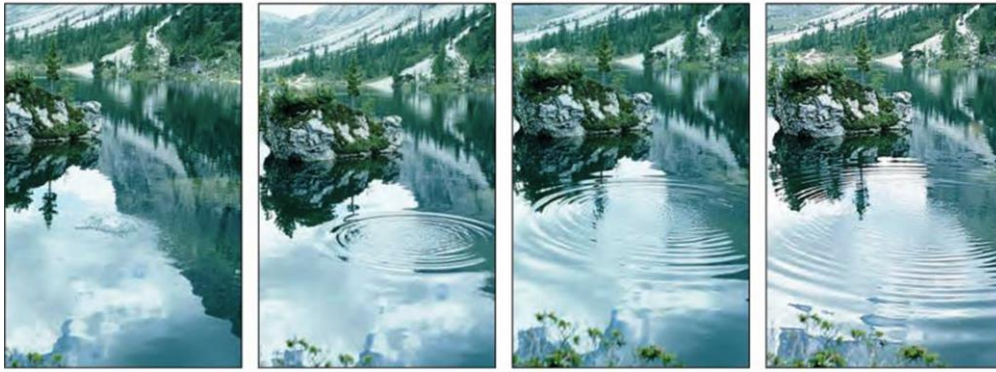


Figure I.6 : Une onde transversale à la surface de l'eau (Giancoli, 1993)

3.2.2. L'onde longitudinale

Une onde est dite longitudinale si les particules oscillent dans la même direction que celle de la propagation de l'onde (Figure I.7). L'air n'est pas rigide pour permettre une onde transversale. On peut citer l'exemple d'un ressort tendu horizontalement puis lâché. Chaque spire va se déplacer par rapport à sa position d'équilibre.

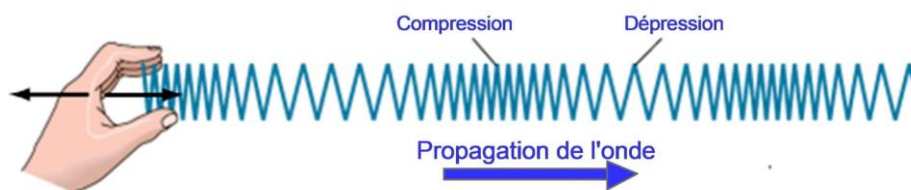


Figure I.7 : Une onde longitudinale générée par un ressort (Auteur, 2020)

4. Le son et son milieu de propagation

Physiologiquement parlant, le son est une sensation auditive engendrée par une vibration acoustique. Dans le domaine physique, le son est un phénomène vibratoire. Son origine émane de la vibration d'un objet matériel dans un milieu matériel (composé de molécules) comme l'air, les gazes, les vapeurs, l'eau (liquides), le béton, la terre etc.

Dans l'air, le son met en vibration une surface (lorsqu'une personne parle devant une feuille de papier, celle-ci vibre). Autrement dit, il peut être produit par la vibration d'une surface (peau d'un tambour, membrane d'un haut-parleur etc.). Le son ne se

propage pas dans le vide¹. Ceci dit, les vibrations d'un objet ne peuvent pas se propager en absence de la matière (absence d'atomes). Ainsi, il n'y a pas de son dans l'espace du fait qu'il n'y a pas d'air voire pas de matière².

5. L'onde sonore

L'onde sonore est produite par la vibration d'un objet (Les cordes vocales d'un chanteur, la peau d'un tambour, les bruissements des feuilles d'un arbre, la membrane d'un haut-parleur etc.) (Figure I.8). S'agissant d'une interaction mécanique entre deux structures: main et peau d'un tambour, doigt et corde d'une guitare, etc. Ce mouvement vibratoire se propage dans un milieu matériel, entre la source et l'oreille de l'auditeur. Les molécules du milieu matériel sont alternativement comprimées et dilatées, donnant naissance à une onde sonore. La propagation du son se fait sans transport de la matière: l'onde sonore issue d'un haut-parleur ne crée pas de courant d'air.



a



b



c

Figure I. 8 : Quelques sources sonores : (a) les cordes vocales d'un chanteur (Alier, 2006), (b) la peau d'un tambour (Comtet, 2012), (c) les bruissements des feuilles d'un arbre (Dupérat *et al* ; 2008)

¹ Une expérience simple faite au laboratoire illustrant le principe de la propagation du son est celle de la cloche à vide. Pour ce faire, nous avons besoin d'une source sonore (un réveil, une enceinte etc.), une cloche à vide, un sonomètre placé à côté de la source sonore et un aspirateur. Ce dernier a pour but d'aspirer l'air qui existe dans la cloche. Il est remarqué que plus l'air est aspiré, plus le niveau sonore mesuré par le sonomètre est diminué.

² Comme il a été mentionné ci-dessus, le son ne se propage pas dans le vide. Dans l'espace où règne le vide, la densité de la matière est trop faible (quasi-absence des particules ; une particule par centimètre cube). S'agissant de la communication entre la terre et l'espace, elle se fait par les ondes radios, des ondes électromagnétiques, qui ressemblent aux ondes lumineuses qui se propagent dans le vide avec une vitesse de 3.10^8 m/s.

6. La propagation d'une onde sonore

La propagation du mouvement vibratoire correspond à un transport d'énergie et non pas de la matière (molécules) (Figure I. 9). Chaque molécule composant l'air en contact avec une source sonore, vibre à son tour. Cette vibration est ensuite transmise à la molécule voisine, puis à la voisine de cette voisine, etc. (une propagation de proche en proche). L'onde sonore est une onde mécanique longitudinale du fait que les molécules se déplacent parallèlement au sens de propagation de l'onde (Figure I. 10).

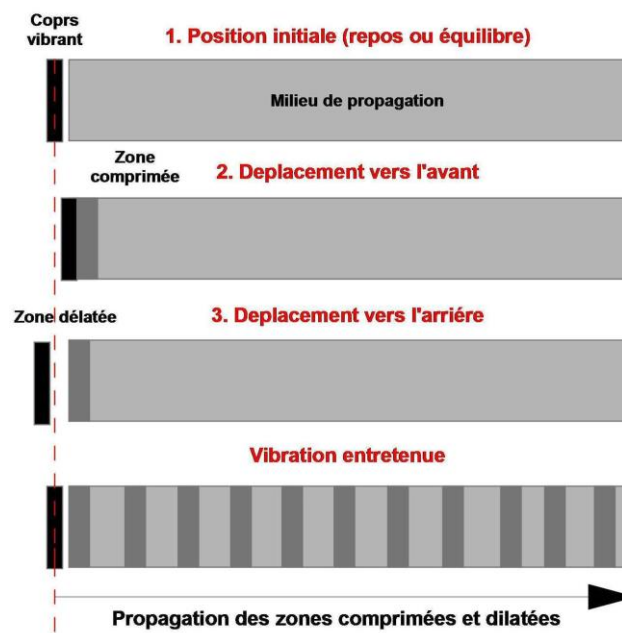


Figure I.9 : Le principe de propagation d'une onde sonore (Chagué, 2001).

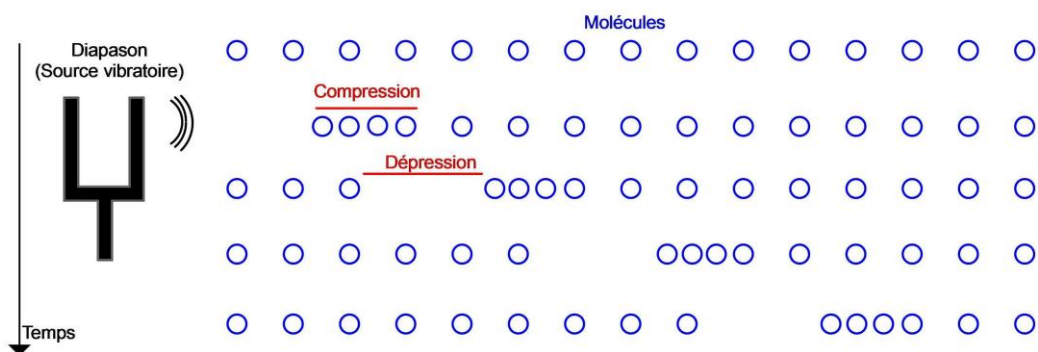


Figure I. 10 : Les molécules se déplacent parallèlement au sens de propagation de l'onde sonore générée par un diapason (Hamayon, 2008)

7. La célérité du son

7.1. Célérité du son et son milieu de propagation

La célérité³ du son dépend du milieu de propagation de l'onde sonore (Air, eau, terre, béton etc.) (Tableau I. 1). En fonction du milieu de propagation, les ondes sonores vont se propager plus ou moins vite. Dans l'eau les molécules sont plus proches les unes des autres que dans l'air⁴. Partant, l'onde sonore a plus de facilité de se propager dans l'eau que dans l'air (4 fois plus rapidement dans l'eau que dans l'air). Autrement dit, plus les molécules sont rapprochées, plus le son se déplace promptement (Figure I. 11).

