

# TABLE DES MATIÈRES

1.1.	Définition du son .....	3
1.2.	La naissance d'un son .....	3
1.3.	Vitesse du son .....	4
1.4.	Longueur d'onde .....	4
1.5.	Période et fréquence .....	4
1.6.	Niveau de pression acoustique .....	5
1.7.	Calcul des niveaux de pression acoustique .....	8
1.8.	Le spectre acoustique .....	11
1.9.	L'oreille humaine .....	14
1.10.	La sensibilité de l'oreille humaine et le concept de sonie .....	16
1.11.	La pondération fréquentielle "A" .....	18
1.12.	Puissance et intensité d'une source sonore .....	19
1.13.	Propagation et atténuation du bruit .....	20
1.13.1.	Propagation géométrique .....	20
1.13.2.	Le vent et la température .....	21
1.13.3.	Absorption par l'air .....	23
1.13.4.	Absorption par la végétation .....	23
1.13.5.	L'influence du sol .....	23
1.13.6.	Réflexion, absorption et diffraction .....	24
1.14.	Grandeurs d'appréciation du bruit .....	26
1.14.1.	Le niveau de pression acoustique équivalent pondéré A sur une période T ( $L_{Aeq,T}$ ) .....	26
1.14.2.	Les paramètres statistiques $L_{A99}$ , $L_{A95}$ , $L_{A50}$ , ... ..	27
1.15.	Prévision des niveaux de pression acoustique .....	29
1.16.	Prévision des niveaux de pression acoustique .....	31
1.17.	Références .....	32



## 1.1. Définition du son

Le **son** peut être défini comme étant l'émission, la propagation et la réception d'ondes dans des milieux élastiques. Le son peut donc se propager dans des gaz, des liquides et des solides. Dans le présent manuel, nous allons exclusivement nous intéresser à la propagation du son dans l'air.

## 1.2. La naissance d'un son

La figure 1 illustre un piston placé de manière hermétique à l'une des extrémités d'un tube rempli d'air.

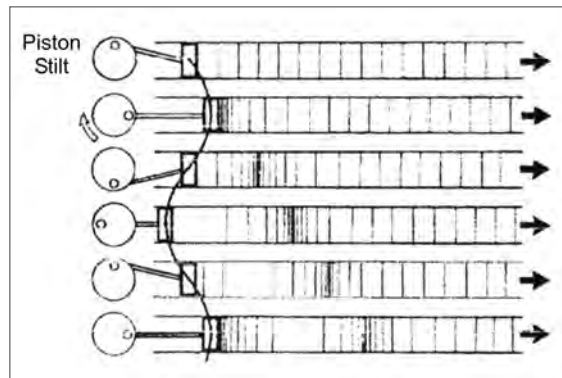


Figure 1 : Émission d'un son par le mouvement d'un piston dans un tube

Les molécules d'air, symbolisées par les lignes verticales, sont régulièrement réparties lorsque le piston est au repos. Lorsque l'on pousse le piston vers la droite, les molécules d'air sont comprimées, créant ainsi localement une augmentation de la pression de l'air (avec une valeur maximale  $\Delta p$ ), qui s'ajoute à la pression atmosphérique ambiante. Cette augmentation de la pression se propage vers la droite à une vitesse tributaire du milieu. Entre-temps, le piston s'est déplacé vers la gauche, provoquant une baisse de la pression de l'air (avec un minimum de  $-\Delta p$ ). Cette baisse de la pression se propage elle aussi vers la droite. Lorsque le piston poursuit son mouvement régulier d'aller-retour, on obtient ainsi une succession de hausses et de baisses de pression qui se déplacent à une vitesse spécifique. Voilà en quoi consiste le son. Les variations de pression qui viennent s'ajouter à la pression atmosphérique représentent la pression acoustique, notée par l'abréviation  $p$ . La pression acoustique est donc largement tributaire du temps. La différence entre le point de crête et la situation d'équilibre,  $\Delta p$ , s'appelle l'amplitude de l'onde sonore, notée  $A$ . La pression acoustique  $p$  ainsi que, très logiquement, son amplitude, sont exprimées en pascal (Pa) dans le Système International d'unités.

Dans les sons les plus courants de notre quotidien, la valeur de  $A$  est faible (comprise entre  $10^{-5}$  et 100 Pa) par rapport à la pression atmosphérique (env.  $10^5$  Pa). La pression acoustique n'est guère plus qu'une "ondulation" sur la pression atmosphérique (figure 2).

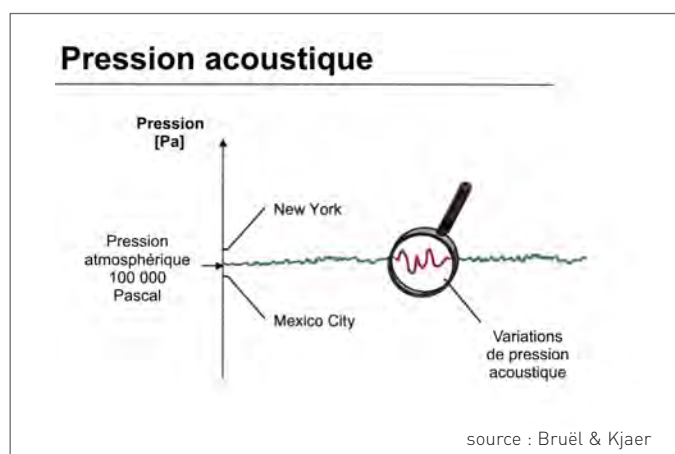


Figure 2 : La pression acoustique n'est guère plus qu'une ondulation sur la pression atmosphérique

### 1.3. Vitesse du son

La **vitesse** à laquelle le son se propage dans l'air dépend largement du milieu : à température ambiante, le bruit se déplace dans l'air à près de 344 m/s. Sa vitesse est d'environ 1400 m/s dans l'eau et peut même atteindre 6000 m/s dans le granit. La vitesse du son dans l'air est également liée, dans une faible mesure, à la température et à l'humidité relative.

### 1.4. Longueur d'onde

Un instantané des hausses et des baisses de la pression de l'air provoquées par le piston dont le fonctionnement est illustré à la figure 1 fait apparaître un mouvement sinusoïdal de la pression de l'air le long de l'axe du tube (figure 3). La distance entre deux points équivalents (par exemple entre deux crêtes successives) s'appelle la **longueur d'onde** de l'onde sonore. La longueur d'onde est notée par le symbole  $\lambda$  et s'exprime en mètres.

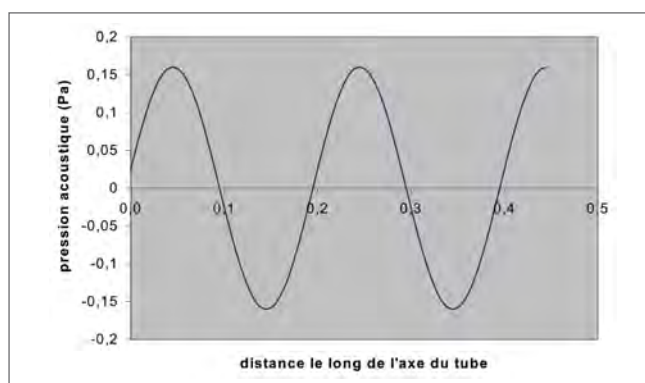


Figure 3 : Déplacement de l'onde sonore le long de l'axe du tube

### 1.5. Période et fréquence

Un observateur qui enregistrerait le niveau de pression acoustique à un point quelconque de l'axe du tube pendant un temps déterminé, obtiendrait un motif sinusoïdal de la pression acoustique en fonction du temps (figure 4). Le laps de temps qui s'écoule entre deux points équivalents s'appelle la période; elle est notée par le symbole  $T$  et s'exprime en secondes. La **fréquence** "f" représente le nombre de cycles que l'observateur enregistre par seconde et n'est rien d'autre que la valeur inverse de la période :

$$f = 1/T \quad \text{(équation 1)}$$

L'unité de fréquence est de 1/s; on l'appelle également hertz (Hz).

La longueur d'onde, la fréquence et la vitesse du son sont liées par le rapport suivant :

$$\lambda = c/f \quad \text{(équation 2)}$$

La longueur d'onde est exprimée en mètres (m).

L'oreille humaine est en mesure de percevoir les sons dont la fréquence est comprise entre 20 et 20 000 Hz, ce qui correspond respectivement à une longueur d'onde de 17 m et de 1,7 cm. Le Tableau 1 reprend quelques valeurs de fréquences, accompagnées des longueurs d'onde correspondantes.

fréquence (Hz)	20	50	100	250	500	1000	2000	4000	5000	10000	20000
longueur d'onde (m)	17	6,9	3,4	1,4	0,69	0,34	0,17	0,086	0,069	0,034	0,017

Tableau 1: Quelques exemples de valeurs de fréquences, accompagnées des longueurs d'onde correspondantes pour le son

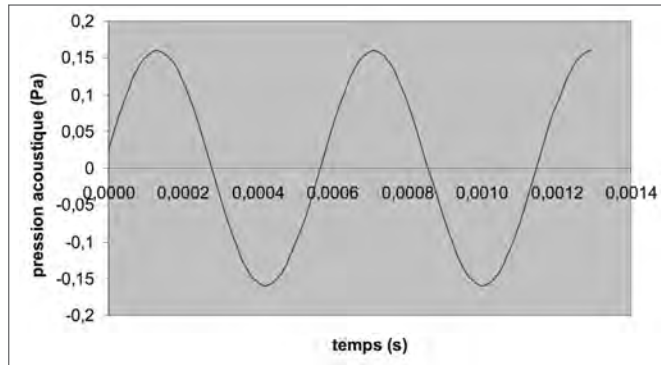


Figure 4 : L'évolution de la pression acoustique en fonction du temps

## 1.6. Niveau de pression acoustique

La pression acoustique est liée à la "force" subjective ou "sonie" avec laquelle on enregistre un son. Plus la pression acoustique est élevée, plus la pression acoustique subjective est forte. Une oreille humaine normalement constituée peut percevoir des sons dont la pression acoustique se situe entre 20  $\mu$ Pa et 100 Pa (à 1000 Hz). A 1000 Hz, 20  $\mu$ Pa correspondent à ce qui est tout juste audible et que l'on appelle le seuil d'audibilité. A 100 Pa, la plupart des observateurs expérimentent une sensation de douleur (le seuil de douleur) (figure 5).

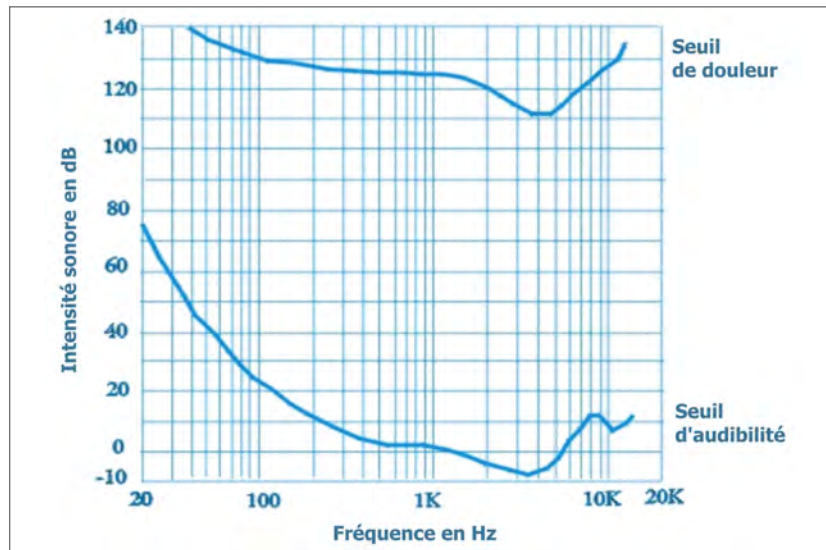


Figure 5 : Courbes du seuil d'audibilité et du seuil de douleur pour une personne à l'ouïe normale. Les sons dont le rapport fréquence / niveau de pression acoustique s'inscrit dans la zone comprise entre les deux courbes sont audibles sans être douloureux.

On peut exprimer l'intensité du son par la pression acoustique (ou par son amplitude). Quelques exemples de valeurs type sont illustrés à la figure 6.

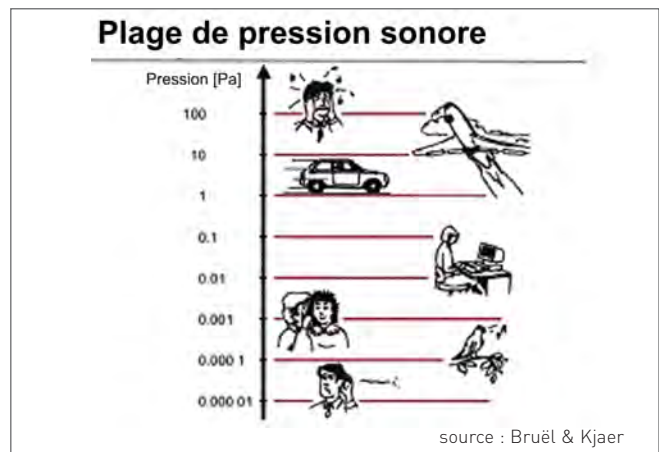


Figure 6 : Quelques valeurs type de pression acoustique

Cette manière de l'exprimer n'est cependant pas très pratique étant donné le champ très large du domaine audible de l'homme (les pressions acoustiques proches du seuil d'audibilité et du seuil de douleur sont séparées par un facteur supérieur à un million). Qui plus est, l'oreille ne réagit pas de manière linéaire aux stimuli auditifs, mais bien de manière logarithmique. Pour pouvoir exprimer l'intensité acoustique, on a donc opté pour un nombre sur une échelle logarithmique, qui se définit comme suit :

$$L_p = 10 \log (p^2/p_0^2) \quad (\text{équation 3})$$

où  $L_p$  représente le **niveau de pression acoustique**, soit un nombre sans dimension. Enfin, on attribue l' "unité" décibel, notée dB. La valeur  $p_0$  est une pression de référence qui est fixée par convention internationale à  $20 \mu\text{Pa}$ , c'est-à-dire au seuil d'audibilité d'un individu à 1000 Hz. L'échelle des décibels est un instrument beaucoup plus maniable pour exprimer l'intensité sonore (figure 7) : le seuil d'audibilité correspond à 0 dB et le seuil de douleur à 130 dB (tous deux à 1000 Hz).

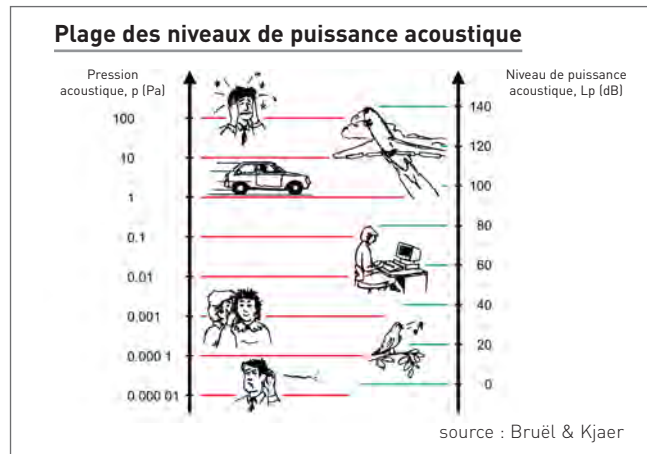


Figure 7 : La pression acoustique comparée au niveau de pression acoustique

La conversion de la pression acoustique en niveau de pression acoustique peut se faire à l'aide de l'équation 3, du graphique de la figure 8 ou du tableau 2. Quelques règles empiriques sont reprises dans la figure 9.

