

NOTIONS D'ACOUSTIQUE

EMBRECHTS J.J.

**Professeur à l'Université de Liège,
Département d'Electricité, Electronique et Informatique**

1. Le son

Du point de vue de la physique, le son est défini comme une onde de vibration se propageant dans un milieu matériel donné (dans l'air, le plus souvent), depuis un émetteur (une source) jusqu'à un récepteur.

Du point de vue physiologique, on définira plutôt le son comme le stimulus de notre sens de l'ouïe : le son est transformé en signaux neuro-physiologiques par notre système auditif.

Le son peut être étudié selon sa dimension temporelle. La grandeur physique la plus souvent utilisée pour caractériser l'évolution temporelle d'un son est la **pression acoustique** (Pascals) : symbole $p(t)$. Le signal de pression peut être mesuré (« capté »), à un endroit donné, par un microphone et observé sur l'écran d'un oscilloscope (figure 1).

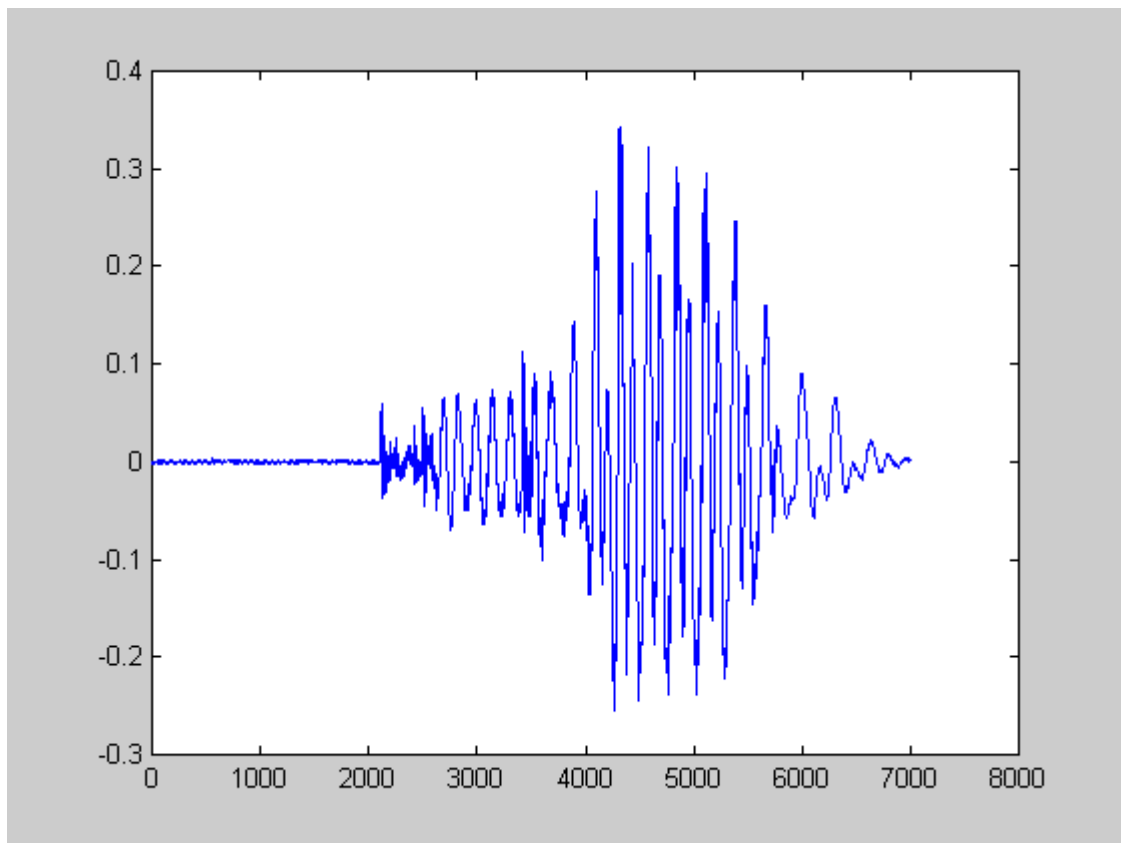


Figure 1 : Signal de pression capté par un microphone. Il s'agit ici du mot « est » (verbe être, 3^e p.s.), prononcé par un locuteur et extrait d'une phrase. En abscisse figure le numéro d'échantillon (fréquence d'échantillonnage 44.1 kHz). En ordonnée : amplitude relative du signal de pression.