Milieu de propagation	Célérité du son
L'air	340 m/s
L'eau	1425 m/s
L'acier	5000 m/s

Tableau I. 1 : La célérité du son dans des milieux de propagation différents (Hamayon, 2008)

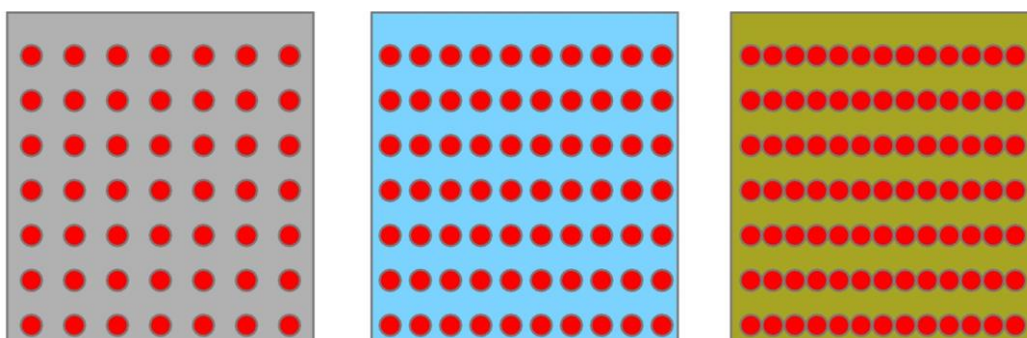


Figure I. 11 : Représentation schématique des molécules des trois milieux de propagation (de gauche à droite) ; l'air, l'eau et l'acier (Auteur, 2020).

7.2. Relation entre la célérité du son et la température

Dans l'air, la célérité du son (c) dépend également de sa température (t). La célérité du son augmente avec l'augmentation de la température. Elle augmente de 0,6m/s pour un 1°C. Il ne faut pas confondre entre la vitesse du son qui est la vitesse de propagation des ondes dans l'air selon des sphères concentriques et la vitesse des

³ On utilise le terme « célérité du son » au lieu de « vitesse du son » parce que l'énergie qui se transfère et non pas la matière.

⁴ Le son se propage mieux dans l'eau que dans l'air du fait que les molécules sont plus proches dans l'eau que dans l'air. Par exemple, on entend mieux les sons des gens dans la piscine.

particules qui se déplacent très légèrement autour de leur position d'équilibre. Pour calculer la célérité du son, on utilise la formule suivante (Hamayon, 2008) :

$$c = 20 \sqrt{t} \quad (I.1)$$

On trouve également la formule suivante (Hamayon, 2008) :

$$c = 331.4 + 0,607 t \quad (I.2)$$

c : célérité du son (m/s), t : température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

8. Les grandeurs physiques du son

8.1. La pression acoustique (P)

La pression atmosphérique est la pression qu'exerce l'air sur tous les corps. En l'absence d'une onde sonore, les particules aériennes sont réparties de manière régulière, la pression est en tout point égal la pression atmosphérique. Par contre, en présence d'une onde sonore, on aura des zones de pression et de dépression (Figure I. 12). La pression acoustique s'exprime en Pascals ($P_a = 1\text{N/m}^2$). On appelle pression instantanée P , la somme de la pression atmosphérique ou statique de l'ordre de 10^5 (une valeur variable selon les conditions climatiques) et de la pression acoustique P_a (P) (Hamayon, 2008).

$$P = P_0 + P_a \quad (I.3)$$

P : pression instantanée(P), P_0 : pression acoustique(P), P_a : pression atmosphérique(P)

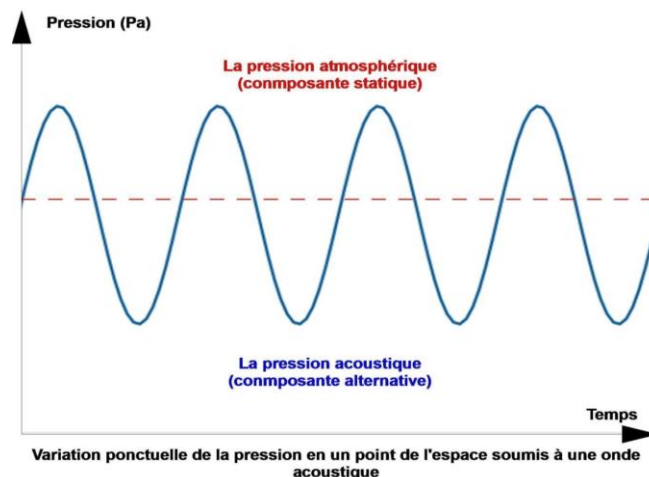


Figure I. 12 : Variation ponctuelle de la pression en un point de l'espace soumis à une onde acoustique (Hamayon, 2008)

8.2. Le niveau de pression acoustique (L_p)

L'oreille humaine est sensible à des variations de pression variant, de **$2 \cdot 10^{-5}$ Pascal** à **20 Pascal**. (20 Pa est le seuil de douleur). Pour calculer le niveau de pression acoustique, on utilise la formule suivante (Hamayon, 2008) :

$$L_p = 20 \lg p/p_0 \quad (I.4)$$

p : pression acoustique mesurée (P).

p_0 : pression acoustique de référence (P).

Le niveau de pression du seuil d'audibilité est de 0 dB et le seuil de douleur est de 120 dB. Il est à signaler que l'intensité ou le volume d'un son dépend de la pression acoustique créée par la source sonore (Figure I.13). Plus la pression est importante, plus le volume est élevé.

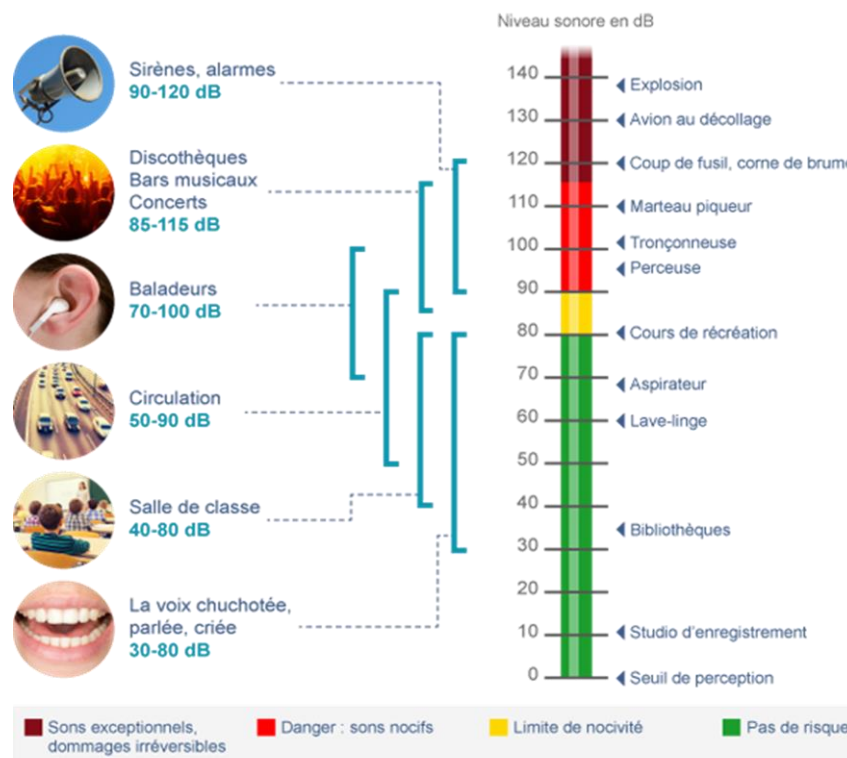


Figure I.13 : Le niveau de pression acoustique de quelques sources sonores (Choclea.org)

8.3. La puissance acoustique

La puissance acoustique (W ou P) est l'énergie libérée par une source sonore par unité de temps qui se répartit dans l'espace pour arriver à l'oreille. Elle s'exprime en watts (W). Le seuil d'audibilité d'un son est de 10^{-12} watt à la fréquence 10000 hertz.

8.4. Le niveau de puissance sonore

La formule de calcul du niveau de puissance acoustique est la suivante (Hamayon, 2008) :

$$L_w = 20 \lg W/W_0 \quad (I.5)$$

W : Puissance acoustique mesurée (w).

W_0 : Puissance acoustique de référence (w).

8.5. L'intensité sonore (puissance surfacique moyenne) (I)

L'intensité sonore (I) est la grandeur qui nous informe sur la force d'un son. Ainsi, plus l'intensité sonore est élevée, plus le son perçu est fort par l'oreille humaine. L'intensité sonore s'exprime en watt par mètre carré ($W.m^{-2}$). Il existe une intensité sonore minimale sous laquelle on n'entend pas le son ; c'est le seuil d'audibilité. Il vaut $I_0 = 10^{-12} W.m^{-2}$ (Figure I.14).

$$I = P/S \quad (I.6)$$

I : L'intensité sonore (W/S)

P : La puissance acoustique (W)

S : La surface de l'onde (S)

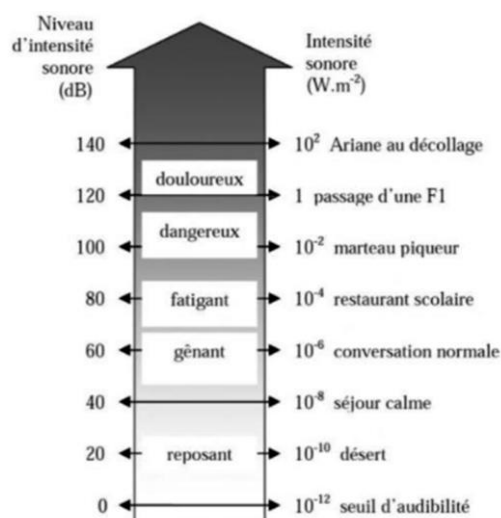


Figure I.14 : l'intensité sonore et le niveau d'intensité sonore de quelques sources sonores (Rey, 2021).