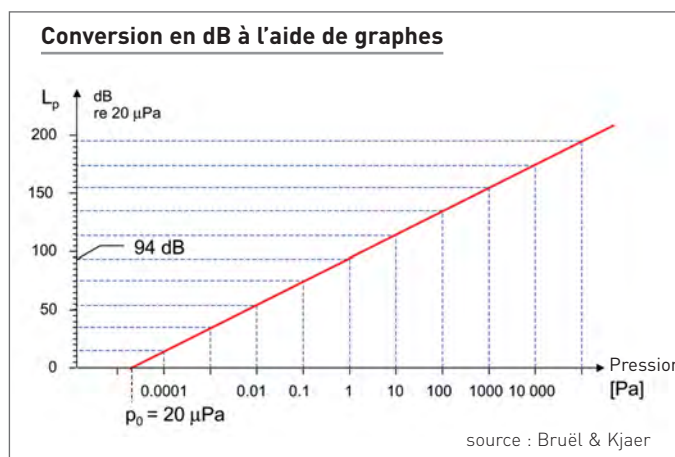


Figure 8 : Conversion de la pression acoustique en niveau de pression acoustique et vice-versa au moyen de la méthode graphique

Rapport pressions acoustiques	Différence niveau de pression acoustique (dB)	Rapport pressions acoustiques	Différence niveau de pression acoustique (dB)
1,000	0,000	1,000	0,000
0,989	-0,100	1,012	0,100
0,977	-0,200	1,023	0,200
0,966	-0,300	1,035	0,300
0,955	-0,400	1,047	0,400
0,944	-0,500	1,059	0,500
0,933	-0,600	1,072	0,600
0,923	-0,700	1,084	0,700
0,912	-0,800	1,096	0,800
0,902	-0,900	1,109	0,900
0,891	-1,000	1,122	1,000
0,841	-1,500	1,189	1,500
0,794	-2,000	1,259	2,000
0,708	-3,000	1,413	3,000
0,631	-4,000	1,585	4,000
0,562	-5,000	1,778	5,000
0,501	-6,000	1,995	6,000
0,447	-7,000	2,239	7,000
0,398	-7,000	2,512	7,000
0,355	-9,000	2,818	9,000
0,316	-10,000	3,162	10,000
0,251	-12,000	3,981	12,000
0,200	-14,000	5,012	14,000
1,158	-16,000	6,310	16,000
0,126	-18,000	7,943	18,000
0,100	-20,000	10,000	20,000
0,0316	-30,000	31,620	30,000
0,0100	-40,000	100,000	40,000
0,0032	-50,000	316,200	50,000
$10^{-3}$	-60,000	103	60,000
$10^{-4}$	-80,000	104	80,000
$10^{-5}$	-100,000	105	100,000

Tableau 2 : Conversion de la pression acoustique en niveau de pression acoustique et vice-versa au moyen de valeurs numériques tabulées.

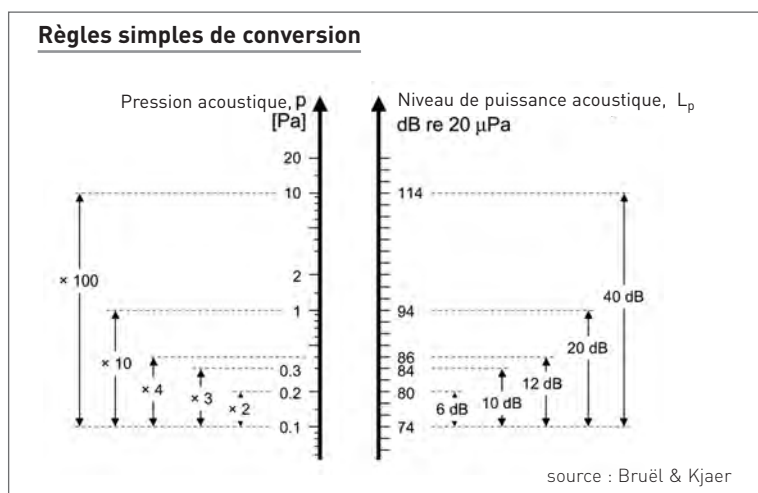


Figure 9 : Quelques règles empiriques pour la conversion de la pression acoustique en niveau de pression acoustique

Le niveau de pression acoustique  $p$  est, comme nous l'avons dit précédemment, tributaire du temps et change très rapidement de signe (dans le cas d'un son pur de 1000 Hz, 1000 fois par seconde). Cela pose un problème lorsque l'on souhaite utiliser, dans l'équation 3, la pression acoustique précédemment définie et variant avec le temps. Pour obtenir une valeur utilisable d'un point de vue pratique et lisible au départ d'un sonomètre, on n'utilise pas la valeur  $p(t)$  dans la pratique, mais une valeur moyenne au carré, intégrée sur une courte période de durée  $\tau$ :

$$p_{rms} = ((1/\tau) \int p^2(t)dt)^{1/2} \quad (\text{équation 4})$$

C'est ce  $p_{rms}$  (root-mean-square) que l'on utilise<sup>1</sup> pour calculer  $L_p$  dans l'équation 3.

La constante de temps  $\tau$  détermine jusqu'à quel point la valeur intégrée de  $L_p$  est fidèle à la valeur réelle. En ce qui concerne l'intégration dans l'équation 4, on parle d'application d'une pondération temporelle. Dans la plupart des applications, on choisit actuellement  $\tau = 0,125$  s (voir plus loin). Dans ce cas, on parle d'une pondération temporelle "rapide", également notée "F" (fast). On utilisait auparavant, principalement pour des raisons techniques, la pondération temporelle "lente" ( $\tau = 1$  s), notée "S" (slow).

## 1.7. Calcul des niveaux de pression acoustique

L'application d'une échelle logarithmique a une influence particulière sur le calcul des niveaux de pression acoustique. A un point d'observation situé à une distance déterminée d'une source sonore (par exemple un camion dont le moteur tourne), on enregistre un niveau de pression acoustique  $L_{p1}$  (figure 10).

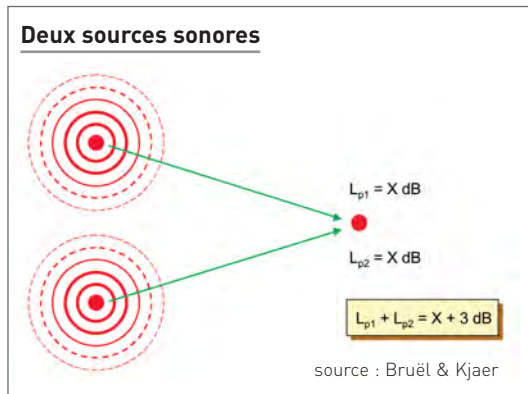


Figure 10 : En cas de présence d'une deuxième source sonore identique, l'observateur note une augmentation du niveau de pression acoustique

Quel niveau de pression acoustique enregistre-t-on lorsque l'on place une seconde source sonore à proximité du point d'observation, laquelle engendre un niveau de pression acoustique  $L_{p2}$  lorsque la première source n'est pas active ? Dans ce cas, on ne doit pas se limiter pas à additionner les niveaux de pression acoustique, mais bien les énergies sonores des deux sources. L'énergie sonore est proportionnelle au carré de la pression acoustique. Cela nous donne donc :

$$L_{p1+2} = 10 \log(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10}) \quad (\text{équation 5})$$

Nous pouvons également effectuer le calcul au moyen du graphique de la figure 11.

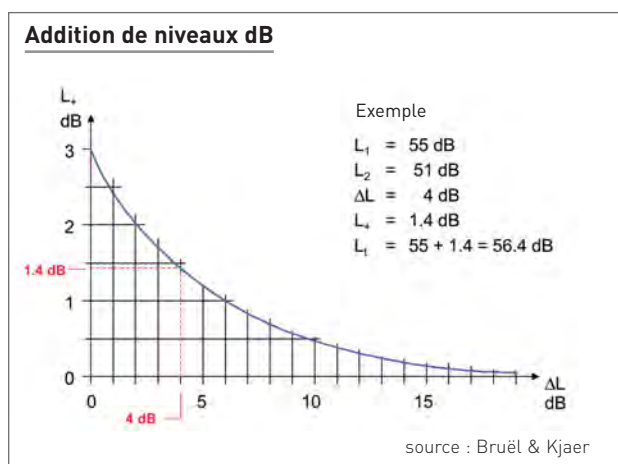


Figure 11 : Addition de niveaux de pression acoustique via la méthode graphique. On obtient le résultat de l'addition en calculant la différence linéaire entre les deux niveaux à additionner, en déterminant ensuite la valeur de cette différence sur l'axe des ordonnées et en additionnant enfin cette valeur au plus élevé des deux niveaux.

<sup>1</sup> On peut également calculer la valeur  $L_p$  en utilisant l'amplitude  $A$ . Cette méthode est peu utilisée dans la pratique. Les sonomètres les plus modernes offrent à l'utilisateur le choix entre le mode "peak" (sur base de l'amplitude) et le mode "rms" (sur base du  $p_{rms}$ ).



Pour ce faire, on calcule d'abord la différence arithmétique entre les deux niveaux de pression acoustique à additionner ( $\Delta L$ ) et on vérifie ensuite la valeur  $L_+$  correspondante sur l'axe des ordonnées. La somme des deux niveaux de pression acoustique est donc égale à la pression acoustique la plus élevée, à laquelle on additionne la valeur  $L_+$ .

Dans le cas de deux sources identiques se trouvant à égale distance d'un point d'observation et engendrant respectivement un niveau de pression acoustique égal à X dB, cela devient :

$$L_{p1+2} = 10 \log(2 \cdot 10^{X/10}) = X + 10 \log 2 \approx X + 3 \text{ dB} \quad (\text{équation 6})$$

Dans le cas de N sources identiques se trouvant à égale distance d'un point d'observation et dont les fonctionnements respectifs engendrent à cet endroit un niveau de pression acoustique de X dB, la formule peut être généralisée comme suit : (voir également figure 12):

$$L_{p1+2+\dots+N} = X + 10 \log N \quad (\text{équation 7})$$

Dans le cas de N sources non corrélées engendrant des niveaux de pression acoustique différents à l'endroit du point d'observation, la formule est la suivante :

$$L_{p1+2+\dots+N} = 10 \log(10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10} + \dots + 10^{L_{pN}/10}) \quad (\text{équation 8})$$

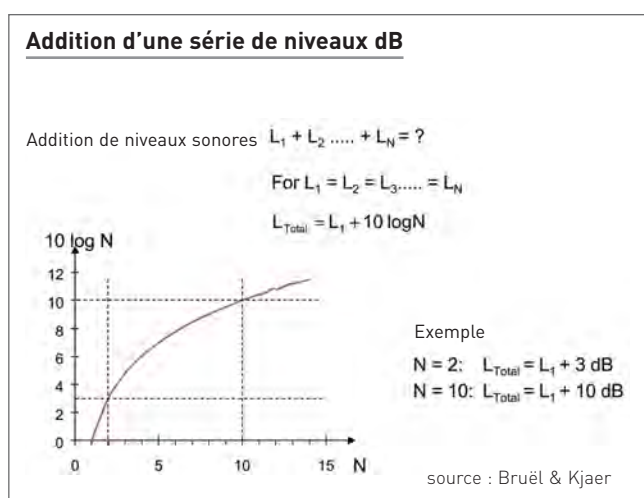


Figure 12 : Addition de plusieurs niveaux de pression acoustique identiques

On peut facilement vérifier, au départ de ces formules, qu'un redoublement de l'intensité de trafic sur une chaussée déterminée entraîne une hausse du niveau de pression acoustique du bruit du trafic de 3 dB. Lorsque ce trafic est décuplé, la nuisance sonore augmente de 10 dB.

Dans un certain nombre de cas, on peut souhaiter connaître le niveau de pression acoustique d'une source à un point précis ( $L_S$ ), mais sans qu'il soit possible de mesurer uniquement le bruit de cette source par une seule mesure (voir figure 13).

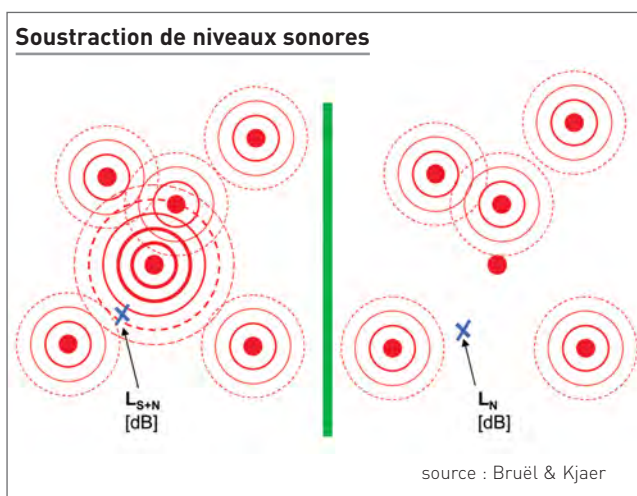


Figure 13 : Soustraction de niveaux de pression acoustique. On mesure ici, à un point d'observation, le niveau de pression acoustique de la source (S) et du bruit de fond (situation de gauche). On mesure ensuite le niveau de pression acoustique du bruit de fond B dont on déduit celui de la source S.

Le résultat de la mesure comprend également les valeurs enregistrées pour une ou plusieurs autres sources ( $L_{\text{mesuré}} = L_{S+N}$ ). Supposons maintenant qu'il soit possible d'effectuer une mesure, au point en question, qui ne tiendrait pas compte de la source visée : on obtiendrait alors le niveau de puissance acoustique des autres sources ( $L_N$ ). Pour connaître le niveau de pression acoustique  $L_S$ , il suffit alors de soustraire le niveau de pression acoustique du bruit de fond  $L_N$  de  $L_{S+N}$ . Pour ce faire, on utilise la formule suivante :

$$L_S = 10 \log (10^{L_{S+N}/10} - 10^{L_N/10}) \quad (\text{équation 9})$$

On peut également recourir à la méthode graphique (figure 14).

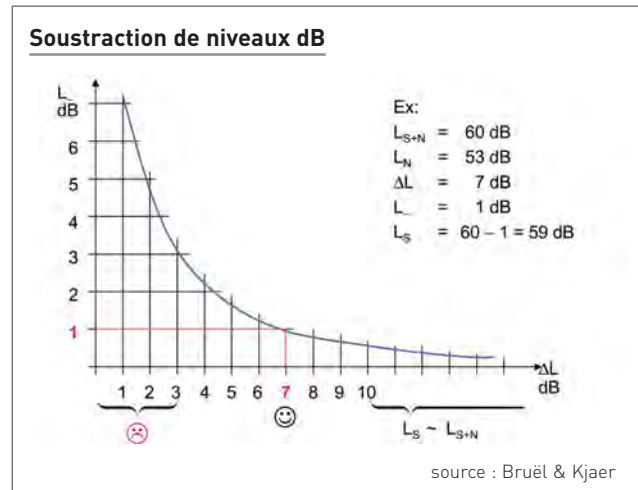


Figure 14 : Soustraction de niveaux de pression acoustique via la méthode graphique. Le résultat de la soustraction s'obtient en calculant la différence linéaire entre les deux niveaux de pression acoustique, en déterminant ensuite la valeur correspondant à cette différence sur l'axe des ordonnées et en soustrayant enfin cette valeur du plus élevé des deux niveaux de pression acoustique. Lorsque la différence linéaire est inférieure à 3 dB, le résultat de la soustraction logarithmique n'est pas fiable.

Pour ce faire, on détermine d'abord sur l'axe des ordonnées la valeur  $L_$  correspondant à la différence arithmétique  $\Delta L$  entre les deux niveaux de pression acoustique concernés; on soustrait ensuite cette valeur  $L_$  du plus élevé des deux niveaux de pression acoustique. Lorsque  $\Delta L$  est inférieur à 3 dB, le résultat de la soustraction manque cependant de précision.

Remarque : lorsque la différence entre les niveaux de pression acoustique  $L_{p1}$  et  $L_{p2}$  est supérieure à 10 dB, on peut estimer à quelques dixièmes de dB près que :

$$L_{p1+2} \approx L_{p1} \quad (\text{équation 10})$$

et

$$L_{p1-2} \approx L_{p1} \quad (\text{équation 11})$$

Lorsque le niveau de pression acoustique de la source à mesurer est supérieur de plus de 7 dB au niveau de pression acoustique du bruit de fond, l'influence de ce dernier sur le résultat mesuré ne dépasse pas 1 dB, ce qui est donc à peine perceptible (et donc insignifiant). Lorsque la différence est de 10 dB, cette influence se réduit à quelques dixièmes de dB seulement.