Des termes tels que « bruit impulsionnel », « écho », « réverbération », « attaque d'un son », ... font référence à la dimension temporelle du son.

Le signal de pression capté ou mesuré au récepteur, et illustré à la figure 1, peut être ensuite traité, enregistré, reproduit, etc...L'acoustique cède alors la place au « traitement du signal audio », ou plus simplement à l'**audio**, domaine plus proche de l'électronique, du multimédia et de l'informatique.

Le son peut également être étudié selon sa dimension fréquentielle ou spectrale. Pour rappel, la **fréquence** d'une vibration harmonique est le nombre d'oscillations par seconde (Hertz).

Les sons « purs », c'est-à-dire ne contenant qu'une seule fréquence, sont rares. La plupart des sons constituant notre environnement sonore habituel sont composés d'une multitude « de fréquences », dont on peut représenter la répartition en intensité par le **spectre** du son (figure 2).

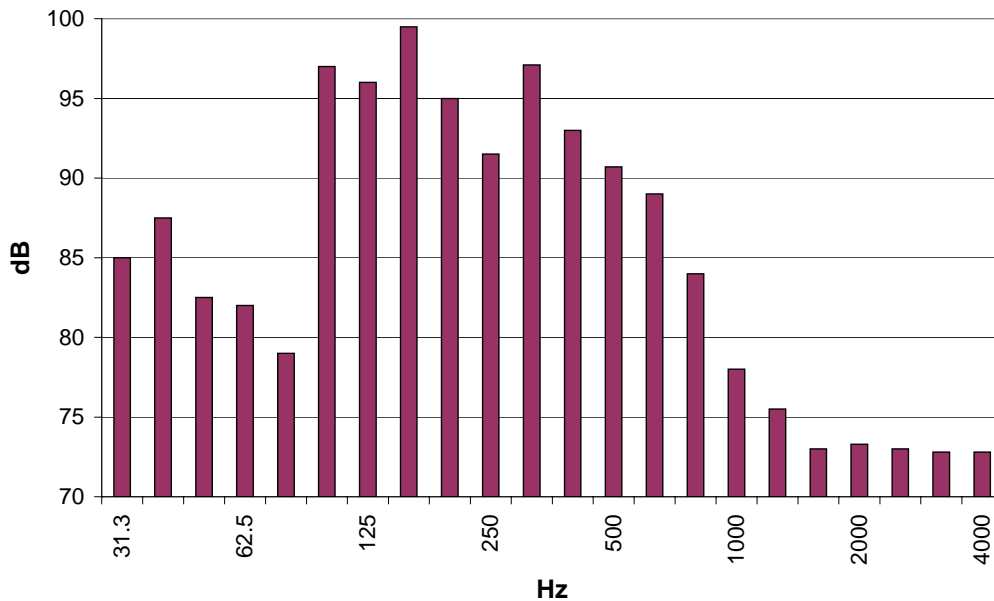


Figure 2 : Spectre d'un bruit de trafic en tiers d'octave.

Notre oreille est sensible aux fréquences dites « audibles », c'est-à-dire comprises entre 20 Hz et 20 kHz. En dessous de 20 Hz, on parlera d'**infrasons**, et au-dessus de 20 kHz d'**ultrasons**.

Des termes tels que « grave » (fréquence basse), « aigu » (fréquence élevée), « coloration du son », ... font référence à la dimension spectrale du son.

Le son peut enfin être étudié selon sa dimension spatiale. La pression acoustique, les vibrations, se propagent d'un endroit à un autre dans un même milieu.