L'onde sonore se propage d'une manière sphérique (dans toutes les directions) (Figure I.15). La surface d'une sphère est $4 \pi r^2$, ainsi donc, la formule de calcul de de l'intensité sonore est la suivante (Hamayon, 2008) :

$$\begin{aligned} I &= P/S \\ I &= P/4 \pi r^2 \end{aligned} \quad (I.7)$$

r : la distance entre la source sonore et là où on se situe

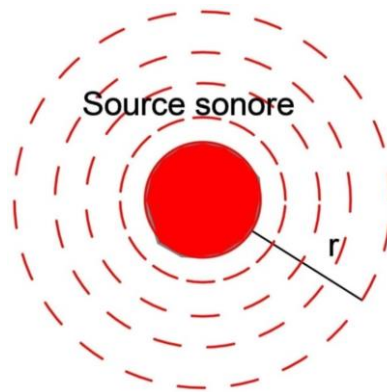


Figure I.15 : Schéma représentatif de la surface d'une onde sonore (Auteur, 2020)

8.6. Le niveau d'intensité sonore (L_i)

Pour calculer le niveau d'intensité sonore (L_i), on utilise l'équation suivante (Hamayon, 2008) :

$$L_i = 20 \lg I/I_0 \quad (I.8)$$

L_i : le niveau d'intensité sonore (dB)

I : l'intensité sonore (W.m^{-2})

I_0 : l'intensité sonore de référence-le seuil d'audibilité ($I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$)

8.7. La fréquence et l'amplitude

La fréquence est le nombre de périodes par seconde. Autrement dit, c'est le nombre de vibrations par seconde (Figure I.16). Elle s'exprime en Hertz (Hz). Par exemple, 200 Hz correspondent à 200 vibrations par seconde.

La période est le temps mis par la molécule d'air pour parcourir un seul aller-retour (vibration pour un aller-retour). C'est le nombre de secondes par oscillation (Hamayon, 2008).

$$f=1/t \quad (1.9)$$

f: le nombre de vibration par seconde

t: le nombre de secondes par vibration

L'amplitude de l'onde sonore est le déplacement maximal de la molécule d'air depuis sa position du repos.

L'intensité sonore que perçoit l'homme dépend de l'amplitude. Plus l'amplitude d'une onde sonore est grande, plus le son est fort. (Figure I.17). Lorsque vous augmentez le son de la télévision, par exemple, vous augmentez l'amplitude de l'onde sonore qui en émane.

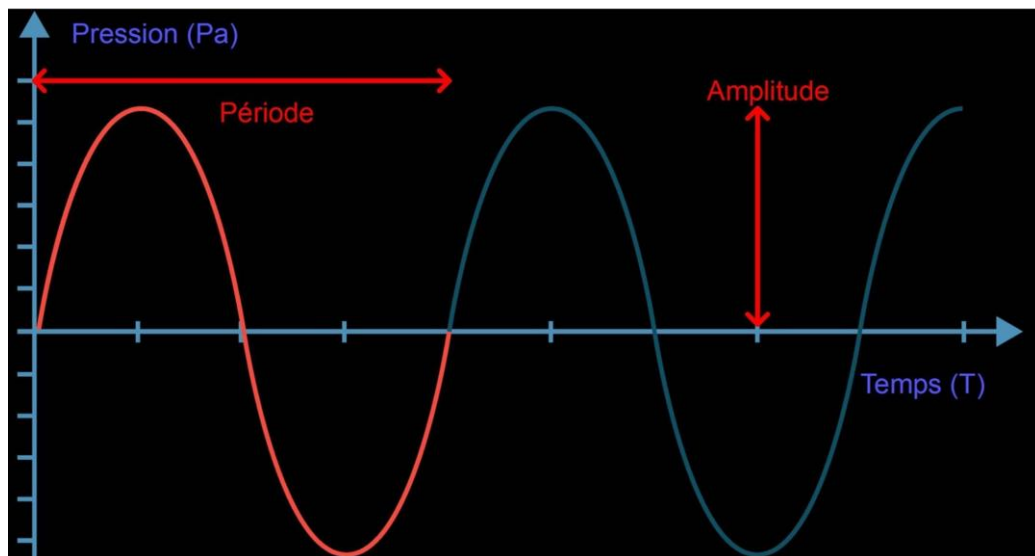


Figure I. 16 : La fréquence et l'amplitude d'une onde sonore présentée sur un oscillogramme (Auteur, 2020)

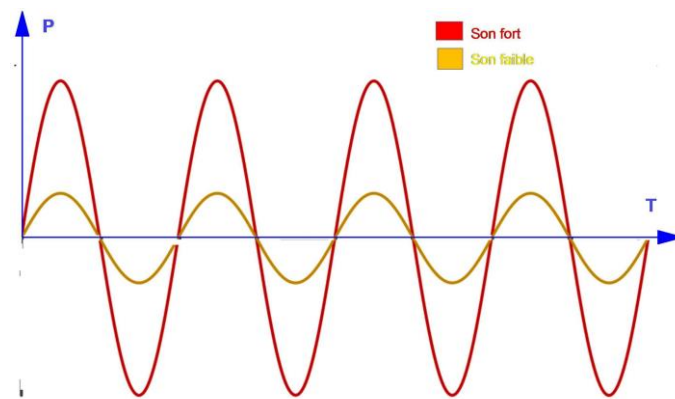


Figure I.17 : La différence entre le son fort et le son faible (Auteur, 2020).

La fréquence nous permet de distinguer les sons graves des sons aigus (Figure I.18). Un son paraît d'autant plus aigu que sa fréquence est élevée et d'autant plus grave que sa fréquence est basse. La fréquence est la hauteur du son au langage du musicien.

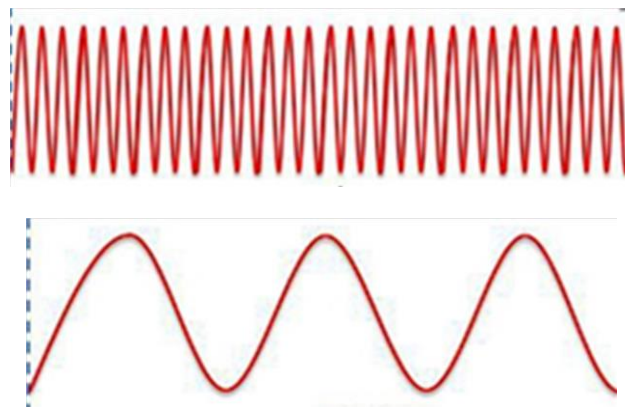


Figure I.18 : Le son aigu en haut, le son grave en bas (Auteur, 2020)

9. Les types du son

9.1. Le son pur

Le son pur est une sensation auditive provoquée par une onde de pression périodique purement sinusoïdale. Il n'est composé que d'une seule fréquence (Figure I. 19).

9.2. Le son complexe

Le son complexe est un mélange de sons purs. Autrement dit, c'est la superposition d'un certain nombre de sons purs (Figure I.19). Les sons complexes sont les sons naturels, ils comportent plusieurs sons purs qui peuvent être séparés lors d'une analyse spectrale.

9.3. Le son confus

C'est un mélange de sons sans périodicité précise comme les bruissements des feuilles dans les arbres (Figure I.20).

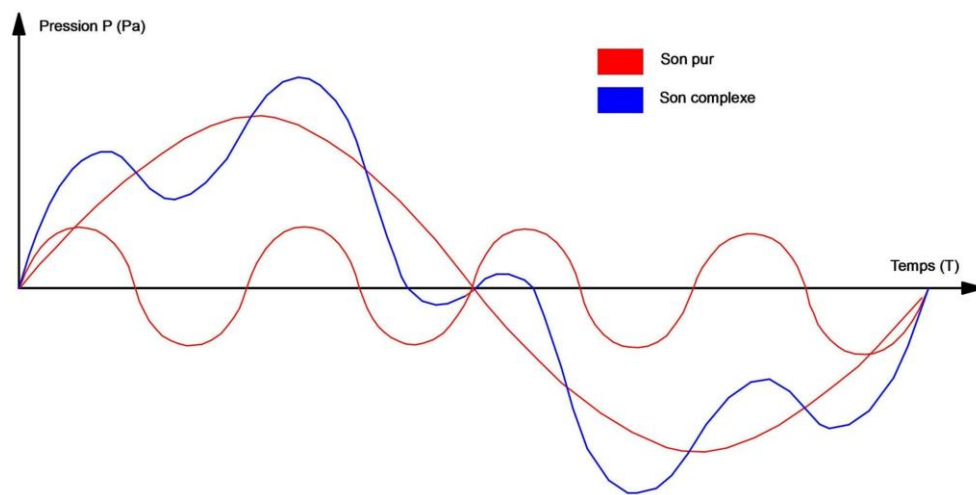


Figure I.19 : Le son pur et le son complexe (Hamayon, 2008)

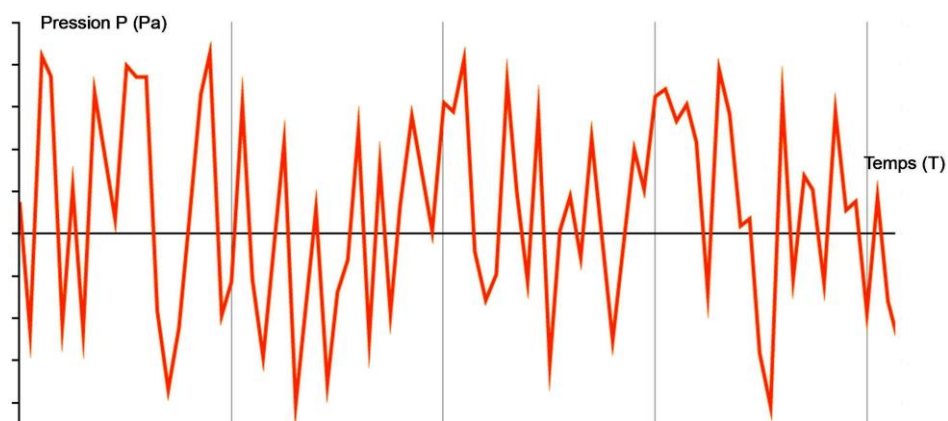


Figure I. 20 : Le son confus (Hamayon, 2008)

9.4. Le son musical

La musique est l'art de combiner les sons de manière à produire des successions agréables à l'oreille. À l'instar du bruit, la musique découle de plusieurs sons. C'est une juxtaposition harmonieuse des sons. Le bruit procure la gêne alors que la musique génère le bien être.