## 1.8. Le spectre acoustique

Le piston représenté à la figure 1 génère un son dont le niveau de pression acoustique évolue selon une courbe sinusoïdale avec le temps. Ce son peut être caractérisé par une fréquence. C'est ce que l'on appelle un son pur. Lorsque l'on représente sur diagramme le niveau de pression acoustique d'un son en fonction de sa fréquence (ce que l'on appelle le spectre du son), on constate qu'un son pur présente un schéma très simple : une droite avec une valeur  $L_p$  sur l'axe des ordonnées pour la fréquence d'un son pur. Toutes les autres valeurs en ordonnée sont nulles. Lorsque l'on est confronté à deux sons purs en un même point d'observation, les pressions acoustiques se superposent et un facteur temporel intervient alors, comme illustré à la figure 15.

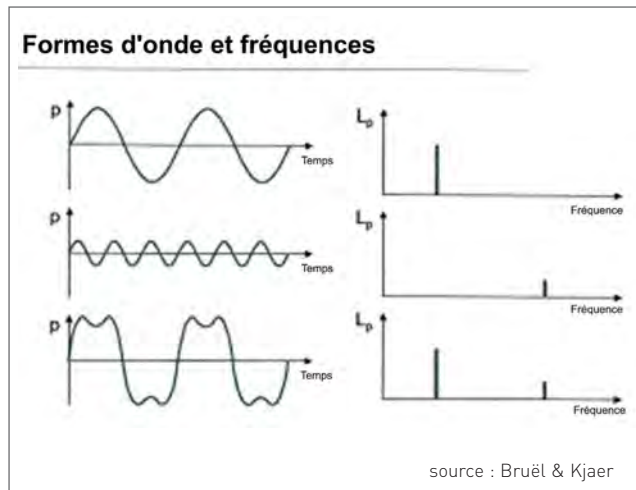


Figure 15 : Diagrammes du haut : représentation de deux sons purs dans un espace temporel (pression acoustique en fonction du temps) avec, à côté, le spectre correspondant. En bas : sonorité résultant de la présence simultanée de deux sons.

Le diagramme illustrant le niveau de pression acoustique en fonction de la fréquence fait apparaître deux droites. Un son composé de différents sons purs s'appelle un son complexe. La plupart des sons de la vie quotidienne (le murmure de la pluie ou de la mer, le bruissement des feuilles...) ne sont ni des sons purs, ni des sons complexes. Ces sons ne peuvent être reconstitués qu'en superposant un très grand nombre – pour ne pas dire une infinité – de sons purs possédant des fréquences distinctes (théorème de Fourier). On obtient ainsi des spectres continus, dont nous vous donnons quelques exemples dans la figure 16.

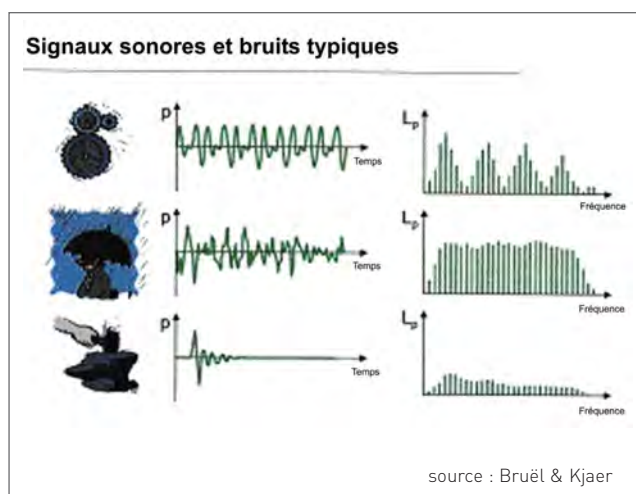


Figure 16 : Quelques exemples de sons qui ne sont pas des sons purs et qui sont composés d'un grand nombre de composantes aux fréquences distinctes.

Il existe de nombreuses applications pour lesquelles il serait intéressant de savoir dans quelle mesure les différentes fréquences contribuent à un son bien précis. Ces informations peuvent être directement déduites par l'analyse du spectre de ce son.

Dans la pratique, nous divisons le spectre en différentes bandes de largeur spécifique. Cette largeur est soit constante, soit une fraction constante (B) de la fréquence centrale ( $f_0$ ) de la bande. C'est à cette dernière catégorie qu'appartiennent les spectres de bandes 1/1 d'octave ou 1/3 d'octave qui nous intéressent le plus dans ce contexte (respectivement bande d'octave et bande de tiers d'octave). Une bande se caractérise par sa fréquence centrale  $f_0$ , sa fréquence inférieure  $f_1$  et sa fréquence supérieure  $f_2$ . Les pressions acoustiques de tous les sons purs dont la fréquence est supérieure à  $f_1$  et inférieure à  $f_2$  sont additionnées énergétiquement de manière à obtenir un niveau de pression acoustique pour la bande. Dans la pratique, ceci se fait par le biais de filtres, comme indiqué dans la figure 17.

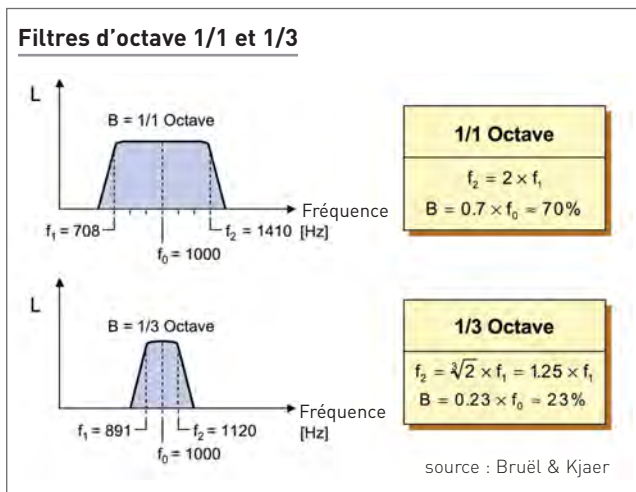


Figure 17 : Les filtres de bandes d'octave et de tiers d'octave

Suivant la norme IEC 1260, il est possible de calculer la fréquence moyenne ainsi que les limites inférieure et supérieure des bandes de tiers d'octave au départ d'un nombre de base  $G = 10^{3/10}$  et par rapport à une fréquence de référence  $f_r$ , par exemple 1000 Hz :

$$f_0 = 10^{x/10} \cdot f_r \quad (\text{équation 12})$$

$$f_1 = G^{-1/6} \cdot f_0$$

$$f_2 = G^{1/6} \cdot f_0$$

$$B = f_2 - f_1$$

où  $x$  représente un indice entier par rapport à la bande de tiers d'octave avec, comme fréquence moyenne, la fréquence de référence  $f_r$ .

Les bandes d'octave se subdivisent en trois bandes de tiers d'octave et se caractérisent par une fréquence moyenne identique à celle de leur bande de tiers d'octave centrale. Leurs limites supérieure et inférieure sont les mêmes que les limites supérieure et inférieure respectives de leurs bandes de tiers d'octave supérieure et inférieure mises en commun. Dans le cas des bandes d'octave, la fréquence moyenne  $f_0$  équivaut pratiquement au double de la fréquence moyenne de la bande gauche et, bien entendu, à la moitié de celle de la bande droite. Les limites de bande s'ajustent de manière à ce que le spectre soit entièrement "couvert" (figure 18).

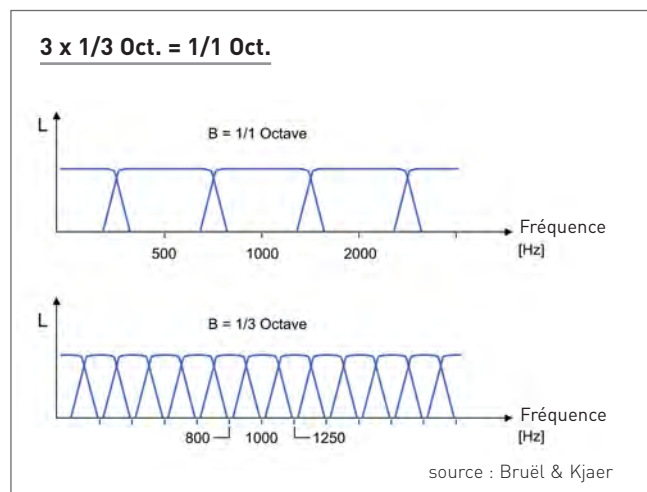


Figure 18 : Les filtres des bandes d'octave et des bandes de tiers d'octave s'ajustent entre eux de manière à couvrir l'ensemble du spectre

La figure 19 illustre le bruit d'une voiture en mouvement (spectre de bande d'octave et de bande de tiers d'octave).

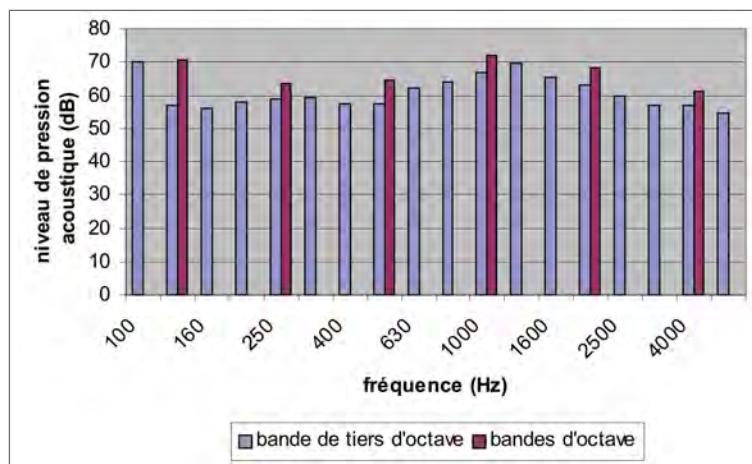


Figure 19 : Le bruit généré par une voiture en mouvement, présenté sous forme de spectre de bandes d'octave et de tiers d'octave. Le niveau de pression acoustique d'une bande d'octave est la somme logarithmique des pressions acoustiques des bandes de tiers d'octave ayant la même fréquence moyenne que la bande d'octave et des bandes de tiers d'octave gauche et droite.

Les fréquences moyennes nominales<sup>2</sup> et "exactes" ainsi que les limites inférieure et supérieure des bandes de tiers d'octave dans le domaine audible figurent au tableau 3. On y voit aussi quelles sont les fréquences moyennes des bandes de tiers d'octave qui correspondent aux fréquences moyennes des bandes d'octave.

index	moyenne fréquence nominale	bande d'octave	moyenne fréquence "exacte"	limite inf. bande de tiers d'octave	limite sup. bande de tiers d'octave
-16	25		25,119	22,387	28,184
-15	31,5	*	31,623	28,184	35,481
-14	40		39,811	35,481	44,668
-13	50		50,119	44,668	56,234
-12	63	*	63,096	56,234	70,795
-11	80		79,433	70,795	89,125
-10	100		100,00	89,13	112,20
-9	125	*	125,89	112,20	141,25
-8	160		158,49	141,25	177,83
-7	200		199,53	177,83	223,87
-6	250	*	251,19	223,87	281,84
-5	315		316,23	281,84	354,81
-4	400		398,11	354,81	446,68
-3	500	*	501,19	446,68	562,34
-2	630		630,96	562,34	707,95
-1	800		794,33	707,95	891,25
0	1000	*	1000,0	891,3	1122,0
1	1250		1258,9	1122,0	1412,5
2	1600		1584,9	1412,5	1778,3
3	2000	*	1995,3	1778,3	2238,7
4	2500		2511,9	2238,7	2818,4
5	3150		3162,3	2818,4	3548,1
6	4000	*	3981,1	3548,1	4466,8
7	5000		5011,9	4466,8	5623,4
8	6300		6309,6	5623,4	7079,5
9	8000	*	7943,3	7079,5	8912,5
10	10000		10000	8913	11220
11	12500		12589	11220	14125
12	16000	*	15849	14125	17783
13	20000		19953	17783	22387

Tableau 3 : Fréquences moyennes f<sub>0</sub>, fréquences inférieures et supérieures f<sub>1</sub> et f<sub>2</sub> des bandes d'octave et de tiers d'octave du domaine audible

<sup>2</sup> pour exprimer les bandes d'octave et de tiers d'octave, nous avons utilisé les valeurs arrondies des fréquences moyennes suivant la norme IEC 1260

## 1.9. L'oreille humaine

L'appareil auditif de l'homme se subdivise en trois parties (figure 20): l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne.

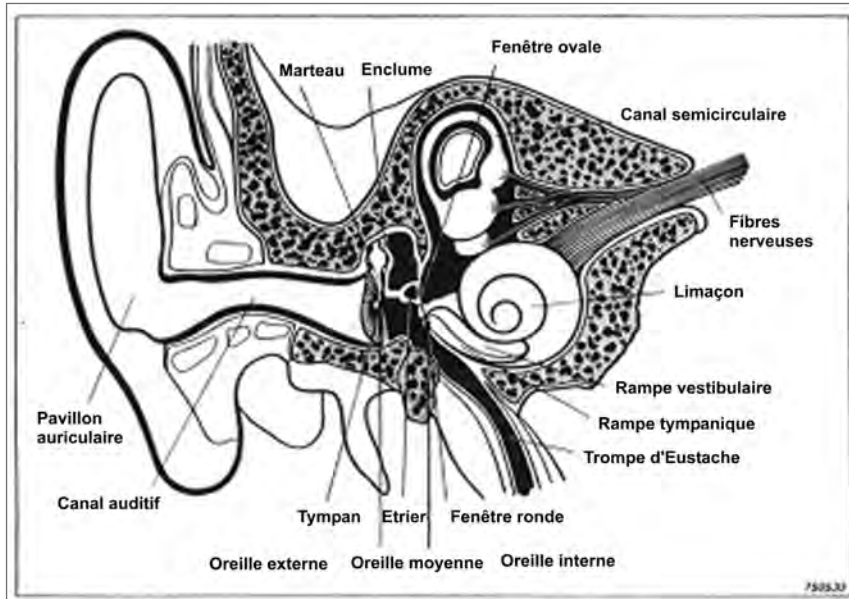


Figure 20 : Appareil auditif de l'homme

L'oreille externe se compose du pavillon et du conduit auditif; elle est séparée de l'oreille moyenne – remplie d'air – par le tympan. L'oreille interne est baignée de liquide; la cochlée, en raison de sa forme typique, est aussi appelée le limaçon<sup>3</sup>. Les ondes sonores qui pénètrent dans le conduit auditif font vibrer le tympan. Via les trois osselets de l'oreille moyenne (le marteau, l'enclume et l'étrier), cette vibration se transmet à la "fenêtre ovale" qui constitue l'entrée de l'oreille interne. Les osselets jouent un rôle de levier : la vibration (relativement) importante du tympan est convertie en une vibration de moindre amplitude mais de plus forte intensité au niveau de la fenêtre ovale. Le limaçon (figure 21) est un canal de forme hélicoïdale (3,5 spires, environ 30 mm de long) qui est partagé en deux par une membrane (la membrane basilaire) sur la presque totalité de sa longueur.

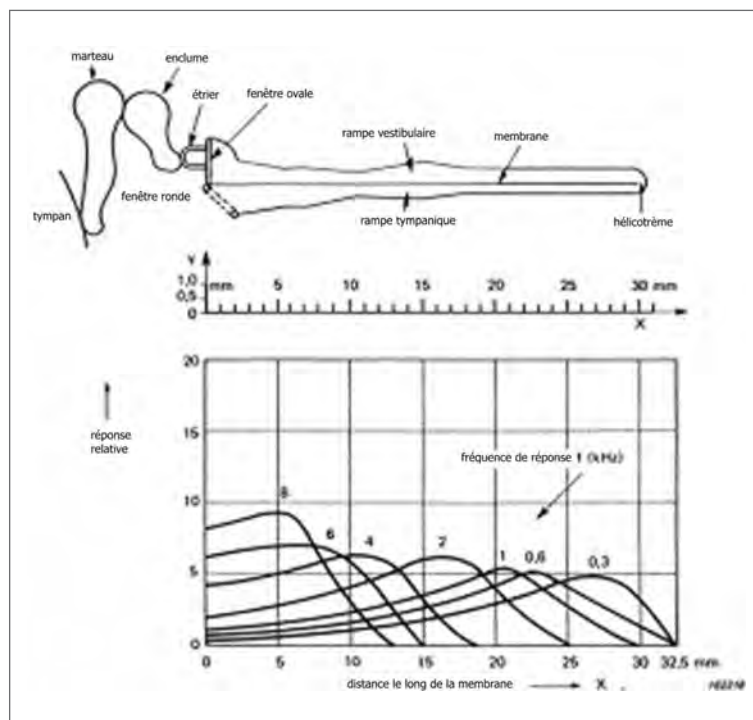


Figure 21 : Le limaçon (déroulé). Les vibrations de la membrane basilaire – qui, en fonction de la fréquence, atteignent une amplitude maximale à un endroit précis – permettent à l'homme de discerner différentes fréquences.