La propagation n'est pas instantanée : dans l'air, à température ambiante, les ondes sonores voyagent à la vitesse approximative de **340 mètres par seconde**. Cette vitesse augmente légèrement avec la température. Dans l'eau, elle avoisine les 1500 mètres par seconde.

Les ondes sonores peuvent passer d'un milieu à un autre : ainsi, un son peut traverser une paroi.

Des termes tels que « propagation », « répartition du niveau sonore », « carte de bruit », « diffraction par un écran anti-bruit », ... font référence à la dimension spatiale du son.

2. L'intensité d'un son, le décibel, le décibel A

La grandeur physique caractérisant habituellement un phénomène sonore est la pression acoustique. A un endroit donné, cette pression évolue au cours du temps (figure 1).

L'intensité d'un son est représentée par la valeur efficace du signal de pression $p(t)$:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1)$$

où T est une période d'analyse à spécifier.

Pour être précis, du point de vue physique, l'intensité est proportionnelle au carré de la pression efficace. Du point de vue physiologique, l'intensité d'un son est liée à notre « impression de force sonore » : plus la pression efficace est élevée, plus le son nous paraît « fort », « intense », et inversement.

Notre oreille est limitée dans la perception des intensités. Nous ne pouvons pas percevoir les sons trop faibles : le seuil inférieur de l'audition est de 20 μ Pa (p_{eff}) à la fréquence de 1000 Hz ou 1 kHz, et ce seuil varie avec la fréquence (figure 3) et avec l'âge. A l'inverse, nous atteignons le « seuil de douleur » à environ 20 Pa (à 1 kHz).

Figure 3 : Seuil d'audibilité et seuil de douleur (pour un auditeur « normal ») en fonction de la fréquence (en cycles/s ou Hz). La pression efficace est exprimée ici en baryes : 1 barye=0.1 Pa.

Pour couvrir de manière conviviale cette gamme très étendue (de 20 μ Pa à 20 Pa), les acousticiens ont adopté une échelle d'intensité logarithmique : **le décibel**. Pour passer des Pascals aux décibels, la formule suivante doit être appliquée :

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{eff}(Pa)}{0.00002} \right) \quad (2)$$

L_p est le symbole habituellement utilisé pour représenter le **niveau de pression** en décibels. Ainsi, 0dB correspond au seuil d'audibilité à 1 kHz, tandis que 120 dB correspond au seuil de douleur. Le niveau de pression d'une conversation se situe entre 50 et 60 dB.

L'échelle étant logarithmique, les décibels se combinent de manière assez particulière. Ainsi, lorsque deux sources de bruit différentes créent, à un endroit donné, le même niveau sonore (chacune séparément), l'intensité résultante est *doublée* lorsque les deux sources fonctionnent simultanément (p_{eff}^2 est multiplié par

deux, en pascals au carré). En décibels, cela se traduit par une *augmentation du niveau de 3 dB* : $80\text{dB} + 80\text{dB} = 83\text{dB}$!

En général, pour combiner « N » niveaux sonores L_{p1}, \dots, L_{pN} , on utilisera la formule suivante :

$$L_{p,total} = 10 \log_{10} \left(10^{L_{p1}/10} + \dots + 10^{L_{pN}/10} \right) \quad (3)$$

Le **décibel A** (dB(A)) est une échelle d'évaluation des niveaux sonores plus proche de notre sensibilité auditive. En effet, la figure 3 montre clairement que notre oreille est plus sensible aux fréquences proches de 1-2 kHz qu'aux basses fréquences et aux très hautes fréquences.

On peut tenir compte de cette particularité en introduisant dans l'appareil de mesure des niveaux sonores un filtre fréquentiel (le **filtre A**), dont la sensibilité en fréquence imite grossièrement celle de l'oreille humaine : la mesure se lit alors **en dB(A)**. La combinaison de niveaux en dB(A) obéit à la même arithmétique que les niveaux en dB : cfr. expression (3).

Le dB(A) est surtout utilisé pour caractériser la **gêne acoustique**.