10. Infrasons, sons et ultrasons

L'homme entend des sons ayant des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 000 Hz (Figure I. 21). Cette fauchette dépend de la personne. Elle diminue avec l'âge. Les infrasons sont les sons ayant une fréquence inférieure à 20 Hz. ils ne sont pas audible par l'oreille humaine mais quelques animaux peuvent entendre ces sons. Les ultrasons sont les sons ayant une fréquence supérieure à 20 000 Hz.

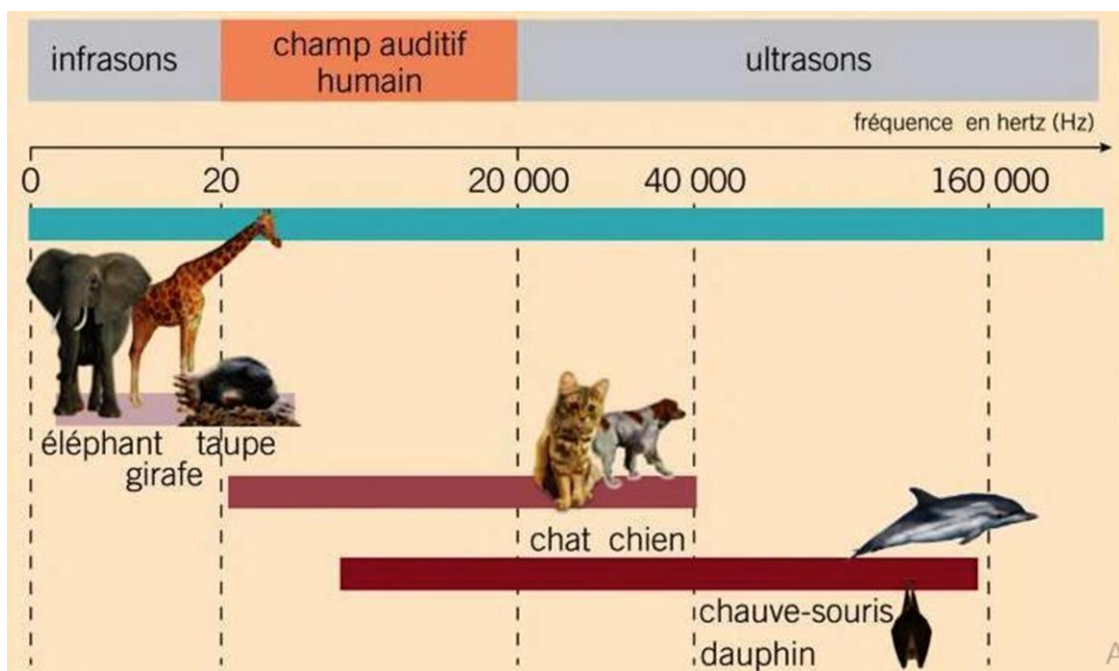


Figure I. 21 : Les infrasons, les sons et les ultrasons (Choclea.org)

11. L'analyse spectrale d'un son

Fourrier a montré que tout signal périodique peut être en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence f_n multiple d'une fréquence dite fondamentale f_1 . Ces signaux sinusoïdaux s'appellent harmoniques, leurs fréquences sont multiples de f_1 (f , $2f$, $3f$, $4f$, etc.) (Fischetti, 2003).

On appelle spectre, la décomposition du son en harmonique. Graphiquement, le spectre se compose des fréquences en abscisse et, l'énergie des harmoniques en ordonnée (Figure I.22). Il s'obtient à l'aide de l'appareil « analyseur de spectre ».

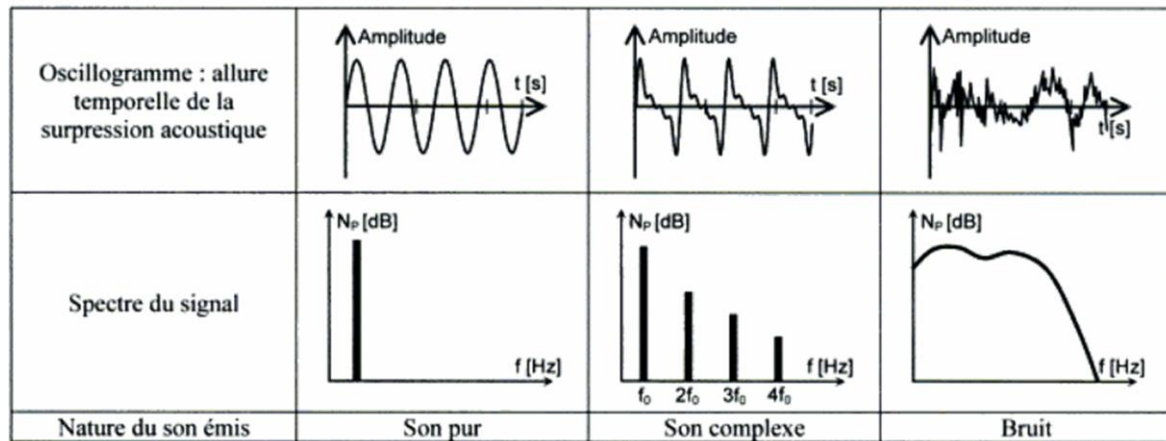


Figure I.22 : La décomposition spectrale d'un son (Thomas, 2006)

12. Le bel et le décibel

Le décibel est l'unité de mesure des sons, sans dimension. Elle est utilisée pour la mesure de l'intensité sonore et d'autres grandeurs physiques. En effet, elle permet d'exprimer le rapport entre l'intensité sonore mesurée et l'intensité sonore de référence (l'intensité la plus petite audible par l'être humain). Le décibel se compose de déci et bel, le bel vaut dix fois le décibel.

Le Bel est nommé en l'honneur du son inventeur Graham Bell. En acoustique, le bel est le logarithme base 10 du quotient d'une grandeur physique mesurée à une grandeur physique de référence.

L'oreille est un détecteur unique des sons dans la mesure où il capte des sons sur une diversité de grandeurs extrêmement grandes (Figure I.23). Le logarithme permet de traduire notre manière de percevoir les sons. En conséquence, on utilise le bel.

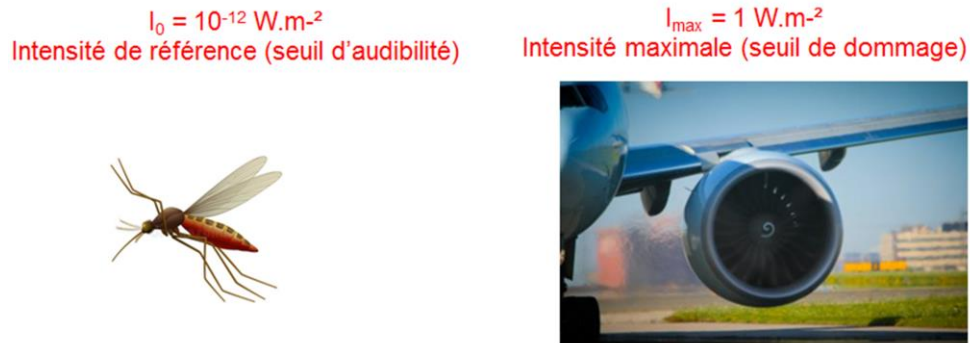


Figure I.23 : L'intensité sonore de référence et l'intensité sonore maximale chez l'être humain (Auteur, 2020)

Pour comprendre le principe, on peut imaginer un dispositif qui mesure la taille d'un atome et la taille d'un Atomium (Clipedia, 2015). La première mesure 10-10 m égale à 1 Å (ångström), tandis que le deuxième mesure 10² m. Un dispositif qui mesure une telle variété de longueurs n'existe pas (Figure I. 24). Par exemple, la latte ne s'adapte ni à la mesure d'un atome, ni à la mesure de l'Atomium. Par contre, l'oreille peut capter une grande variété sonore. Pour faire la représentation de la mesure de l'atome et celle de l'Atomium sur une même échelle, on utilise une échelle logarithmique. Le même principe est appliqué aux sons (Figure I. 25).