<sup>3</sup> Latin: Cochlea



Cette membrane est recouverte, sur toute sa longueur, de cellules ciliées<sup>4</sup> (environ 10.000 au total) qui sont reliées au nerf auditif, qui est lui-même relié à zone auditive du cerveau. La vibration transmise par l'étrier à la fenêtre ovale va faire bouger la colonne de liquide de l'oreille interne et, de ce fait, la membrane basilaire qui se met en quelque sorte à onduler. On peut comparer ce phénomène au mouvement des vagues, qui ondulent du large vers le rivage. L'endroit où l'ondulation de la membrane basilaire atteint son amplitude maximale dépend de la fréquence du signal auditif entrant : les sons à haute fréquence feront principalement bouger la membrane basilaire à proximité de la fenêtre ovale, tandis que les sons à basse fréquence provoqueront le mouvement à l'autre extrémité. Chaque fréquence stimulant des cellules ciliées spécifiques, l'homme est ainsi capable d'établir une distinction entre ces différentes fréquences. Les cils et les cellules ciliées n'ont pas une implantation régulière; ils se présentent en rangs et forment des groupes en V (figure 22).

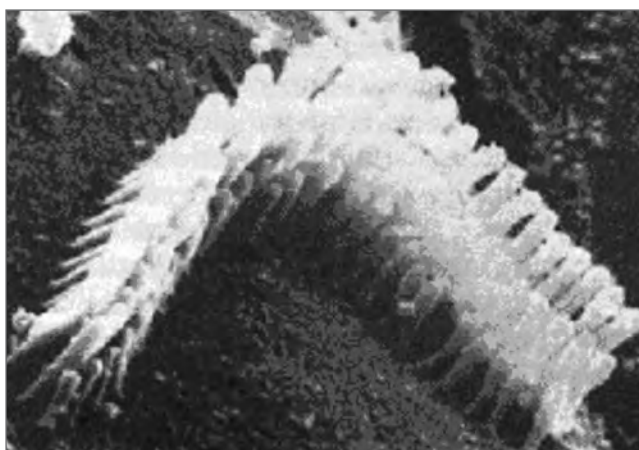


Figure 22 : Groupe de cellules ciliées composé de trois rangées de cellules

En cas de mouvement violent et de longue durée de la membrane basilaire (donc en cas d'exposition à des sons dont le niveau de pression acoustique est élevé), les cellules ciliées peuvent être irrémédiablement endommagées (figure 23), ce qui peut entraîner des troubles de l'ouïe ou même la surdité (voir fiche 2).

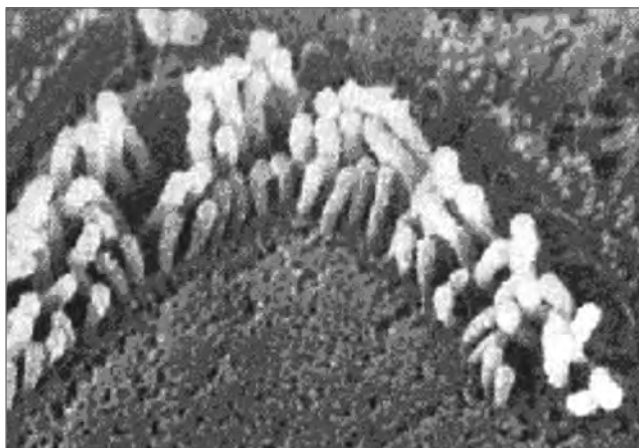


Figure 23 : Groupe de cellules ciliées endommagées par une exposition excessive au bruit

La variation du niveau de pression acoustique doit durer au minimum 0,125 s pour pouvoir être perçue par l'oreille humaine. C'est pourquoi cet intervalle de temps a été choisi comme constante dans la pondération temporelle rapide.

<sup>4</sup> on parle de "cellules ciliées" car elles sont pourvues d'un minuscule cil

## 1.10. La sensibilité de l'oreille humaine et le concept de sonie

Si une oreille normalement constituée peut enregistrer des sons dont la fréquence se situe entre 20 Hz et 20 000 Hz, sa sensibilité n'est cependant pas constante sur l'ensemble de ce champ de fréquences. Cela signifie que certaines fréquences exigent un niveau de pression acoustique beaucoup plus élevé pour susciter la même sensation de sonie (ou intensité) que d'autres fréquences. La figure 24 illustre des courbes de même intensité en fonction de la fréquence. Ces courbes s'appellent des isophones.

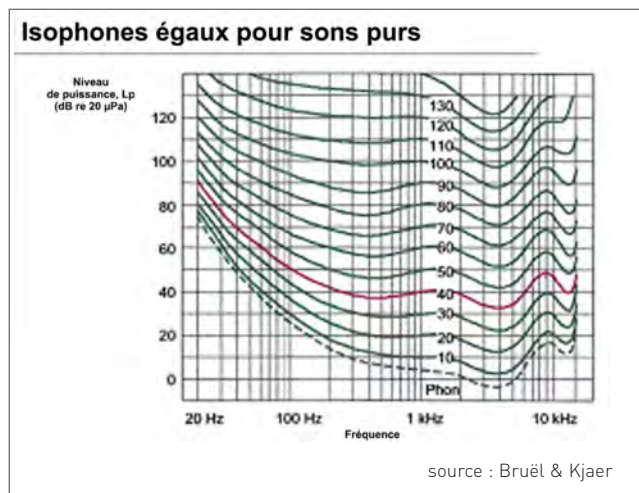


Figure 24 : Courbes d'intensité (subjective) égale ou isophones

On peut voir par exemple qu'un son de 1000 Hz ayant un niveau de pression acoustique de 40 dB est perçu comme aussi intense qu'un son pur ayant une fréquence de 20 Hz et un niveau de pression acoustique de 88 dB ou encore qu'un son de 3500 Hz et de 34 dB. La **sonie** (ou intensité sonore) d'un bruit s'exprime en phones et se définit comme étant le niveau de pression acoustique d'un son pur à 1000 Hz qui serait perçu avec la même intensité que le son en question. Les sonies des sons purs dans l'exemple ci-avant correspondent donc toutes à 40 phones. Pour les sons purs, la sonie peut être lue directement en phones dans la figure 24. La sonie d'un son autre qu'un son pur peut être calculée grâce à son spectre (spectre de bande d'octave, de bande de tiers d'octave ou autre) au moyen de la méthode de Stevens<sup>ii</sup> ou de la méthode de Zwicker<sup>iii</sup>. Le seuil d'audibilité (cf. isophone de 0 phone) et le seuil de douleur (cf. isophone de 130 phones) dont nous avons parlé précédemment, sont donc largement tributaires de la fréquence.

La hausse du niveau de pression acoustique d'un son n'est pas enregistré par l'oreille suivant un schéma linéaire. Une hausse de moins d'1 dB sera à peine perceptible tandis qu'une augmentation de 5 dB sera parfaitement audible. Lorsque l'on soumet un sujet à deux sons consécutifs (de même fréquence) où le niveau de pression acoustique du second son est supérieur au premier de 10 dB, le sujet ressentira le second son comme étant à peu près deux fois aussi intense que le premier. En cas d'augmentation de 20 dB, le son sera senti comme près de quatre fois plus intense<sup>5</sup>.

Des phénomènes complexes entrent en jeu lorsque l'oreille humaine est soumise simultanément à différents sons. Lorsqu'il s'agit de deux sons purs ayant un même niveau de pression acoustique, il est possible de les distinguer l'un de l'autre à condition qu'ils ne se situent pas dans la même bande critique. Ces bandes critiques correspondent plus ou moins aux bandes de tiers d'octave. Dans certains cas précis, lorsque le niveau de pression acoustique des sons diffère, on ne perçoit qu'un seul son – le second étant masqué par le premier. La figure 25<sup>iv</sup> nous montre quelques **courbes de masquage** correspondant aux sons de référence à 250 Hz, 1000 Hz et 4000 Hz avec un niveau de pression acoustique de 60 dB. Si l'on fait entendre à un sujet un son pur de 4000 Hz et 60 dB et, simultanément, un son pur de 5000 Hz et 40 dB, ce deuxième son ne sera pas enregistré (correctement) par le sujet : il sera masqué par le premier son, plus intense.

<sup>5</sup> Il s'agit de valeurs approchées, car il faut également tenir compte de la fréquence du son



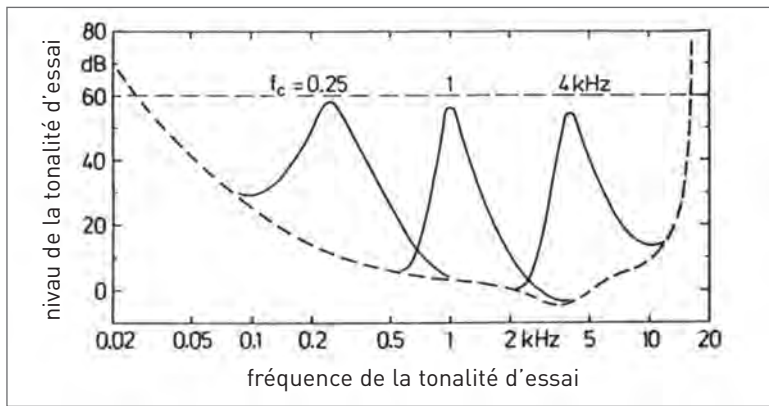


Figure 25 : Courbes de masquage pour des sons de référence de 60 dB à 250 Hz, 1000 Hz et 4000 Hz. Les sons purs dont le niveau de pression acoustique se situe sous une des courbes ne seront pas perçus s'ils se produisent en même temps que le son de référence.

La figure 26 nous montre les courbes de masquage correspondant à un son de référence ayant une fréquence de 1000 Hz et différents niveaux de pression acoustique. On remarquera que les courbes de masquage des figures 25 et 26 sont distinctement asymétriques : la pente de la courbe est beaucoup plus forte dans la partie correspondant aux fréquences basses que dans la partie correspondant aux fréquences plus élevées. Cela signifie que **les sons ayant une fréquence basse masquent beaucoup plus facilement les sons ayant une fréquence élevée que le contraire**. Le phénomène du masquage s'applique également aux sons non-purs.

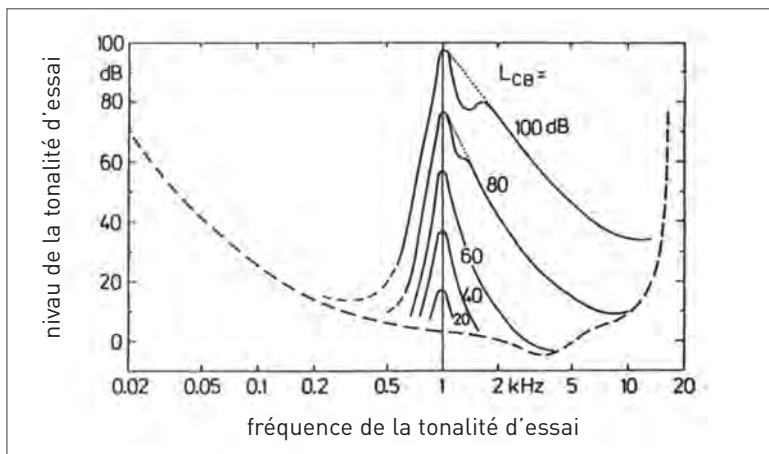


Figure 26 : Courbes de masquage pour sons de référence ayant une fréquence de 1000 Hz et différents niveaux de pression acoustique. Les sons purs dont le niveau de pression acoustique se situe sous l'une des courbes ne seront pas perçus s'ils se produisent en même temps que le son de référence.

La figure 27 illustre le masquage des sons purs par un **bruit blanc**<sup>6</sup> de 0 à 20000 Hz. En étudiant cette figure, on constate qu'un son pur de 60 dB à une fréquence de 2000 Hz sera masqué par un bruit blanc ayant un niveau de pression acoustique de 83 dB. On en déduira donc que les sons qui contribuent à peine à l'augmentation du niveau de pression acoustique du bruit environnant peuvent cependant être tout à fait audibles. Pour pouvoir masquer un son pur au moyen d'un son à large bande, nous avons besoin d'un spectre présentant un niveau de pression acoustique élevé. Il est par contre plus facile de masquer un son à large bande par un autre son à large bande. Cela provient du fait que les sons purs sont plus facilement identifiables. Le bruit du trafic routier est un exemple typique de bruit à large bande.

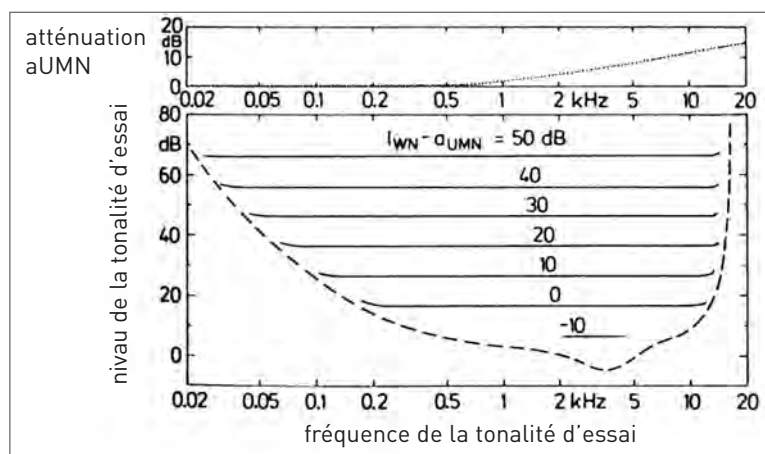


Figure 27 : Masquage de sons purs par un bruit blanc

<sup>6</sup> Le bruit blanc est un bruit qui n'a qu'un seul niveau de pression acoustique par bande spectrale (à largeur constante). Dans un spectre par bande d'octave, le niveau de pression acoustique augmente de 3 dB par bande d'octave.

## 1.11. La pondération fréquentielle "A"

Les sons les plus courants de notre vie quotidienne ne sont pas des sons purs mais peuvent être définis grâce à leur classe spectrale (par exemple spectre par bande de tiers d'octave). Dans la pratique, il n'est guère commode d'exprimer "l'intensité" d'un son par un nombre. On peut, pour ce faire, utiliser la sonie, que l'on calcule suivant la méthode susmentionnée de Zwicker ou de Stevens. Dans la pratique, on travaille la plupart du temps sur base du niveau de pression acoustique du spectre, exprimé en "dB". Il est possible de calculer le niveau de pression acoustique global d'un spectre en additionnant de manière logarithmique la valeur des pressions acoustiques de chaque bande de tiers d'octave concernée. Le niveau de pression acoustique ainsi obtenu présente cependant le grand désavantage d'être mal corrélé avec la sonie, précisément en raison du fait que la sensibilité de l'oreille humaine est largement tributaire de la fréquence. C'est pourquoi on applique d'abord, avant l'addition logarithmique des valeurs de la pression acoustique, une correction liée à la fréquence – une **pondération fréquentielle** – pour tenir compte des variations de sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence. Il existe différents types de pondérations fréquentielles, que l'on désigne par les lettres A, B, C et D (figure 28).