3. Mesures par octave, par tiers d'octave

La plupart des spectres acoustiques sont représentés avec une échelle logarithmique en fréquence. Les graduations caractéristiques de cette échelle sont normalisées : 31.25, 62.5, 125, 250, 500 Hz, suivies de 1, 2, 4, 8 et 16 kHz. Chaque fréquence caractéristique de l'échelle est donc exactement **une octave** plus haut que la précédente (fréquence doublée).

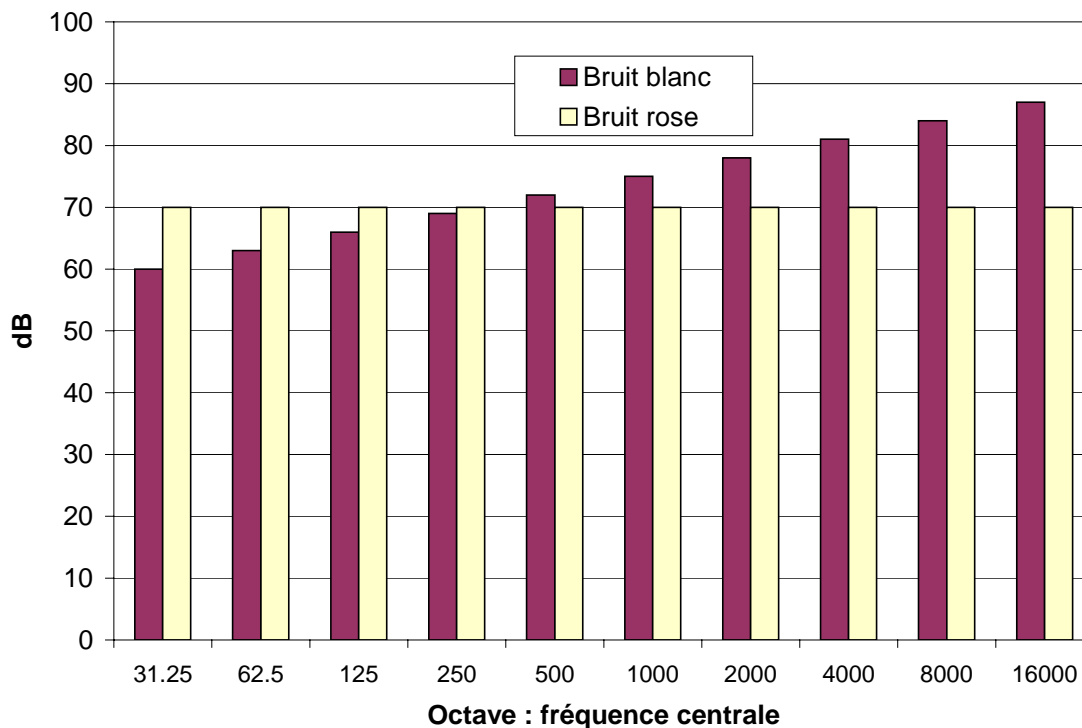


Figure 4 : Spectres d'un bruit blanc et d'un bruit rose.

Dans un spectre acoustique, l'intensité est comptabilisée dans un intervalle de fréquences entourant ces fréquences dites « centrales » : la **bande d'octave**. Une bande d'octave s'étend de $0.71 f_c$ à $1.41 f_c$ (où f_c est la fréquence centrale normalisée) : c'est un intervalle essentiellement variable, puisque chaque bande d'octave est le double (en Hz) de la précédente.

L'analyse spectrale peut être plus fine : ainsi, la figure 2 représente la mesure d'un spectre de bruit en **tiers d'octave**.

Un **bruit blanc** est un bruit de type aléatoire, dont l'intensité est constante dans chaque intervalle de 1Hz. A l'audition, on entend un bruit de souffle. Le spectre en bandes d'octave du bruit blanc montre une croissance de 3 dB par octave, puisque l'intensité par Hz est constante, mais que les bandes d'octave suivent une progression géométrique d'ordre 2 en largeur (intensité doublée = +3dB).

Un **bruit rose** est aussi un bruit de type aléatoire, mais dont l'intensité est *constante dans chaque bande d'octave*.