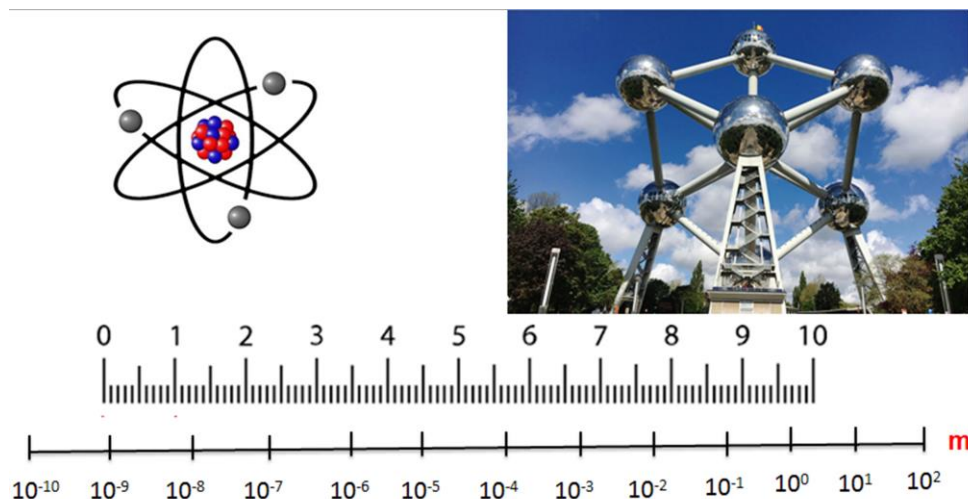


Figure I. 24 : L'atome et l'Atomium : deux grandeurs différentes, deux échelles différentes (Clipedia, 2015)

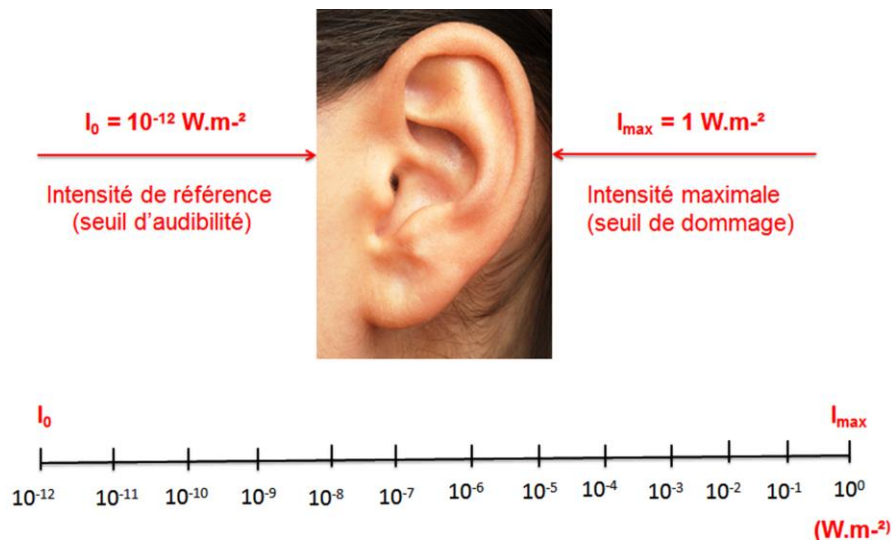


Figure I. 25 : L'échelle logarithmique appliquée aux sons (Auteur, 2020)

De l'intensité au décibel (Figure I. 26), nous avons:

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

$$I_{\max} = 1 \text{ W.m}^{-2}$$

Si on veut écrire I_{\max} par rapport à I_0 , on aura :

$$I_{\max} = X I_0$$

$$I_{\max} = 10^{12} \times I_0 = 10^{12} \times 10^{-12} = 1.$$

$$I_0 = 10^{-12} = 10^0 \times 10^{-12} = 10^{-12}$$

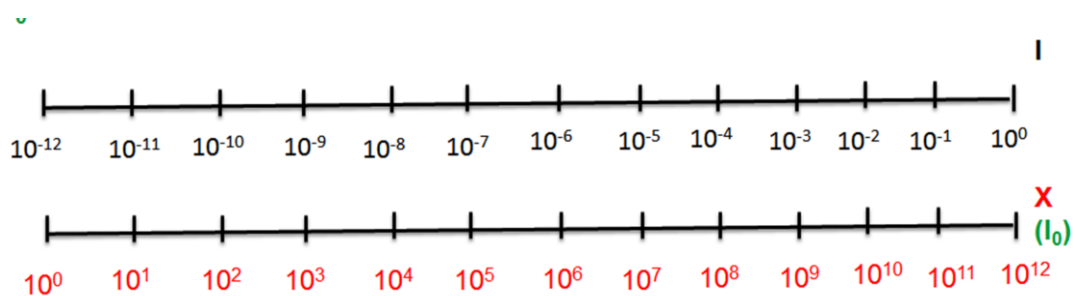


Figure I. 26 : I par rapport à I_0 (Clipedia, 2015)

La relation entre l'intensité physique et l'intensité perçue par l'oreille est (Clipedia, 2005) :

$$y = \log(x) \quad (I.10)$$

y: l'intensité perçue par l'oreille

x: l'intensité physique exprimée en W.m^{-2}

$$1 = \log(10^1)$$

$$2 = \log(10^2)$$

$$3 = \log(10^3)$$

$$4 = \log(10^4) \text{ (Figure I. 27)}$$

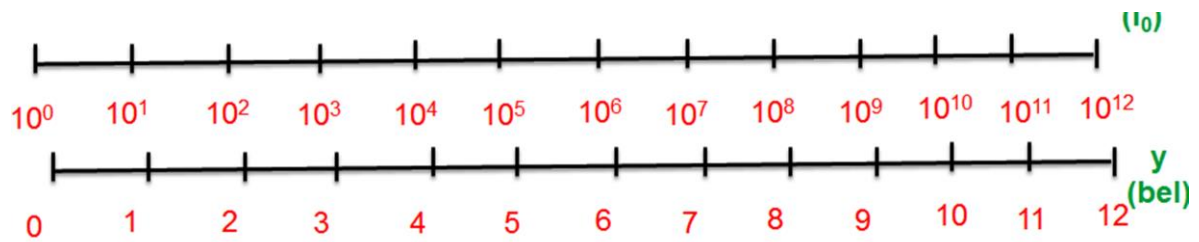


Figure I. 27 : De I_0 au bel (Clipedia, 2015)

1 bel = 10 décibel

$y = 10 \log(x)$ dB (Figure I. 28)

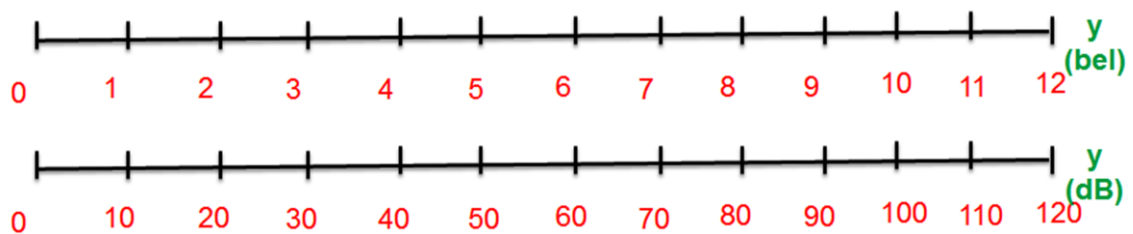


Figure I. 28 : Du bel au décibel (Clipedia, 2015)

12.1. Addition des décibels

Ce qu'il faut retenir, c'est qu'on additionne les intensités et les puissances sonores mais on n'additionne jamais les décibels (Hamayon, 2008).

$$\begin{aligned} I_{\text{Total}} &= \sum I \\ P_{\text{Total}} &= \sum P \end{aligned} \quad (\text{I.11})$$

Un son de faible intensité ajouté à un son de forte intensité ne change pas ce dernier. Par contre, deux sons de même intensité ajoutés l'un à l'autre augmentent de **3dB** le niveau de l'un d'eux.

12.1.1. L'addition de deux niveaux sonores

Si on a deux sources S_1 et S_2 , la superposition de deux niveaux sonores L_1 et L_2 (les deux sources fonctionnent simultanément), émis par les deux sonores est réalisée en suivant la formule suivante (Hamayon, 2008):

$$L_r = 10 \log (10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2}) \quad (I.12)$$

L_1 (dB): le niveau sonore en provenance de la première source S_1 fonctionnant seule

L_2 (dB): le niveau sonore en provenance de la première source S_2 fonctionnant seule

L_r (dB): le niveau sonore résultant au point de réception en provenance des deux sources sonores.

Pour additionner deux niveaux sonores, il convient en premier lieu de calculer leur différence, puis, d'utiliser le tableau ci-dessous (Tableau I. 2) ou l'abaque (Figure I. 29).

Différence entre les deux niveaux	Nombre de décibels à ajouter au niveau plus élevé
0	3
0.5	2.8
1	2.5
1.5	2.3
2	2.1
2.5	1.9
3	1.8
3.5	1.6
4	1.5
4.5	1.3
5	1.2
5.5	1.1
6	1
6.5	0.9
7	0.8
7.5	0.7
8	0.6
8.5	
9	0.5
9.5	
10	0.4

10.5	0.3
11	
11.5	
12	
12.5	0.2
13	
13.5	
14	
14.5	0.1
15	
15.5	
16	

Tableau I.2 : L'addition de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008)

Application

On a deux sources S_1 et S_2

$L_1 = 40$ dB

$L_2 = 45$ dB

$45 - 40 = 5$ dB

$45 + 1,2 = 46,2$ dB

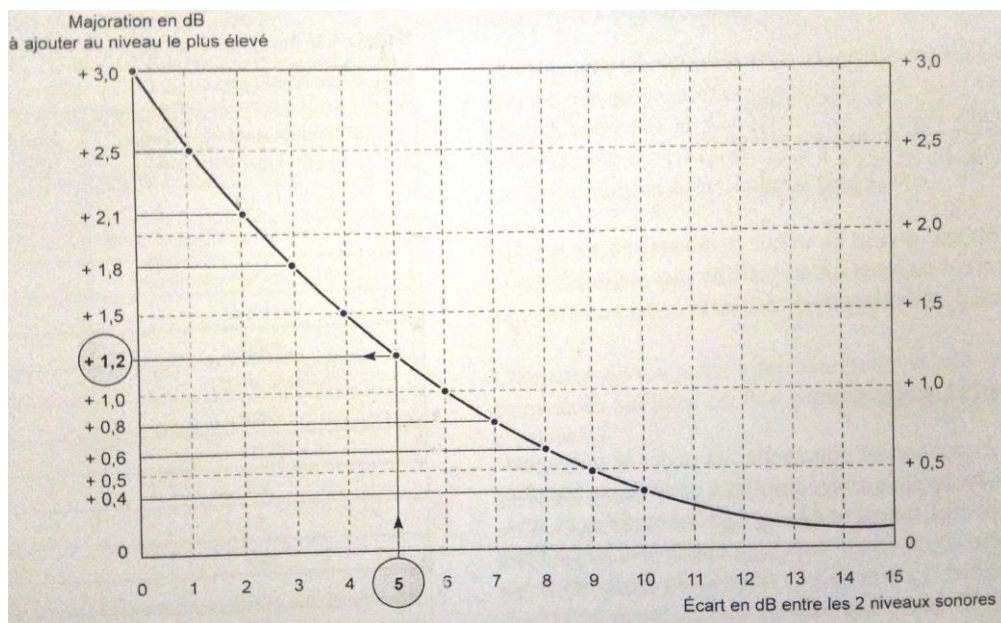


Figure I. 29 : L'addition de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008).