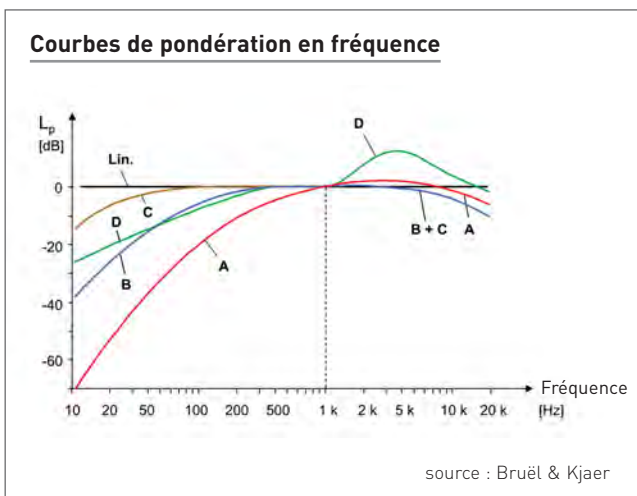


Figure 28 :  
Courbes de pondération fréquentielle

Par définition, la correction à 1000 Hz pour toutes les courbes de pondération est égale à 0. Ces pondérations tiennent compte – dans une mesure plus ou moins importante – de la sensibilité moins prononcée en cas de fréquences basses et élevées dans le spectre auditif. La pondération fréquentielle "A" est basée sur l'isophone de 40 phones (figure 29) et est de loin la plus usitée, même pour les niveaux de pression acoustique beaucoup plus élevés. Les pondérations B et C se basent respectivement sur les isophones de 70 et 100 phones; elles sont cependant peu utilisées. La pondération D, qui insiste sur l'extrême sensibilité de l'oreille humaine entre 1000 et 6000 Hz, est parfois utilisée pour mesurer le bruit caractéristique des avions.

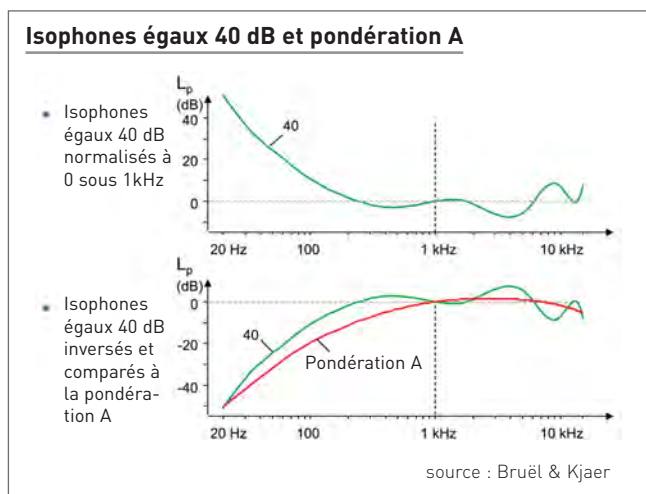


Figure 29 : La courbe de pondération fréquentielle "A" est calquée sur l'isophone de 40 phones (sans en être cependant le reflet exact).

Lorsque l'on parle de pondération fréquentielle **linéaire**, cela signifie simplement que l'on n'applique aucune pondération. Les niveaux de pression acoustique des spectres calculés en tenant compte d'une pondération fréquentielle spécifique A, B, ... sont respectivement exprimés en dB(A), dB(B) etc. La pondération fréquentielle "A" en particulier est très couramment utilisée et fournit une corrélation assez correcte – pour ne pas dire parfaite – par rapport à la nuisance d'un son. Bien que basée sur l'isophone de 40 phones, la pondération "A" peut également être valablement utilisée pour les sonies inférieures ou supérieures.

## 1.12. Puissance et intensité d'une source sonore

Le niveau de pression acoustique mesuré dans l'environnement d'une source sonore peut être largement dépendant du lieu d'observation. "Le niveau de pression acoustique de ces camions est de 80 dB(A)" est une affirmation qui n'a en soi aucun sens si on ne spécifie pas l'endroit où cette valeur a été mesurée (était-ce à 1 m, 10 m, 100 m des camions ?). La **puissance sonore**  $P$ , par contre, est une grandeur physique indépendante du point de mesure; elle se définit comme étant la quantité d'énergie sonore rayonnée par seconde par une source déterminée (figure 30).

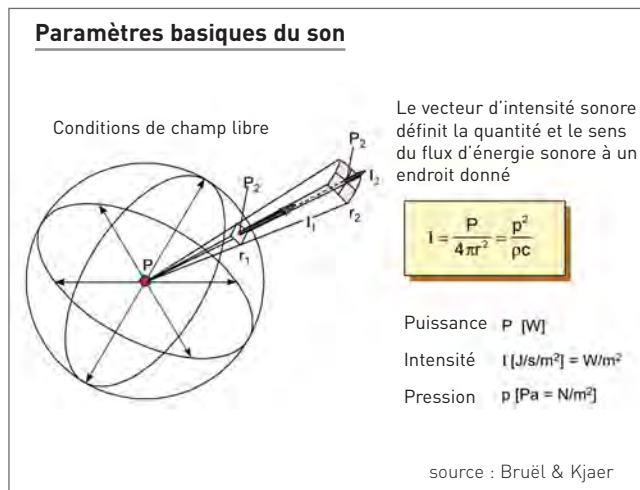


Figure 30 : Une source sonore de puissance  $P$  émet des ondes sonores qui ont la forme de sphères concentriques dont le centre est constitué par la source. Le vecteur d'intensité  $I$  est perpendiculaire aux fronts d'onde sphériques. La grandeur de l'intensité  $I$ , la puissance  $P$  et la pression acoustique  $p$  sont liées par une relation simple.

La puissance sonore est exprimée en watt (W). Le niveau de puissance sonore  $L_p$  se définit de la même manière que le **niveau de pression acoustique** :

$$L_p = 10 \log(P/P_0) \quad (\text{équation 13})^7$$

où  $P_0 = 10^{-12}$  W (puissance de référence)

La puissance sonore est spécifique à une source sonore déterminée, mais peut naturellement varier avec le temps. La puissance sonore caractérise l'**émission** d'une source sonore. Le niveau de pression acoustique mesuré par l'observateur (par exemple l'habitation d'un riverain le long d'une autoroute) nous informe quant à l'**immission**. Des normes peuvent être imposées tant sur le plan des émissions (par exemple la réglementation européenne relative la puissance sonore maximale des véhicules et des outils) que sur le plan des immissions (par exemple les normes acoustiques adoptées dans le Vlareem (législation environnementale de la région flamande)).

La grandeur **vectorielle de l'intensité sonore**  $I$  est également très importante. Le bruit généré au départ d'une source donnée se propage dans une direction déterminée. Or, la notion de niveau de pression acoustique n'en tient pas compte : il s'agit d'une grandeur physique scalaire (comme la température). Lorsque l'on considère, à proximité d'une source sonore en activité, une surface unique perpendiculaire à la direction de la propagation du bruit, l'intensité sonore se définit alors, au milieu de cette surface, par un vecteur dont la grandeur est la quantité d'énergie sonore qui transite, par seconde, par cette surface et dont la direction est la direction de propagation du bruit. La grandeur de l'intensité sonore, notée  $I$ , s'exprime en  $W/m^2$ . Le **niveau d'intensité sonore** se définit de la manière suivante :

$$L_I = 10 \log(I/I_0) \quad (\text{équation 14})^8$$

où  $I_0 = 10^{-12}$   $W/m^2$  (puissance de référence)

En terrain libre<sup>9</sup>, la relation entre l'intensité sonore et la pression acoustique se définit comme suit :

$$I = p^2 / (\rho c) \quad (\text{équation 15})$$

où  $\rho$  représente la densité du milieu (pour l'air à 20°C = 1,21  $kg/m^3$ ) et où  $c$  représente la vitesse du son (=344 m/s). Ce qui nous permet de déduire qu'en terrain libre :

$$L_I = L_p \quad (\text{équation 16})$$

On déterminera donc la puissance sonore totale traversant une surface donnée en y intégrant l'intensité sonore au niveau de cette surface :

$$PS = \int S \mathbf{I} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{équation 17})^{10}$$

où  $d\mathbf{S}$  représente un vecteur perpendiculaire à la surface et une grandeur 1.

<sup>7</sup> où  $P$  est également intégré sur un intervalle de temps, avec par exemple  $\tau = 0,125$  s

<sup>8</sup> idem pour  $I$

<sup>9</sup> c'est-à-dire sans surfaces réfléchissantes à proximité

<sup>10</sup> la multiplication de deux vecteurs est ce que l'on appelle le "inproduit" (produit scalaire), défini comme étant  $\mathbf{I} \cdot d\mathbf{S} = I \, dS \cos\theta$ , où  $\theta$  représente l'angle formé par les deux vecteurs  $\mathbf{I}$  et  $d\mathbf{S}$

Pour une source sonore se situant au centre d'une sphère de rayon  $r$  et dont l'énergie sonore rayonne uniformément dans toutes les directions, on déduira donc que :

$$P = I 4\pi r^2 \quad (\text{équation 18})$$

où  $W$  représente la puissance de la source et  $I$  l'intensité qui est constante sur la totalité de la surface de la sphère.

Citons, comme exemple pratique, la puissance sonore rayonnée par l'ouverture d'une porte dans un écran le long d'une autoroute. Si  $I$  est uniforme sur l'ensemble de la surface de l'ouverture on obtient donc :

$$P_{\text{ouverture}} = I_{\text{ouverture}} S_{\text{ouverture}} \quad (\text{équation 19})$$

où  $I_{\text{ouverture}}$  représente l'intensité mesurée à la surface de l'ouverture et  $S_{\text{ouverture}}$  la surface de l'ouverture. Pour connaître  $I_{\text{ouverture}}$ , il suffit de procéder à une mesure de la pression acoustique (voir équation 15).

La plupart du temps cependant, la puissance d'une source ne rayonne pas uniformément dans toutes les directions; on parle ainsi de **directivité**. Prenons une source aux environs de laquelle ne se trouve aucune surface réfléchissante ni aucun objet. La source émet une énergie uniforme dans toutes les directions. Plaçons maintenant un écran réfléchissant derrière la source ou un sol lisse sous la source : l'énergie totale de la source se propage alors dans une demi-sphère. L'énergie sonore enregistrée à un point d'observation (situé dans cette demi-sphère) est alors doublée et le niveau de pression acoustique augmente de 3 dB. Si une source sonore est placée à la ligne d'intersection de deux surfaces perpendiculaires et réfléchissantes (par exemple un mur et un sol réfléchissants), l'énergie sonore ne peut alors rayonner que dans un quart de sphère; dans ce cas, le niveau de pression acoustique au point d'observation augmente de 6 dB. L'énergie d'une source qui se trouverait dans l'angle formé par trois surfaces réfléchissantes perpendiculaires les unes aux autres ne pourrait rayonner que dans un huitième de la sphère. Par comparaison à la situation où il n'y aurait aucune surface réfléchissante, l'énergie sonore enregistrée dans cet octant est donc huit fois plus élevée, ce qui correspond à une augmentation du niveau de pression acoustique de 9 dB. Le **facteur de directivité  $Q$**  pour une direction donnée d'observation d'une source est le rapport entre la puissance réelle émise dans cette direction et la puissance qui serait émise si le rayonnement de l'énergie sonore était uniforme dans toutes les directions. Dans les situations ci-dessus,  $Q = 1$  en l'absence de surface réfléchissante,  $Q = 2$  en présence d'une surface,  $Q = 4$  en présence de deux surfaces et  $Q = 8$  en présence de trois surfaces. Quand on souhaite calculer, à un point d'observation, le niveau de pression acoustique sur base d'une puissance sonore déterminée d'une source (voir plus loin), il convient toujours de tenir compte de l'influence de la directivité. On peut donc appliquer la formule suivante :

$$D_{\text{dir}} = 10 \log Q \quad (\text{équation 20})$$

## 1.13. Propagation et atténuation du bruit

### 1.13.1. Propagation géométrique

La source sonore que nous avons considérée jusqu'à présent est une source ponctuelle, c'est-à-dire une source dont toute l'énergie sonore rayonne au départ d'un point unique (figure 31).

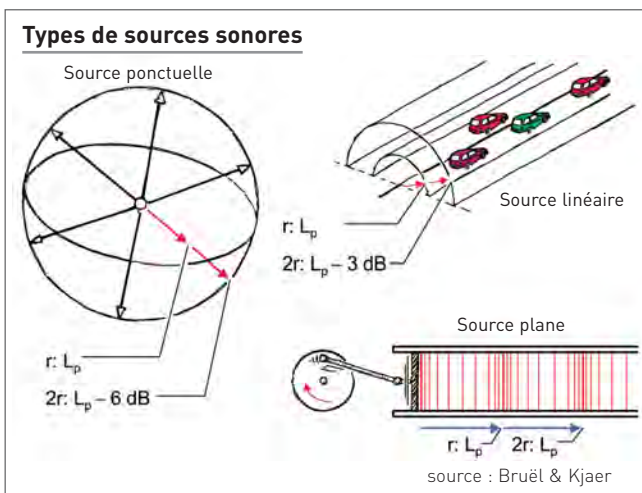


Figure 31 : Dans le cas d'une source ponctuelle, l'énergie sonore est répartie sur des fronts d'onde sphériques dont le diamètre va en s'amplifiant. Un redoublement de la distance entraîne une baisse du niveau de pression acoustique de 6 dB. Une autoroute droite et à forte affluence est un exemple de source linéaire. Dans ce dernier cas, les fronts d'onde adoptent une forme cylindrique dont la source constitue l'axe commun. Un redoublement de la distance entraîne une baisse du niveau de pression acoustique de 3 dB. Dans le cas d'un front d'onde plan, comme pour le piston se déplaçant dans un tube, il n'y a aucune baisse du niveau de pression acoustique par propagation géométrique.

Dans ce cas, les ondes sonores se propagent dans une direction radiale et les fronts d'onde (points appartenant au milieu et se trouvant dans la même phase que le mouvement des ondes) ont la forme de sphères concentriques. Citons comme exemple de source ponctuelle l'avion en vol, par rapport auquel l'observateur se trouve à une distance donnée (par ex. 1 km). Le niveau de pression acoustique diminue au fur et à mesure que l'observateur s'éloigne de la source ponctuelle étant donné que l'énergie sonore se répartit sur une sphère dont le rayon est de plus en plus grand. L'énergie sonore enregistrée à une distance  $r$  de la source ponctuelle est donc proportionnelle à  $1/r^2$ . Un redoublement de la distance signifie que l'énergie sonore diminue suivant un facteur 4 et, donc, que le niveau de pression acoustique diminue de 6 dB. Dans le cas d'une source ponctuelle, le rapport entre le niveau de puissance sonore de la source et le niveau de pression acoustique à une distance  $r$ , sans tenir compte de tous les autres effets que nous aborderons ci-après, est donc :

$$L_p = L_p - 20 \log r - 8 \text{ dB} \quad (\text{équation 21})$$

Dans l'exemple du piston qui se déplace dans un tube (voir également la figure 31), les fronts d'onde sont plans et l'énergie sonore ne diminue pas lorsque la distance augmente par rapport à la source. Cela explique pourquoi un bruit généré à l'intérieur d'un tuyau peut parfois se propager sur de longues distances sans quasiment perdre de son intensité.

Une autoroute droite et très fréquentée (voir aussi figure 31) est un exemple de **source linéaire**. Les fronts d'onde ont ici la forme de cylindres partageant un axe commun (la source). Étant donné que l'énergie sonore se répartit sur une surface cylindrique, l'énergie sonore enregistrée à une distance  $r$  de la source est proportionnelle à  $1/r$ . Un redoublement de la distance signifie donc, dans ce cas, que l'énergie sonore diminue suivant un facteur 2 tandis que le niveau de pression acoustique ne diminue que de 3 dB. C'est la raison pour laquelle le bruit généré par une autoroute reste perceptible, même d'assez loin. Dans le cas d'une source linéaire, le rapport est le suivant :

$$L_p = L_p - 10 \log r - 5 \text{ dB} \quad (\text{équation 22})$$

Enfin, il nous reste à aborder le cas où les fronts d'onde adoptent un schéma aléatoire. Citons à titre d'exemple une installation industrielle avec quelques dizaines de sources sonores, un avion ou une voiture à courte distance etc.

Un principe essentiel à retenir est que **chaque** source se comporte comme une **source ponctuelle** à partir du moment où la distance de l'observateur par rapport à cette source est de loin supérieure aux dimensions de la source. Prenons l'exemple d'un avion : des mesures acoustiques effectuées à faible distance de l'avion et en différents endroits donneront des fronts d'onde fluctuants étant donné que les moteurs se trouvent à une certaine distance les uns des autres. Par contre, à une distance de quelques centaines de mètres maximum, la distance entre l'observateur et l'avion est de loin supérieure aux distances respectives entre les moteurs; dans ce cas, l'avion peut tout à fait valablement être considéré comme source ponctuelle. Il en va de même pour une voiture en mouvement qui, à faible distance (quelques mètres), produit des fronts d'onde fluctuants en raison des différentes sources sonores (bruit des pneus, bruit du moteur, échappement etc.).

Jusqu'à une distance de quelques centaines de mètres, un tronçon d'autoroute de 500 mètres de long agit comme une source linéaire et le niveau de pression acoustique diminue de 3 dB chaque fois que l'on double la distance. À une distance de quelques kilomètres, cette source peut être considérée comme une source ponctuelle, avec une perte de 6 dB pour chaque redoublement de distance. Dans le cas d'une chaussée à faible intensité de trafic, les véhicules seront considérés comme des sources ponctuelles en mouvement.

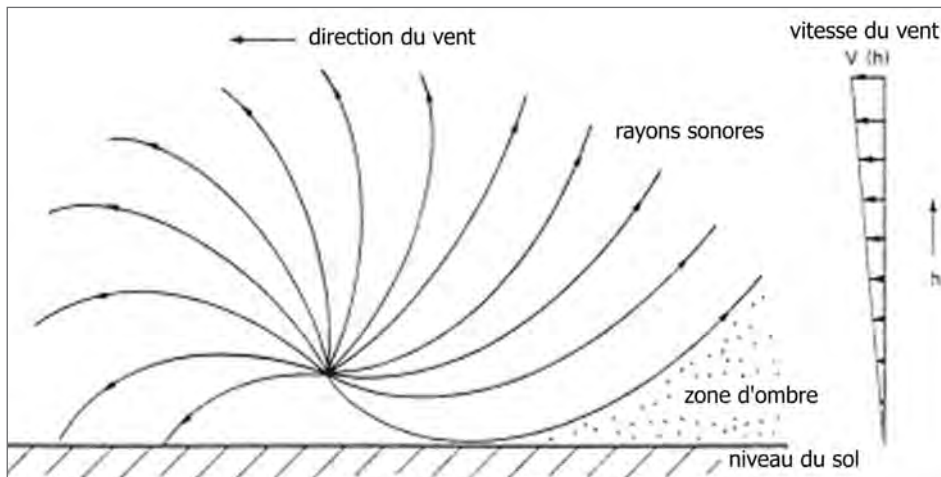
### 1.13.2. Le vent et la température

Outre la diminution du niveau de pression acoustique due à la propagation géométrique, un certain nombre d'autres facteurs influencent encore la baisse ou l'augmentation du niveau de pression acoustique au point d'observation.

Les conditions météorologiques, et plus particulièrement le vent et la température, peuvent jouer un rôle essentiel lorsque la distance entre la source et l'observateur est supérieure à 50 m. Plus cette distance est importante, plus l'influence éventuelle de facteurs météorologiques se fait sentir.

La vitesse du vent augmente avec l'altitude. Étant donné ce **gradient** de la vitesse du vent, les ondes sonores qui se déplacent dans la même direction que le vent sont redirigées vers la surface de la terre (cf. figure 32 – vent portant), et les vents descendants provoquent une augmentation de la pression acoustique. Dans d'autres cas, les ondes sonores sont réfractées vers le haut par les vents ascendants et on observe alors une "zone d'ombre" silencieuse.





Source : P.M. Nelson, BSc, PhD, FIOA , « Transportation Noise Reference Book », Butterworth & Co, 1987

Figure 32 : Lorsque la vitesse du vent augmente en raison de l'altitude, la direction des ondes sonores qui se propagent s'infléchit, faisant en sorte que le bruit ne se propage pas en ligne droite. C'est pourquoi il existe, en cas de vent descendant, une zone où le niveau de pression acoustique est plus élevé et, en cas de vent ascendant, une zone d'ombre (zone où le niveau de pression acoustique est moindre)

La figure 33 nous montre qu'un observateur situé à 1000 m d'une source peut enregistrer, en cas de vent portant, une atténuation de -3 à +3 dB environ, mais qu'en cas de vent contraire, cette atténuation peut atteindre jusqu'à -20 dB.

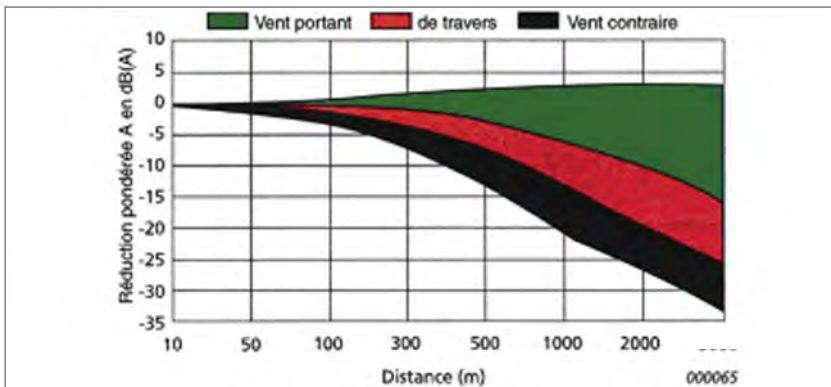
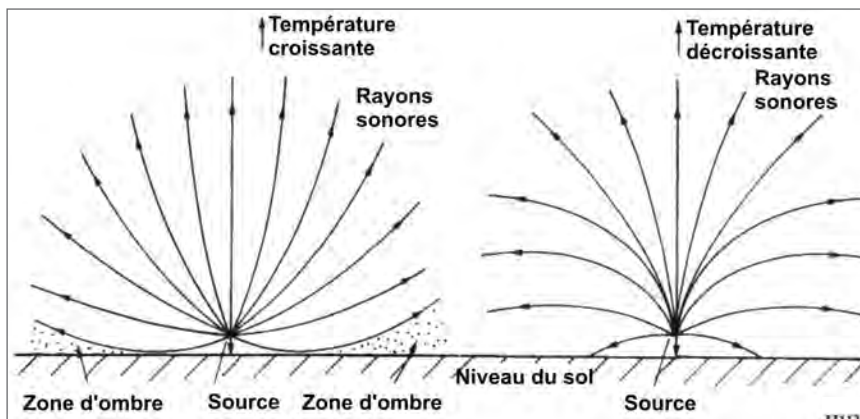


Figure 33 : Augmentation ou diminution du niveau de pression acoustique en raison de la direction des vents et en fonction de la distance.

source : Brüel & Kjaer « Bruit de l'Environnement », Brüel & Kjaer, 2000

Lorsque les conditions météorologiques sont normales, la température baisse avec l'altitude. Étant donné que la vitesse des ondes sonores est liée à la température, les ondes sont déviées vers le haut et provoquent donc une diminution du niveau de pression acoustique à la surface de la terre. En cas d'inversion des températures, les ondes sonores sont par contre redirigées vers la surface de la terre, d'où une augmentation du niveau de pression acoustique (voir figure 34). En raison du manque de données chiffrées, cet effet n'est utilisé qu'à titre qualitatif.



Source : P.M. Nelson, BSc, PhD, FIOA , « Transportation Noise Reference Book », Butterworth & Co, 1987

Figure 34 : Influence de la baisse / de l'augmentation des températures avec l'altitude : à gauche, en situation normale - à droite, en cas d'inversion des températures. En situation normale, une zone d'ombre se crée à partir d'une certaine distance de la source, ce qui n'est pas le cas lors d'une inversion des températures

### 1.13.3. Absorption par l'air

L'énergie des ondes sonores qui se propagent dans l'air est en partie absorbée par la transformation des molécules d'air en énergie thermique. Le phénomène est largement dépendant de la fréquence. Pour les fréquences les plus basses, l'absorption du son par l'air peut être négligée même à grande distance (> 10 km). En cas de son à haute fréquence, l'influence se fait déjà largement sentir dès que la distance entre la source et l'observateur atteint quelques dizaines de mètres. L'absorption du son par l'air est également tributaire de la température de l'air. Quelques données vous sont communiquées dans le tableau 4.

Bande d'octave (Hz)	0°C	10°C	20°C
500	0,2	0,2	0,3
1000	0,5	0,4	0,5
2000	1,5	1,0	1,1
4000	4,5	2,7	2,3
8000	10,4	6,7	4,8

Tableau 4 : absorption du bruit par l'air (exprimée en db/100 m) à différentes températures et avec une humidité relative de l'air de 80%

On peut également utiliser la formule suivante :

$$D_{\text{abs}} = f.r / 152500 \quad (\text{équation 23})$$

où f représente la fréquence du son en Hz et r la distance parcourue en m.

Pour les fréquences inférieures à 500 Hz, la formule donne des valeurs trop élevées.

### 1.13.4. Absorption par la végétation

La qualité de l'écran protecteur formé par la présence de végétation entre la source et le récepteur est en général largement surestimée. En règle générale, la végétation réfléchit/absorbe mal les bruits, comme nous le prouvent les chiffres du tableau 5 où sont reproduites les valeurs d'absorption pour une forêt compacte de feuillus<sup>9</sup>.

Fréquence (Hz)	200 - 400	400 - 800	800 - 1600	1600 - 3200	3200 - 6400
Absorption (dB/m)	0,05	0,05 - 0,07	0,08 - 0,10	0,11 - 0,15	0,17 - 0,2

Tableau 5: absorption des bruits par une forêt compacte de feuillus (exprimée en dB/m).

Seule une bande d'environ 100 m de large d'arbres plantés serrés pourrait assurer une protection qui soit du même ordre de grandeur que celle d'un écran antibruit (voir fiche 9).

### 1.13.5. L'influence du sol

La transmission du bruit entre une source et un observateur peut être influencée par un phénomène de réverbération entre les deux points. Les ondes sonores qui parviennent jusqu'à l'observateur peuvent non seulement emprunter le trajet le plus court dans l'air, mais elles peuvent aussi être réfléchies en un point du sol. L'onde sonore ainsi réfléchie peut renforcer ou affaiblir significativement le niveau sonore. Il convient de distinguer les surfaces "acoustiquement dures" (comme le béton, les surfaces pavées, l'eau...) et les surfaces acoustiquement tendres (l'herbe, les champs cultivés, les surfaces enneigées...). La figure 35 nous donne un exemple d'atténuation consécutive à la réverbération sur un sol dur, tendre et "mixte".

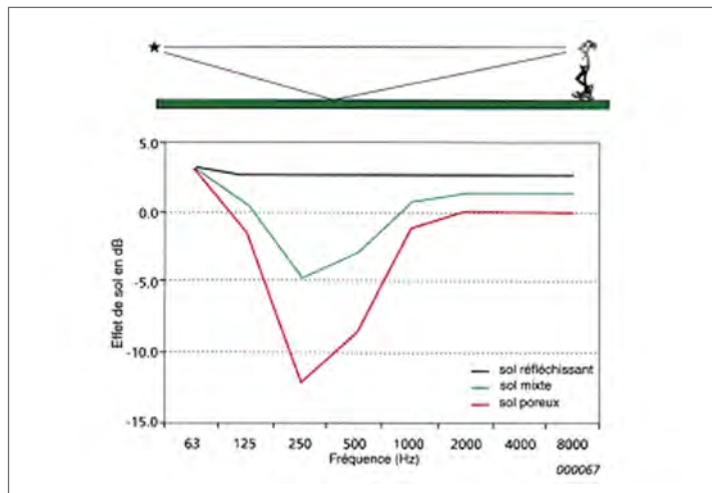


Figure 35 : Influence du sol sur le niveau de pression acoustique pour un observateur

Ces valeurs ne sont aucunement représentatives de toutes les situations. L'atténuation présente souvent une évolution aléatoire (car liée à la fréquence), en raison de la fluctuation des interférences constructrices ou destructrices entre l'onde directe et la composante réfléchi sur le sol.

### 1.13.6. Réflexion, absorption et diffraction

Un peu comme les influences du sol, le niveau de pression acoustique à l'endroit où se trouve l'observateur peut être influencé par la présence de surfaces réfléchissantes (écrans, bâtiments, murs, talus...). Lorsque l'observateur se trouve à proximité d'un écran réfléchissant, il convient de tenir compte non seulement du bruit provenant directement de la source, mais aussi du bruit réverbéré par l'écran. A distance suffisamment grande, ce phénomène peut entraîner un redoublement de l'énergie sonore au point d'observation, et donc une augmentation du niveau de pression acoustique de 3 dB (dans l'hypothèse bien sûr où cet écran est parfaitement réfléchissant). Dans la pratique, une partie de l'énergie sera absorbée et transformée en énergie thermique. Le rapport entre la quantité d'énergie sonore absorbée et la quantité réceptionnée s'appelle le **coefficient d'absorption**. Le coefficient d'absorption est, dans la majorité des cas, lié à la fréquence : un écran peut être absorbant pour une partie spécifique du spectre et réfléchissant pour une autre partie du spectre. La figure 36 illustre le coefficient d'absorption en fonction de la fréquence pour un écran en briques perforées<sup>vi</sup>. Dans une certaine mesure, l'énergie sonore qui heurte un écran traverse également ce dernier (phénomène de transmission). Les propriétés d'absorption de l'écran revêtent en outre une importance fondamentale.

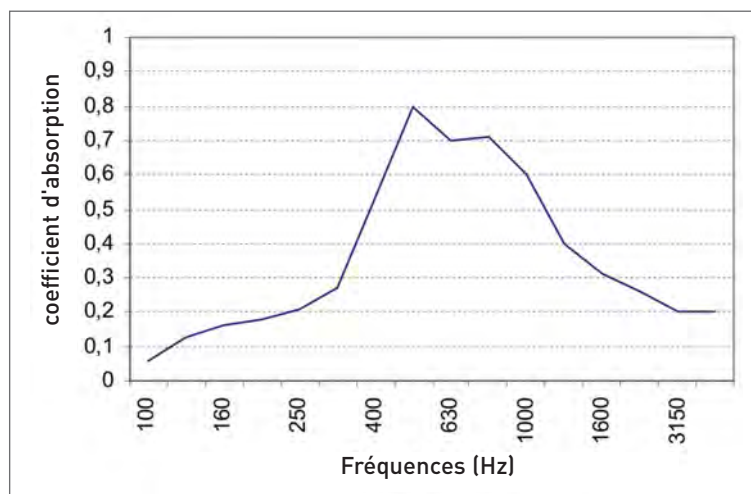


Figure 36 : Coefficient d'absorption en fonction de la fréquence pour un écran réfléchissant en briques perforées



La figure 37 nous montre l'évolution caractéristique du coefficient d'absorption de l'asphalte à texture ouverte (courbe supérieure) et de l'asphalte à texture fermée (courbe inférieure).

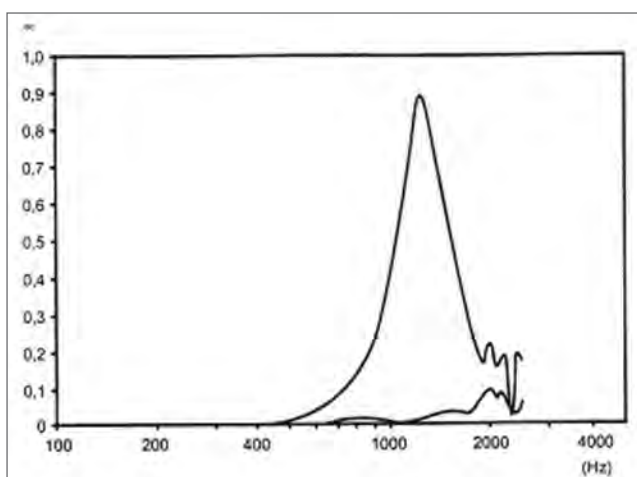


Figure 37 : Coefficient d'absorption en fonction de la fréquence pour l'asphalte à texture ouverte (courbe supérieure) et de l'asphalte à texture fermée (courbe inférieure)

La mise en place d'écrans antibruit est une méthode très couramment utilisée pour atténuer le bruit du trafic pour les riverains. Une partie du bruit étant réfléchi ou absorbée, le niveau de pression acoustique auquel les riverains sont soumis est dès lors inférieur à celui qu'ils subiraient en l'absence d'écran. Un écran ne supprime cependant jamais la totalité du bruit du trafic pour les riverains. Ceci s'explique en partie, comme nous l'avons dit plus haut, par la transmission du bruit au travers de l'écran, mais surtout par le phénomène selon lequel les ondes sonores ont en quelque sorte la capacité de "passer au-dessus" des obstacles. Ce phénomène, appelé **diffraction**, se produit dans la nature pour tous les types d'ondes chaque fois que la longueur de l'onde n'est pas démesurément inférieure à la dimension de l'objet. Un son d'une fréquence de 100 Hz ( $\lambda = 3,4$  m, voir équation 1) ne sera pas endigué de manière très efficace par un écran de 3 m de haut.