12.1.2. Addition de plus de deux niveaux sonores

Pour additionner plus de deux niveaux sonores, nous utilisons la formule suivante (Hamayon, 2008):

$$L_r = 10 \log (10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n}) \quad (I.13)$$

$$L_r = \sum 10^{0,1L} \quad (I.14)$$

L_r : le niveau sonore résultant au point de réception en provenance des sources sonores

L : le niveau sonore de chacune des sources quand elle fonctionne seule (dB)

Application

Soit quatre sources sonores qui fonctionnent simultanément dont les niveaux sonores sont les suivants:

$L_1 = 40$ dB

$L_2 = 40$ dB

$L_3 = 37$ dB

$L_4 = 47$ dB

Le niveau sonore résultant est égal à:

$$L_r = 10 \log (10^4 + 10^4 + 10^{3,5} + 10^{4,7})$$

$$L_r = 47,38 \text{ dB}$$

12.2. Soustraction de deux niveaux sonores

Pour soustraire deux niveaux sonores, nous utilisons la formule suivante (Hamayon, 2008):

$$L_r = 10 \log (10^{0,1L_1} - 10^{0,1L_2}) \quad (I.15)$$

L_r : le niveau sonore résultant (dB)

L_1 : le niveau sonore provenant de l'une des sources (dB)

L_2 : le niveau sonore provenant de l'autre source (dB)

Pour soustraire deux niveaux sonores, il convient en premier lieu de calculer leur différence, puis, d'utiliser le tableau ci-dessous (Tableau I. 3) ou l'abaque (Figure I.30)

Différence entre les deux niveaux	Nombre de décibels à ajouter au niveau plus élevé
0.5	9.6
1	6.9
1.5	5.3
2	4.3
2.5	3.6
3	3
3.5	2.6
4	2.2
4.5	2
5	1.7
5.5	1.4
6	1.3
6.5	1.1
7	1
7.5	0.9
8	0.7
8.5	
9	0.6
9.5	0.5
10	
10.5	0.4
11	
11.5	0.3
12	
12.5	
13	0.2
13.5	
14	
14.5	
15	0.1
15.5	
16	

Tableau I.3 : La soustraction de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008)

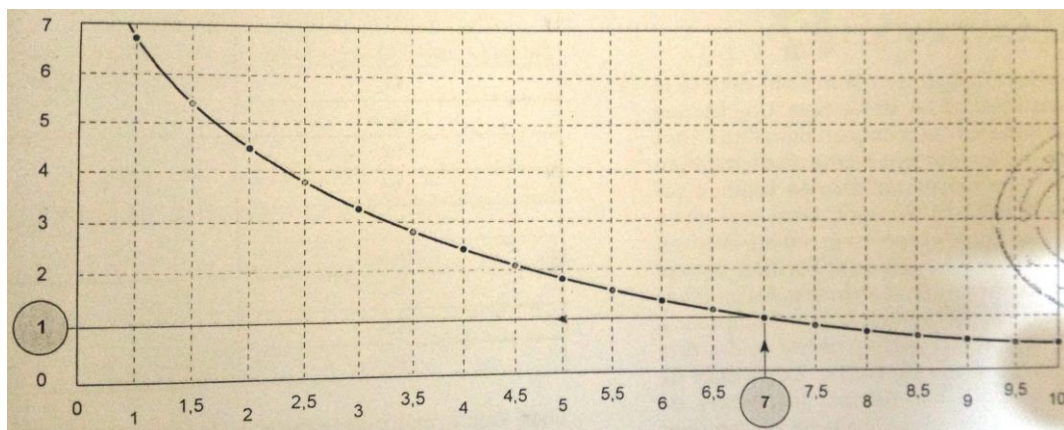


Figure I. 30 : La soustraction de deux niveaux sonores (Hamayon, 2008)

13. La physiologie de l'acoustique

13.1. La physiologie de l'oreille humaine

L'oreille humaine comporte trois parties assurant chacune une fonction précise: externe, moyenne et interne (Figure I.31).

13.1.1. L'oreille externe

L'oreille externe a pour but de capter les ondes sonores. Elle se compose des éléments suivants:

1. Le pavillon
2. Le conduit auditif externe
3. Le tympan

13.1.2. L'oreille moyenne

L'oreille moyenne est composée d'une chambre creusée dans un os (le rocher), une chaîne des osselets (le marteau, l'enclume et l'étrier) et la trompe d'Eustache (Sherwood, 2012).

13.1.3. L'oreille interne

L'oreille externe est composée de l'organe vestibulaire et la cochlée. Le premier, représente l'organe de l'équilibre. La cochlée, quant à elle, constitue l'organe de l'audition. Ayant une forme d'escargot, elle est remplie d'endolymphe. Elle englobe également un grand nombre de cellules ciliées, stimulées par le mouvement de l'endolymphe. Le nerf cochléaire transmet les informations au cerveau qui interprète le message sonore (Sherwood, 2012). Les sons sont captés par l'oreille externe qui se compose du pavillon auriculaire, un canal auditif externe. Le son traverse le canal auditif externe pour arriver à l'oreille moyenne. Il arrive au tympan. Ce dernier est une membrane circulaire flexible qui commence à vibrer une fois l'onde sonore l'atteinte (comme une membrane de microphone). Les ondes sonores sont véhiculées jusqu'à l'oreille moyenne par le mouvement du tympan (Bagot, 1999). L'oreille moyenne se compose d'une chaîne ossiculaire (le marteau, l'enclume et l'étrier), le marteau est soudé sur le tympan. Cette chaîne relie le tympan à l'entrée de l'oreille interne (la fenêtre ovale). Elle joue le rôle d'un amplificateur (50 à 60 fois) (sans elle, très grande partie de l'énergie acoustique est perdue) et d'un adaptateur d'impédance entre le milieu aérien du conduit auditif externe et le milieu liquidien de

la cochlée en optimisant le transfert d'énergie sonore (Bagot, 1999). Dans l'oreille interne, on trouve la cochlée (qui ressemble à une coquille d'escargot). C'est l'organe principal de la perception auditive qui contient entre 15 et 20 mille cellules ciliées qui détectent les vibrations du liquide en générant l'influx nerveux qui est acheminé vers le cerveau par le nerf auditif (Figure I.32).

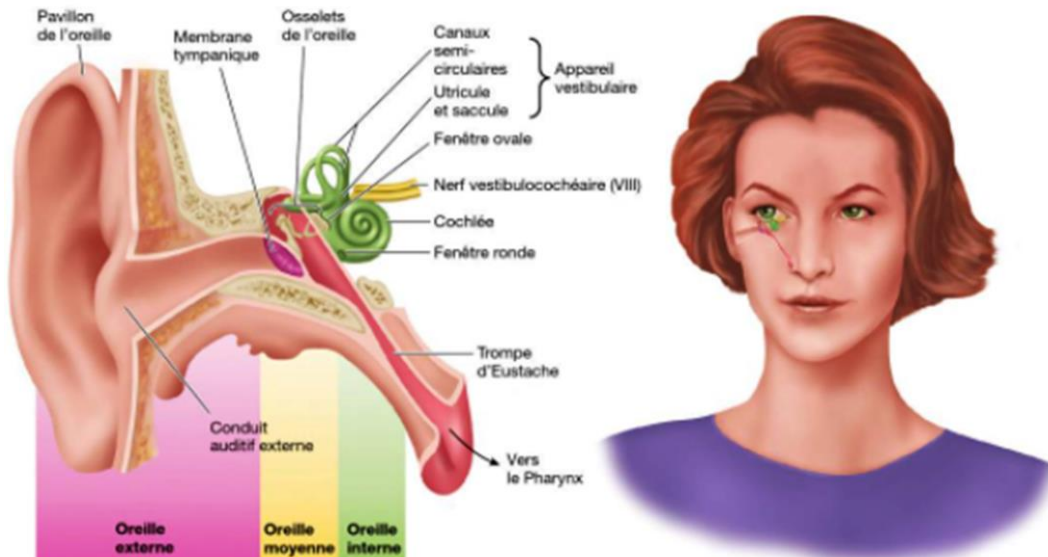


Figure I.31 : La physiologie de l'oreille humaine (Sherwood, 2012)