On peut enfin préciser que l'efficacité d'un écran dépend également des facteurs suivants :

- ◆ la différence de longueur entre la voie de transmission directe source-observateur et le parcours passant au-dessus de l'écran ( $a+b-c$  dans la figure 38). Plus cette différence est grande, plus l'écran est efficace;
- ◆ la fréquence du bruit : les sons de basse fréquence (ayant donc une grande longueur d'onde) sont arrêtés de manière bien moins efficace que les sons à haute fréquence;
- ◆ la densité de l'écran au  $m^2$  : celle-ci doit être suffisamment élevée pour limiter la transmission du bruit au travers de l'écran.

Les écrans sont étudiés en détail dans la fiche 13.

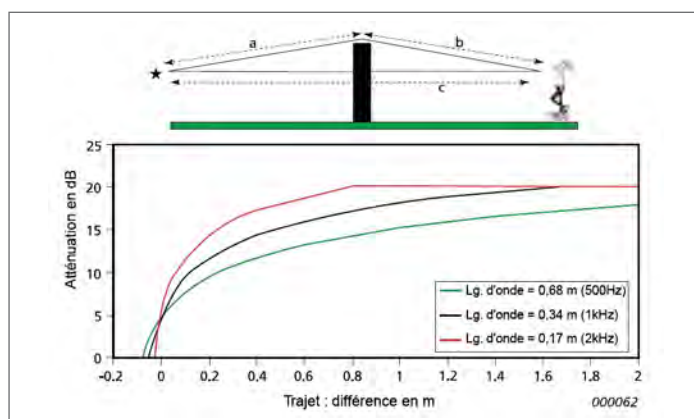


Figure 38 : La différence entre la longueur des trajets parcourus par le son est un des facteurs déterminants de l'efficacité d'un écran antibruit

## 1.14. Grandeurs d'appréciation du bruit

Lorsque l'on souhaite évaluer "l'intensité" d'un bruit et la confronter à une norme, on peut utiliser comme grandeur d'appréciation la sonie calculée suivant la méthode de Zwicker ou de Stevens<sup>11</sup>. On peut aussi utiliser le niveau de pression acoustique du spectre correspondant au bruit en question,  $L_{pA}$ <sup>11</sup>, à condition que le niveau de pression acoustique du bruit à évaluer reste constant dans le temps (par exemple, le bruit d'une autoroute très fréquentée, que l'on évaluera sur une période assez courte). Dans le cas d'un point d'observation situé le long d'une chaussée où passe sporadiquement un véhicule, le niveau de pression acoustique n'est pas absolument pas constant; par contre, le niveau de pression acoustique  $L_p$  montre, sur le moment, de fortes variations (figure 39).

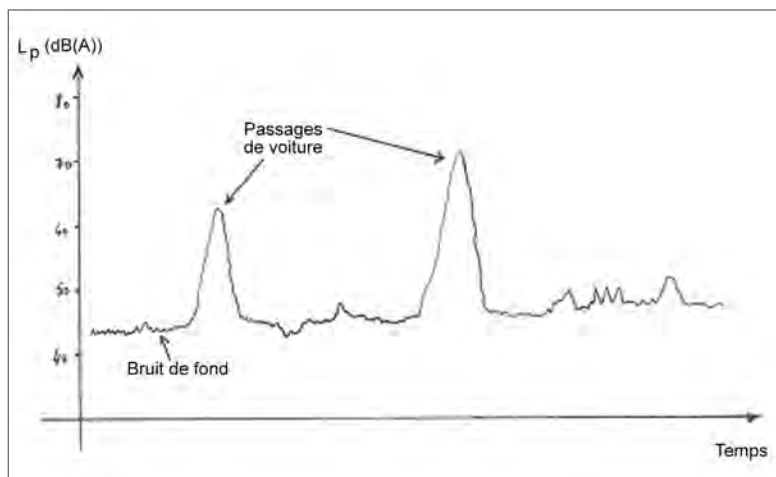


Figure 39 : L'évolution fluctuante typique du niveau de pression acoustique en bordure d'une chaussée avec passage sporadique de voitures

Nous observons, dans cette figure, une modification "en cloche" du niveau de pression acoustique au passage d'une voiture. Entre les passages (en acoustique, on appelle ces moments de courte durée des événements), le niveau de pression acoustique retombe à une valeur plus ou moins constante : le niveau de fond. Le niveau de fond provient principalement de plusieurs sources sonores très éloignées et difficiles ou impossibles à identifier (bruit du trafic à grande distance, bruissement des feuilles ou de la végétation, gazouillis des oiseaux...).

Dans le cas d'un bruit fluctuant, il faudra donc recourir à d'autres paramètres pour évaluer la (les) source(s) sonore(s). Les paramètres les plus importants sont :

### 1.14.1. Le niveau de pression acoustique équivalent pondéré A sur une période T ( $L_{Aeq,T}$ )

Le niveau de pression acoustique équivalent d'un bruit est le niveau de pression acoustique d'un bruit stable qui possède le même contenu énergétique que le bruit en question (figure 40), tous deux définis sur une période de mesure T :

$$L_{Aeq,T} = (1/T) \int T p^2(t)/p_0^2 dt \quad (\text{équation 24})$$

où  $p(t)$  représente le niveau de pression acoustique sans pondération temporelle.

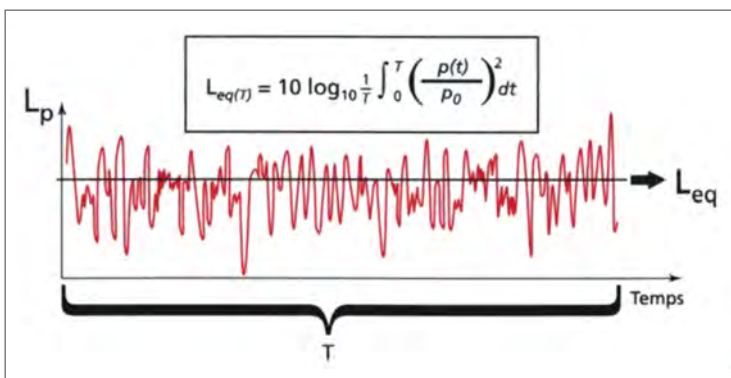


Figure 40 : Le niveau de pression acoustique d'un bruit fluctuant sur un intervalle de temps donné est le niveau de pression acoustique du bruit stable ayant le même contenu énergétique que le bruit mesuré

source : Brüel & Kjaer « Bruit de l'Environnement », Brüel & Kjaer, 2000

<sup>11</sup> On attribue l'indice "A" au niveau de pression acoustique  $L_p$  pour indiquer que l'on applique la pondération fréquentielle "A" lors du calcul

Le niveau de pression acoustique équivalent ainsi que les paramètres dérivés sont souvent utilisés pour pouvoir évaluer les bruits dont le niveau de pression acoustique est peu fluctuant à très fluctuant. Il est mesuré comme étant relativement fort pendant les moments les plus bruyants de la période de mesure T, ce qui constitue à la fois un avantage et un désavantage. Les moments les plus bruyants sont également responsables des éventuelles sensations de gêne due au bruit, de sorte que ce paramètre constitue une mesure intéressante pour évaluer un bruit déterminé en termes de nuisance. Le désavantage est lié à la technique de mesure : la présence de bruits perturbateurs sonores<sup>12</sup>, même de courte durée, peut influencer le résultat, ce qui le rend inutilisable pour pouvoir caractériser le bruit à évaluer.

Supposons que l'on ait mesuré des niveaux de pression acoustiques équivalents  $L_{Aeq,T1}$  et  $L_{Aeq,T2}$  sur deux périodes dont les durées respectives étaient  $T_1$  et  $T_2$ . Quel est le niveau de pression acoustique équivalent total  $L_{Aeq,T1+T2}$  pour les deux périodes cumulées ? Ce niveau se calcule grâce à la formule suivante :

$$L_{Aeq,T} = 10 \log\left(\frac{10^{L_{Aeq,T1}/10} + 10^{L_{Aeq,T2}/10}}{T}\right) \quad (\text{équation 25})$$

où  $T = T_1 + T_2$

En règle générale, pour n périodes de durée  $T_i$  et de niveau de pression acoustique équivalent  $L_{Aeq,Ti}$ , on utilisera la formule suivante :

$$L_{Aeq,T} = 10 \log\left(\frac{\sum 10^{L_{Aeq,Ti}/10}}{T}\right) \quad (\text{équation 26})$$

où  $T = \sum T_i$

Un des principaux paramètres dérivés est le "niveau sonore jour-nuit"  $L_{dn}$ :

$$L_{dn} = 10 \log\left(\frac{15 \cdot 10^{L_d/10} + 9 \cdot 10^{(L_n+10)/10}}{24}\right) \quad (\text{équation 27})$$

où  $L_d$  et  $L_n$  représentent respectivement le niveau sonore en période de jour et en période de nuit. Le niveau sonore de jour est le niveau de pression acoustique équivalent  $L_{Aeq}$ , défini sur  $T = 15$  heures (de 7 heures du matin jusqu'à 22 heures<sup>13</sup>). Le niveau sonore de nuit est le niveau de pression acoustique équivalent  $L_{Aeq}$ , défini sur  $T = 9$  heures (de 22 heures jusqu'à 7 heures du matin). En raison de la sensibilité au bruit plus prononcée pendant la nuit (voir fiche 2), on applique à ce paramètre une correction de "sanction" de 10 dB(A) pour cette période.

Le niveau  $L_{den}$  (niveau sonore jour-soirée-nuit)<sup>14</sup> en est une variante encore plus pointue qui se définit comme suit :

$$L_{den} = 10 \log\left(\frac{12 \cdot 10^{L_d/10} + 3 \cdot 10^{(L_e+5)/10} + 9 \cdot 10^{(L_n+10)/10}}{24}\right) \quad (\text{équation 28})$$

où  $L_e$  représente le niveau sonore en soirée, c'est-à-dire le niveau de pression acoustique équivalent sur une période de 3 heures (de 19 à 22 heures). Le niveau sonore de jour se définit dans ce cas sur une période de 12 heures (de 7 à 19 heures).

### 1.14.2. Les paramètres statistiques $L_{A99}$ , $L_{A95}$ , $L_{A50}$ , ...

Le paramètre  $L_{AFN,T}$  se définit comme étant le niveau de pression acoustique dépassé pendant N % du temps de mesure T et mesuré à l'aide de la pondération temporelle rapide. N est un nombre compris entre 0 et 100. Pour plus de concision, on omet la plupart du temps l'indice "F". Dans la figure 41, le laps de temps correspondant au niveau de pression acoustique  $L_{pA}$  à un moment donné (pondération temporelle F) est représenté par la courbe en noir.  $L_{A90}$  correspond au niveau qui est dépassé pendant 90% du temps de mesure. La somme des deux courtes périodes a et b représente 10% du temps de mesure. Le niveau  $L_{A90}$  est lui aussi indiqué.

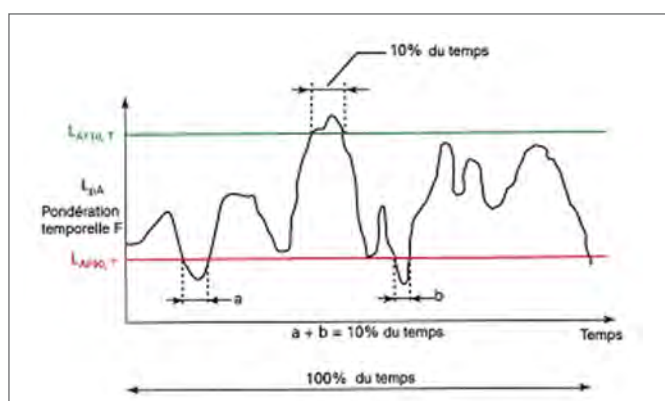


Figure 41 : Paramètres statistiques  $L_{A10}$  et  $L_{A90}$  d'un bruit fluctuant, mesuré sur un intervalle de temps déterminé

source : Brüel & Kjaer « Bruit de l'Environnement », Brüel & Kjaer, 2000

<sup>12</sup> il s'agit de bruits ne faisant pas partie du bruit à évaluer, comme par exemple le bruit généré par le passage d'un jet de l'armée lors d'une mesure du bruit du trafic routier

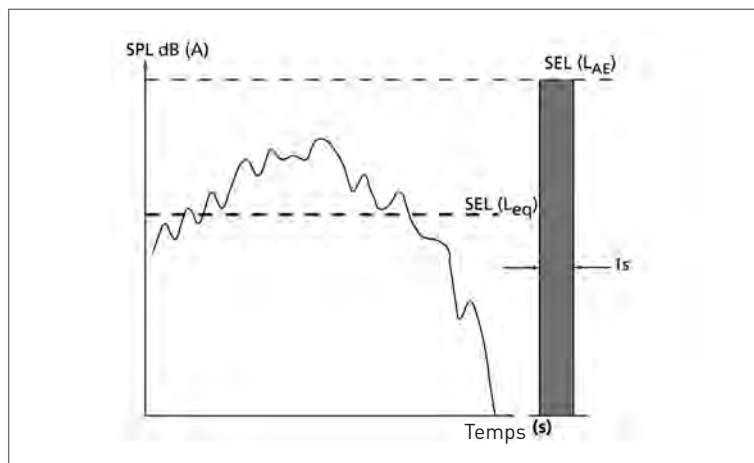
<sup>13</sup> les périodes telles que définies sont valables pour la Belgique; elles peuvent varier selon les pays. Aux Pays-Bas par exemple, la période de nuit commence à 23h00 au lieu de 22h00

<sup>14</sup> le "e" dans  $L_{den}$  correspond au terme "evening" (soirée)

On constate ainsi :

- ◆ que  $L_{A99}$ ,  $L_{A95}$  et  $L_{A90}$  sont typiques des moments les plus silencieux de la mesure. A condition qu'il n'y ait aucune source sonore continue à l'avant-plan, ces valeurs sont caractéristiques du bruit de fond qui règne à un endroit donné;
- ◆ que  $L_{A50}$  correspond au niveau moyen, c'est-à-dire que l'on enregistre un nombre égal de mesures qui lui sont supérieures ou inférieures pendant la période définie. Le niveau  $L_{A50}$  coïncide avec le paramètre  $L_{Aeq}$  lorsque qu'il s'agit d'un bruit stable. Dans le cas d'un bruit fluctuant, le paramètre  $L_{Aeq}$  est plus élevé que le niveau  $L_{A50}$  et plus la fluctuation est prononcée, plus la différence entre les deux paramètres augmente. C'est pourquoi le paramètre  $L_{Aeq}$  s'avère particulièrement intéressant pour l'évaluation de bruits fluctuants, car la gêne supplémentaire générée par les fluctuations du bruit se reflète par un paramètre d'appréciation plus élevé;
- ◆ que  $L_{A10}$ ,  $L_{A5}$  et  $L_{A1}$  sont caractéristiques des moments de la mesure correspondant aux niveaux de pression acoustique les plus élevés;
- ◆ que  $L_{A0}$  et  $L_{A100}$  correspondent respectivement au niveau de pression acoustique minimal ( $L_{Amin}$ ) et au niveau de pression acoustique maximal ( $L_{Amax}$ ) de la mesure.

Le **niveau d'exposition au bruit pondéré A** d'un événement de durée  $T$  (par exemple, le passage d'un camion) se définit comme étant le niveau de pression acoustique d'un bruit stable qui durerait 1 seconde et qui aurait le même contenu énergétique que l'événement dont il est question. Le niveau d'exposition au bruit est noté  $L_{AE}$  ou, en anglais, SEL<sup>15</sup>. Le niveau  $L_{AE}$  d'un événement est illustré à la figure 42.



source : Brüel & Kjaer « Bruit de l'Environnement », Brüel & Kjaer, 2000

Figure 42 : Le niveau d'exposition au bruit d'un événement de durée  $T$  est le niveau de pression acoustique d'un bruit stable qui aurait le même contenu énergétique que l'événement en question.