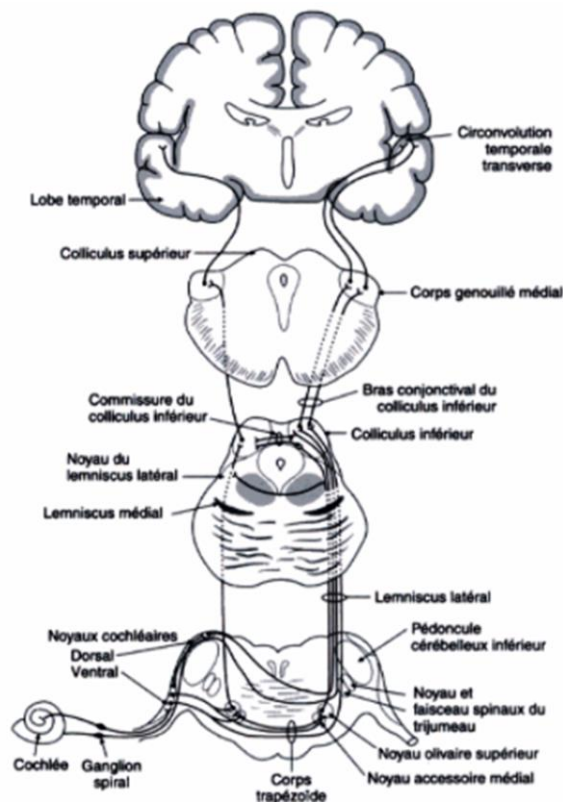
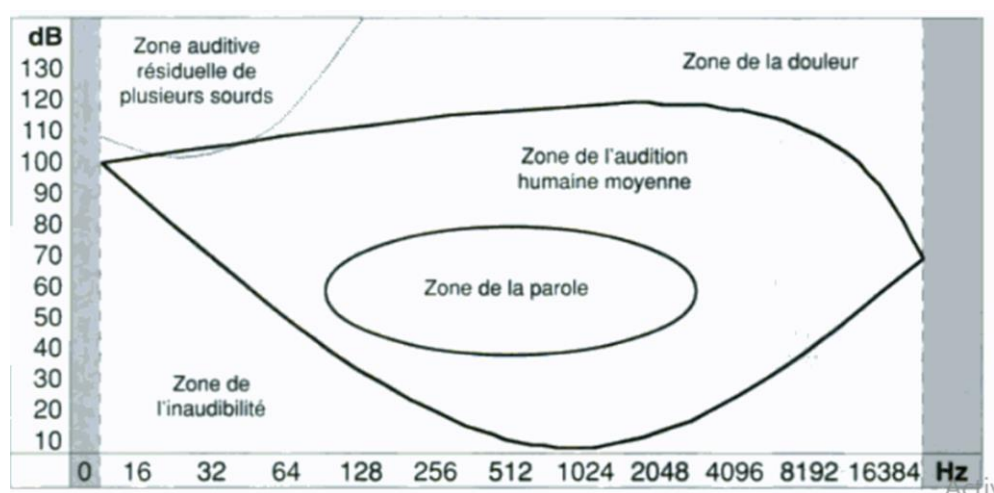


Figure I.32 : Schéma représentatif de la voie auditive (Pritchard *et al*, 2002)

13.2. La sensation auditive

13.2.1. Courbe d'audibilité et courbes isosoniques

Comme il a été mentionné avant, les fréquences audibles se situent entre 20Hz et 20000 Hz. Aussi, la hauteur du son dépend de sa fréquence, il est aigu lorsque sa fréquence est élevée. Par contre, il est grave lorsque sa fréquence est basse. Les infrasons et les ultrasons ne sont pas audibles par l'être humain. Par conséquent, si l'oreille humaine est sensible aux fréquences graves, elle est également sensible aux fréquences médiums et aux fréquences aigues. Il est confirmé que le champ auditif varie d'une personne à une autre selon l'âge, l'état de santé etc. Ce champ commence par le seuil d'audibilité (la limite inférieure de l'audition) de 0dB⁵ jusqu'au seuil de douleur (bruit fort) de 130dB. La zone comprise entre les deux courbes représente la zone de l'audition humaine moyenne (Figure I. 33). S'agissant des points situés sur les deux courbes, ils représentent les sons à la limite de l'audibilité. Tous les points situés hors des deux courbes, représentent les sons inaudibles.



Les fréquences audibles se situent entre 500 et 5000Hz. Des courbes isosoniques ont été établies par Fletcher et Munson en 1930 (Figure I.34). Elles ont pour but de représenter les niveaux d'égale sensation de l'oreille humaine en fonction de la fréquence (Margollé *et al*, 2016). Le phone est l'unité utilisée pour caractériser le niveau d'isotonie d'un son. En ordonnées, s'indique le niveau sonore de la source.

⁵ La valeur 0db ne dit pas qu'il y a une absence totale de bruit.

⁶ L'audiogramme est un graphique qui nous informe sur la capacité auditive d'une personne. Ce graphique est le résultat d'un test auditif fait par un spécialiste pour savoir si le patient souffre ou pas d'une déficience auditive.

En abscisses, s'indique la fréquence du son émis par la source. Quant aux lignes bleues (courbes de même sensation auditive), elles représentent le niveau sonore perçu par l'oreille. Un son de fréquence 1000 Hz et 50 dB de niveau d'intensité, paraît aussi fort qu'un son de fréquence 300 Hz et de niveau d'intensité 58 dB.

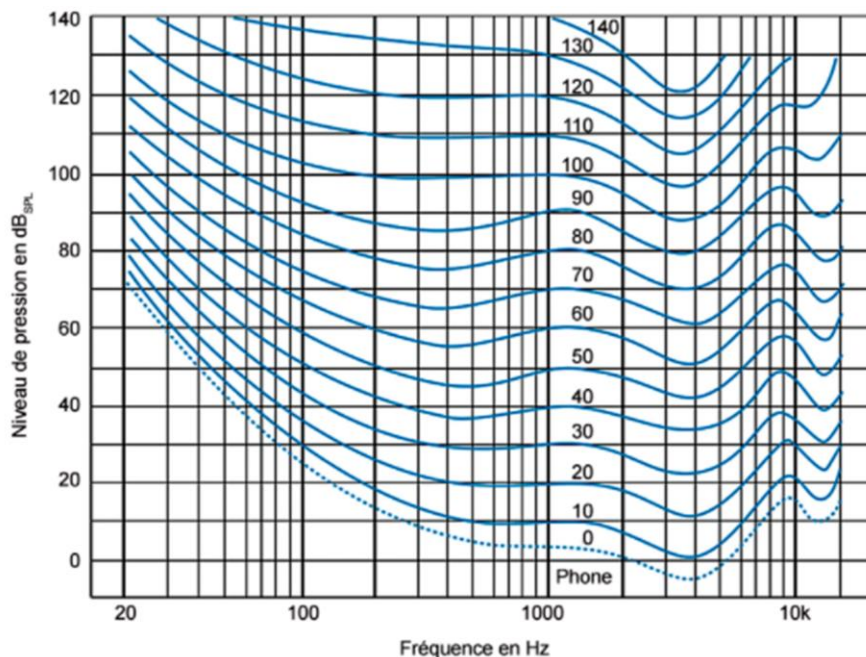


Figure I.34 : Les courbes isosoniques (Margollé *et al*, 2016)

Application

1. A quel niveau sonore sera perçu un son de fréquence 100 Hz émis à 50 dB?
On va tracer un trait vertical sur la fréquence de 100 Hz, puis on va tracer un trait horizontal sur le niveau sonore de 70 dB. L'intersection entre les deux traits donne le niveau sonore perçu par l'oreille qui est d'environ 62 dB.
2. Une source sonore émet un son ayant une fréquence de 100 Hz. Quel doit être le niveau sonore pour que l'oreille puisse le détecter ?
On va tracer un trait vertical correspondant à la fréquence 100 Hz puis réaliser l'intersection entre ce trait et la courbe de niveau 0 dB (Le seuil d'audibilité). La valeur projetée sur l'axe des coordonnées nous donne un niveau sonore de la source de 25 dB.

13.2.2. Le décibel pondéré

Nous avons vu dans ce qui précède, que l'oreille humaine ne perçoit pas les fréquences de la même manière. Aussi, deux sons ayant le même niveau sonore en dB peuvent offrir deux sensations différentes (Fischetti, 2003). Si on prend deux sons : S_1 et S_2 dont le niveau sonore est le même. Leurs répartitions fréquentielles sont montrées dans le tableau ci-dessous (Tableau I.4).

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000
Son 01	65	60	65	80	70	85
Son 02	85	70	80	65	65	60

Tableau I.4 : Répartition fréquentielle de deux sons ayant le même niveau en décibel (Fischetti, 2003)

En mesurant le niveau global de deux sons en dB, on trouve la même valeur. Par contre, la sensation auditive pourrait être différente du fait que l'énergie du son 01 est concentrée sur les hautes fréquences tandis que celle du son 02 est concentrée sur les basses fréquences. Ainsi, le son 02 pourrait être perçu avec un taux plus faible que celui du son 01. Par conséquent, le décibel est inapproprié pour traduire la sensation subjective (Fischetti, 2003). Le décibel pondéré a pour objectif de compenser les variations de perception auditive selon la fréquence pour le même niveau sonore en dB. Il y a trois courbes pondérations A, B et C (Figure I.35).

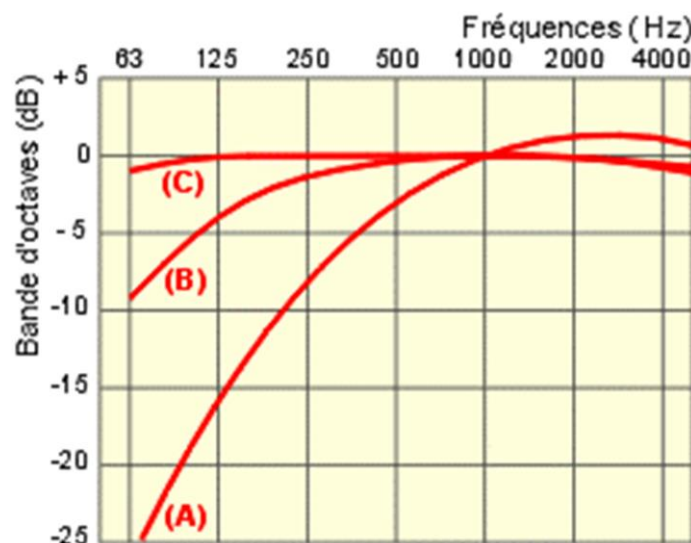


Figure I.35 : Les courbes de pondération (energieplus-lesite.be)

La courbe de pondération A correspond aux niveaux sonores inférieurs à 55 dB dont le niveau mesuré s'exprime en dB(A). La courbe de pondération B correspond aux niveaux sonores compris entre 55 dB et 85 dB dont le niveau mesuré s'exprime en dB(B). La courbe de pondération C, quant à elle, est pour les niveaux supérieurs à 85 dB. Le niveau sonore mesuré s'exprime en dB (C) (Hamayon, 2008).

La pondération A est la plus utilisée du fait qu'elle correspond aux niveaux sonores les plus fréquents dans la vie quotidienne. Par contre, les pondérations B et C sont utilisées pour les niveaux forts (milieu industriel et autres). Dans le domaine du bâtiment, on utilise la courbe de pondération A (Tableau I. 5) du fait que l'amplitude des niveaux de pressions transmis est généralement faible.

Fréquences (Hz)	Pondération (dB)
63	-26.2
125	-16.1
250	-8.6
500	-3.2
1000	0
2000	+1.2
4000	+1
8000	-1.1

Tableau I.5 : Les valeurs de la pondération A (Hamayon, 2008)

Pour calculer le niveau pondéré, on calcule la valeur de pondération A de chaque bande puis, on fait l'addition des niveaux dans chaque bande. Si on prend le même exemple en dessus, on aura le résultat mentionné dans le tableau ci-dessous (Tableau I.6). Après le calcul du niveau global (addition des niveaux pour chaque son), on obtient 87 dB pour le son 01 et 78.4 dB pour le son 02.

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000
Son 01 (dB)	65	60	65	80	70	85
Son 01 (dBA)	49.5	51.5	62	80	71	86
Son 02 (dB)	85	70	80	65	65	60
Son 02 (dBA)	69.5	61.5	77	65	66	61

Tableau I.6 : Les valeurs pondérées pour chaque bande (Fischetti, 2003)

13.2.3. Le niveau équivalent

Dans le cas de l'évaluation d'une nuisance sonore, il ne suffit pas de mesurer le niveau à un instant donné du fait que le bruit est fluctuant au cours du temps (Fischetti, 2003). Partant, on effectue une moyenne pendant une certaine durée T. On appelle cette moyenne « niveau de bruit équivalent ». La durée peut être une heure, une journée, une soirée, ou une nuit.

14. Le bruit

14.1. Définition

Le bruit est un son ou un ensemble de sons gênants. C'est un signal nuisible pour l'être humain, en gênant son activité normale. Le bruit est un mélange de sons, de plusieurs fréquences, de plusieurs niveaux.

La nuisance de bruit pourrait être l'origine de quelques problèmes qui sont:

1. La surdité: si son niveau dépasse la valeur critique.
2. La réduction du rendement du travail
3. Le bruit peut être simplement ennuyeux et provoquant ainsi la perte du sommeil, les crises nerveuses et, le stress.

14.2. Acouphène et hyperacousie

L'acouphène est une sensation auditive anormale que seule la personne atteinte perçoit. Autrement dit, la personne ayant le symptôme d'acouphène entend occasionnellement ou continuellement des sifflements sans stimulation sonore extérieure (Sarzod, 2015 ; Larousse 2010).

L'hypoacousie est un trouble qui affecte l'audition. Dans ce cas, La personne atteinte devient hypersensible aux sons qui sont habituellement tolérés chez la personne non atteinte. En d'autres termes, le seuil de tolérance au bruit de cette personne atteinte est plus faible (Larousse, 2010).

14.3. Le bruit de fond

Le bruit de fond désigne les signaux parasites existant pendant une période. C'est une multitude de fréquence qui va s'ajouter à un signal sonore. Ça peut être généré par le vent, les conversations, les machines ou les équipements, la circulation, les sons provenant des couloirs, des autres pièces etc...

14.4. Le bruit ambiant

Le bruit ambiant est défini comme étant l'ensemble des bruits environnants. Au moment où il y a une source sonore particulière, le bruit ambiant englobe le bruit émis par cette source et les autres bruits résiduels. Bref, il désigne l'ensemble des bruits émis par toutes les sources proches ou lointaines.

14.5. Le bruit résiduel

Le bruit résiduel est le niveau sonore en l'absence de bruit particulier généré par exemple par une machine.

14.6. Le bruit émergence

L'émergence est la différence entre le bruit ambiant (contenant le bruit particulier) et le bruit résiduel composé de bruits habituels extérieurs ou intérieurs (Croguennoc et al, 2011).

14.7. Courbes d'évaluation du bruit

14.7.1. Courbes NR

Définies par la norme NF S 30-010, les courbes NR sont des courbes qui représentent une impression auditive égale. Le numéro de chaque courbe correspondant à son niveau à 1000Hz (Hamayon, 2008). Pour le respect de la courbe NR, il faut que le niveau de bruit mesuré pour chaque fréquence se situe en dessous de la courbe de référence. En d'autres termes, pour avoir un confort acoustique, on doit imposer un niveau de bruit maximal à ne pas dépasser. Si un indice d'évaluation NR20 est imposé pour un local, l'ensemble des bruits ne dépassent pas la courbe NR40 (Hamayon, 2008). Le niveau NR est défini par la courbe NR la plus élevée atteinte par le spectre. Dans le domaine de l'acoustique architecturale, les courbes NR sont utilisées pour définir les niveaux admissibles en fonction de l'usage de l'espace (Migeot, *et al*, 2016). La courbe NR 50 donne pour chaque fréquence les niveaux maximaux de pression acoustique à respecter en dB (Figure I.36). Les conditions d'écoute normale de la vie quotidienne se situent entre 35 et 40.

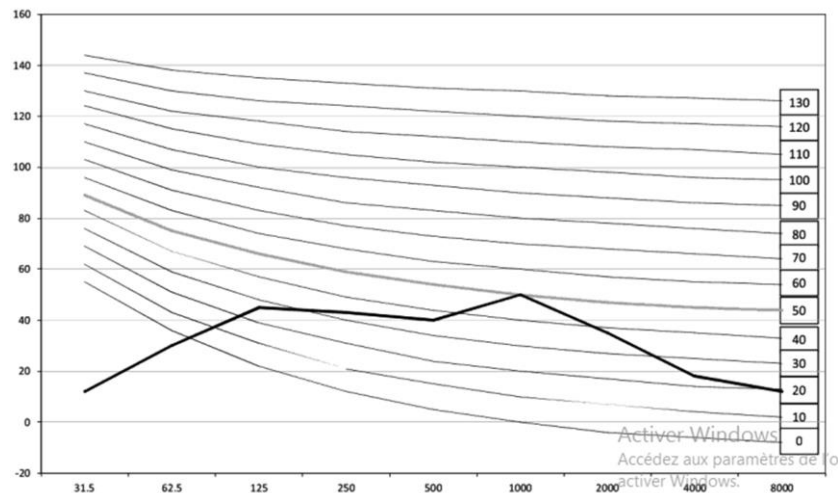


Figure I. 36 : Les courbes de NR50 (Migeot *et al*, 2016)

Les courbes NR sont utilisées comme suit : on trace le spectre du bruit par bandes d'octave sur le réseau de courbes NR. Puis, on prend l'indice de la courbe NR du rang le plus élevé atteint par le spectre. Ensuite, on verra sur quelles fréquences, il faudra porter de l'attention afin de diminuer la gêne. Il existe d'autres courbes d'évaluation du bruit comme les courbes ISO et NC. NC est utilisé aux États-Unis.

15. Le sonomètre : la mesure de bruit

Le sonomètre est un appareil de mesure de la pression acoustique (Figure I. 37). Il se compose d'un microphone qui réagit à la pression acoustique, un préamplificateur des filtres, un amplificateur et un galvanomètre. Aujourd'hui, les sonomètres sont plus développés. Cet appareil permet de mesurer le niveau de la pression global en linéaire, le niveau de pression non pondéré par octave, le niveau de pression global pondéré, le niveau de pression pondéré par octave et le temps de réverbération (Desmons, 2003).



Figure I.37 : Le sonomètre (decibelmetre.info)

Conclusion

Ce chapitre, résume l'essentiel des notions liées à la physique de l'acoustique, en concédant à l'étudiant les éléments de compréhension. L'objectif est d'initier l'étudiant aux notions clé qui lui permettent d'entamer aisément le domaine de l'acoustique architecturale. Une partie est consacrée à la physiologie de l'acoustique, en faisant un zoom sur le système auditif humain ainsi que la perception du son. Plusieurs concepts ont été définis, mais la liste n'est pas exhaustive, vu la complexité du domaine de l'acoustique.