On dénombre, dans le domaine de l'acoustique environnementale, un grand nombre de paramètres (une vingtaine au moins) qui découlent de ce qui précède, mais qui s'avèrent peu significatifs dans le cadre du travail qui nous occupe.

Une **distribution différentielle** (histogramme, distribution de probabilité) est un diagramme où les pourcentages du temps de mesure sont exprimés en fonction du niveau de pression acoustique (figure 43).

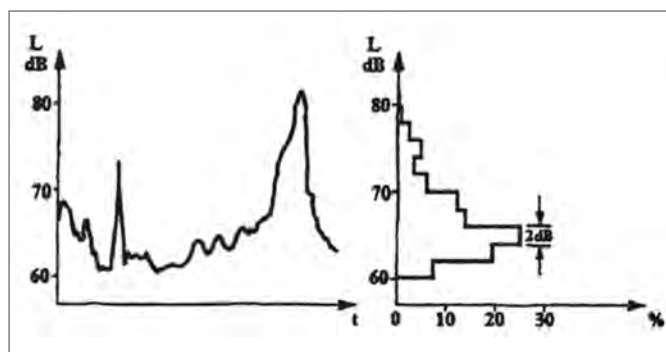


Figure 43 : Pour obtenir une distribution différentielle, on distribue une fraction significative de l'échelle des dB(A) sur des intervalles de même largeur et on détermine, pour chaque classe, quel est le pourcentage du temps de mesure pendant lequel le niveau de pression acoustique s'inscrit dans la classe en question

Dans la pratique, l'échelle des dB(A) est subdivisée en différentes classes de largeur constante (dans l'exemple, 2 dB(A)). La valeur en ordonnée par classe est le pourcentage du temps de mesure pendant lequel le niveau de pression acoustique s'inscrit dans la classe en question en cours de mesure. L'avantage de la distribution différentielle est qu'elle nous indique instantanément la répartition des niveaux de pression acoustique au cours de la mesure.

La **distribution cumulative** (figure 44) est une manière de présenter différemment les mêmes informations que celles que nous retrouvons dans la distribution différentielle. Ce diagramme nous indique, pour chaque niveau de pression acoustique, quel est le pourcentage du temps de mesure pendant lequel ce niveau a été dépassé au cours de la mesure. En définissant à quelle valeur en abscisse correspond la valeur N désirée de l'axe des ordonnées, on obtient le paramètre  $L_{AN}$  correspondant.

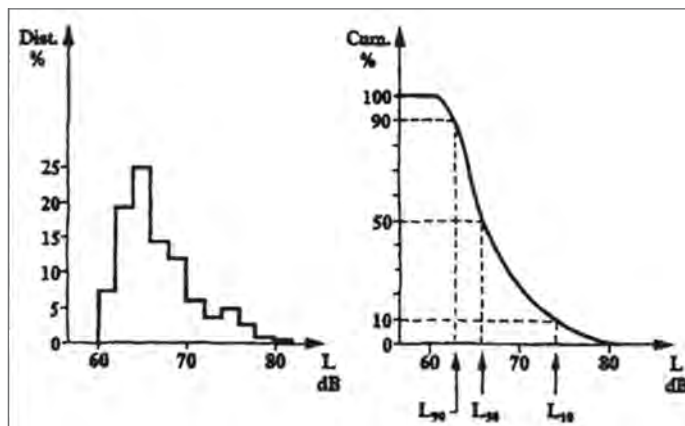


Figure 44 : La distribution cumulative nous donne le pourcentage du temps de mesure pendant lequel un niveau de pression acoustique donné a été dépassé

## 1.15. Prédiction des niveaux de pression acoustique

Lorsque la puissance d'une source sonore donnée est connue ainsi que tous les facteurs influençant la propagation du bruit de sa source jusqu'à l'observateur, il est possible de calculer les paramètres (tels que le  $L_{den}$  par exemple) au point d'immission. Dans le cas du trafic routier, la puissance sonore se définit entre autres par (voir fiche 4) :

- ◆ l'intensité du trafic
- ◆ la répartition des véhicules en fonction de leur type (voitures de tourisme, camions, motos...)
- ◆ la vitesse des véhicules
- ◆ la nature du revêtement de la chaussée
- ◆ la géométrie de la chaussée (déclivités, tournants, croisements...)
- ◆ ...

Le bruit généré par le trafic se disperse et se trouve soit renforcé, soit affaibli par divers facteurs tels que ceux cités précédemment. En situation réelle, le processus s'avère complexe en raison de la multiplicité des sources et de la géométrie compliquée de l'environnement. De plus, un calcul ne peut jamais s'effectuer de manière "exacte" : il intègre toujours des approximations et des hypothèses. De nombreux pays ont développé leur propre méthode de calcul standardisée, spécifique au calcul du niveau de pression acoustique du bruit du trafic. Citons à titre d'exemple :

- ◆ SRM (Standaard Rekenmethode) I et II (Pays-Bas)
- ◆ CRTN (Calculation of Road Traffic Noise, 1988) (Royaume-Uni)
- ◆ NMPB (Arrêté du 5 mai 1995) (France)
- ◆ StL-86 (Suisse)
- ◆ RVS 3.114 (Autriche)
- ◆ TEMANORD 1996:525 (Pays scandinaves)



Il existe également une norme internationale globale<sup>16</sup> en matière de prévision des niveaux de pression acoustique : l'ISO 9613 partie 1 (1993) et 2 (1996). La partie 1 traite de l'absorption du bruit par l'air en situation extérieure. Cette norme a été reprise par une norme belge (NBN ISO 9613-1:1996). La partie 2 propose une méthode de calcul globale. Cette partie n'a pas encore été transposée sous forme de norme belge. Pas plus qu'il n'existe de méthode de calcul standard pour la Belgique.

Le fait d'utiliser de telles méthodes de calcul et de calculer le niveau de pression acoustique présente un certain nombre d'avantages et de désavantages. Il est conseillé de procéder à un calcul dans les cas suivants :

- ◆ Lorsqu'il existe, au point d'immission, un bruit de fond dont le niveau de pression acoustique est du même ordre de grandeur, voire même supérieur au niveau de pression acoustique de la source à mesurer (cf. paragraphe traitant de la soustraction des niveaux de pression acoustique).
- ◆ Pour pouvoir prévoir les niveaux de pression acoustique de sources futures (par exemple dans le cadre d'un projet d'autoroute).
- ◆ Une modèle de calcul permet aussi de calculer plusieurs scénarios possibles (par exemple, recommencer le calcul en plaçant des écrans antibruit en différents endroits et à différentes hauteurs).
- ◆ Nous pouvons déterminer le niveau d'immission en des endroits difficilement accessibles pour la prise de mesures.
- ◆ Les modèles se prêtent à la perfection à la production de **cartes du bruit**<sup>17</sup>.

La précision du calcul du niveau de pression acoustique est largement tributaire de la précision des données disponibles (puissance de la source, géométrie et position de la source et des obstacles etc.) et de la validité des hypothèses et des simplifications effectuées. Les modèles les plus souvent cités utilisent des règles simples et empiriques. En principe, ces calculs peuvent être effectués manuellement; néanmoins, dans le cas d'une situation présentant de multiples sources, une topographie complexe ou encore de nombreux obstacles, il est intéressant de recourir à des logiciels spécifiques. Il existe sur le marché de nombreux programmes capables d'exécuter ce genre de calculs suivant une ou plusieurs méthodes citées précédemment et de produire une carte du bruit superposée à une carte numérique du site visé. Un exemple de cartographie du bruit vous est donné dans la figure 45.

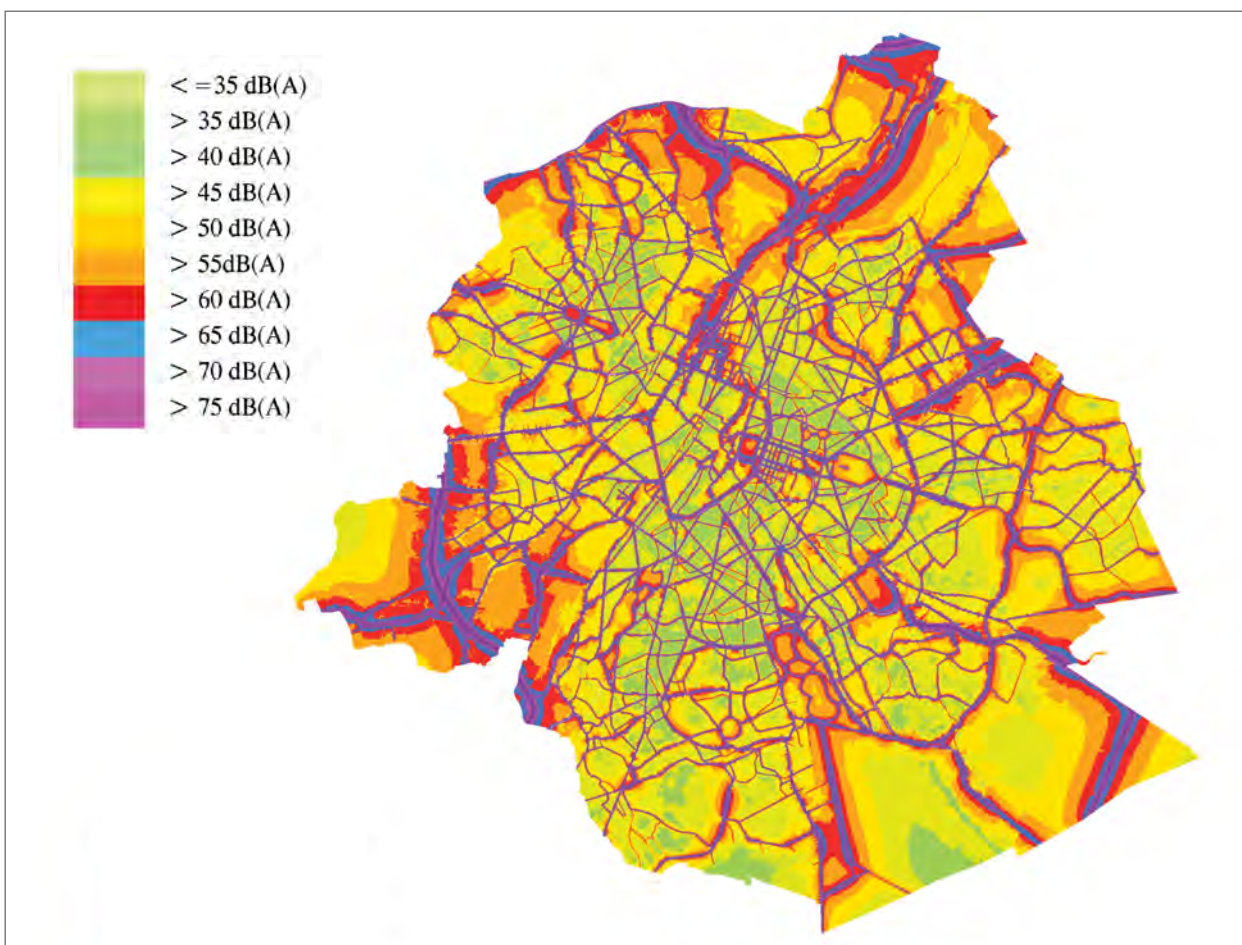


Figure 45 : Exemple d'une cartographie du bruit de la RBC

<sup>16</sup> ne s'appliquant pas uniquement au trafic routier

<sup>17</sup> cartes reprenant les courbes iso dB(A)

## 1.16. Prédiction des niveaux de pression acoustique

Au lieu de le calculer, le niveau de pression acoustique peut également être mesuré au lieu d'immission, ce qui offre davantage de sécurité quant à l'exactitude des valeurs obtenues pour le niveau de pression acoustique – à condition bien sûr que les mesures et le traitement des données mesurées soient effectués à l'aide d'un appareillage fiable et dans le respect des règles de l'art. Le bruit est mesuré à l'aide d'un sonomètre composé des pièces élémentaires suivantes (figure 46) : le microphone, le préamplificateur, la pondération fréquentielle, la pondération temporelle et un système d'affichage.

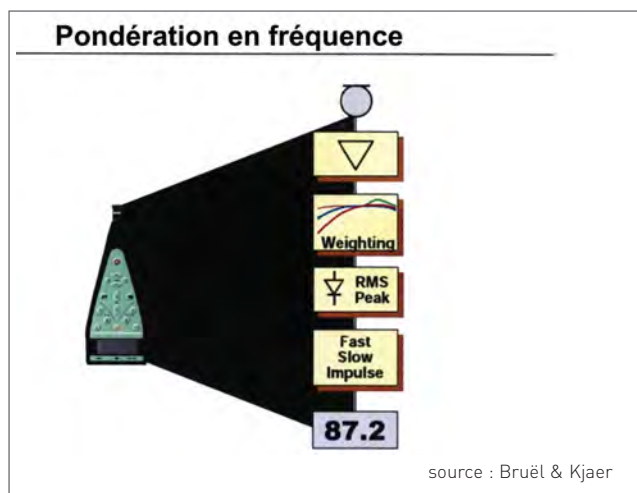


Figure 46 : Présentation schématique d'un sonomètre : le microphone, le préamplificateur, la pondération fréquentielle, la pondération temporelle, le système d'affichage.

Les ondes sonores se heurtent à une membrane située à l'intérieur du microphone (derrière une fine grille de protection) et provoquent une vibration (semblable aux vibrations du tympan à l'intérieur de l'oreille). Cette membrane fait partie d'un condensateur dont la capacité varie en fonction des vibrations et qui génère un léger courant alternatif dont la grandeur est proportionnelle à la grandeur de la pression acoustique de l'onde sonore entrante. Cet infime courant est amplifié par le préamplificateur avant de traverser un filtre électrique où la pondération fréquentielle souhaitée est appliquée. Le signal est ensuite élevé au carré et intégré à la constante temporelle choisie (F, S, ...); il est enfin lu de manière soit analogique, soit numérique.

En y ajoutant un filtre fréquentiel (bande d'octave, de tiers d'octave ou autre), on peut déterminer le niveau de pression acoustique de la bande concernée. Si l'on désire connaître le niveau de pression acoustique d'une autre bande, il suffit d'ajouter un autre filtre. C'est ce que l'on appelle l'analyse fréquentielle **sérielle**. Les sonomètres modernes orientent le signal au travers d'une série de filtres parallèles assemblés les uns aux autres, de manière à ce que les niveaux de pression acoustique dans les bandes spectrales puissent être lus simultanément. On parle alors d'analyse fréquentielle **parallèle**.

Avant d'être utilisés, les sonomètres doivent être étalonnés sur base d'une source de calibration prévue à cet effet. Celle-ci produit un son pur possédant un niveau de pression acoustique nominal précis (par exemple 94 dB) à une ou plusieurs fréquence(s) (le plus souvent 1000 Hz).

La précision du sonomètre est un facteur déterminant de son prix. Il existe à cet égard des normes belges et européennes<sup>viii</sup> qui permettent de classer les sonomètres selon leur précision.

Dans la pratique, il est plus que conseillé de contrôler les résultats d'un calcul (par exemple une carte du bruit) en différents points en procédant à des mesures sur le terrain au départ d'un certain nombre de points choisis.

## 1.17. Références

Brüel&Kjaer, 'Bruit de l'environnement' (2000)

- i NBN ISO 226 (1992)
- ii ISO 532A
- iii ISO 532B
- iv Zwicker E., Fastl. H., "Psychoacoustics Facts and Models", 2è édition, Springer, Berlin (1999)
- v F.J. Meister et W. Ruhrberg, "Der Einfluss von Grünanlagen auf die Ausbreitung von Geräuschen", *Lärmbekämpfung* (1959) 3, p. 5-11 et F.J. Meister et W. Ruhrberg, "Die Dämmung von Verkehrsgeräuschen durch Grünanlagen", *VDI-Zeitschrift* (1959) 101, p. 527-535
- vi "Conception et réalisation des écrans acoustiques, 2 catalogues de solutions de base", Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, Secrétariat d'État Chargé des Transports, Direction des Routes, avril 1985
- vii idem ii et iii
- viii Pour les sonomètres simples (non intégrateurs): NBN EN 60651:1996, modifiée par NBN EN 60651/A1:2001. Pour les sonomètres intégrateurs : NBN EN 60804:2001