4. L'analyse statistique d'un son, le niveau équivalent

L'analyse des bruits à l'intérieur ou à l'extérieur des habitations révèle souvent que leur niveau de pression L_p fluctue au cours du temps. Ainsi, la représentation graphique du niveau sonore mesuré au bord d'une route montrera clairement le passage d'un véhicule par une élévation temporaire de ce niveau : cfr. figure 5.

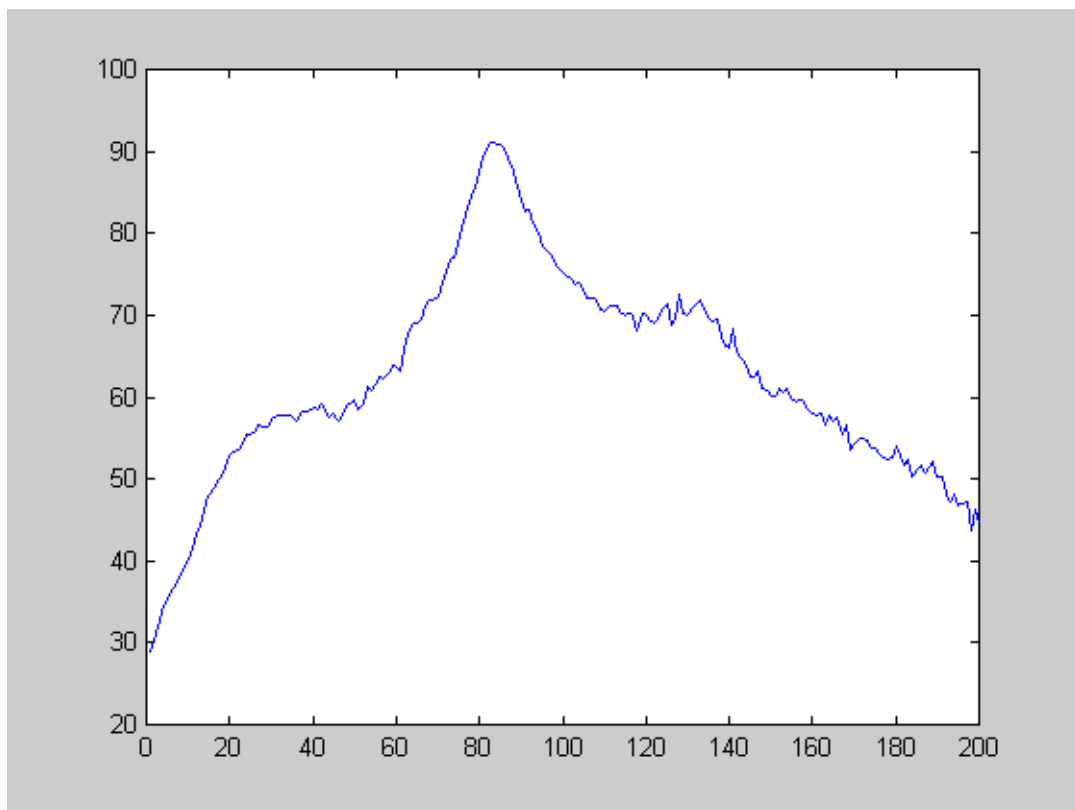


Figure 5 : Niveau de pression (dB) relatif au passage d'un véhicule, mesuré à proximité d'une route. Sur l'axe horizontal des temps, une unité correspond à environ 0.125 sec (une graduation=20 unités=2.5 secondes).

Différents indicateurs peuvent être utilisés pour caractériser la gêne acoustique ressentie. Par exemple, le *niveau maximum* atteint par le véhicule le plus bruyant, ou encore le *niveau moyen*, évalué sur une période donnée.

L'expérience montre qu'une moyenne énergétique est un bon indicateur de la gêne acoustique subie lors d'une exposition à un bruit. On définit dès lors le **niveau équivalent d'un bruit fluctuant** comme « le niveau du bruit d'intensité constante qui présenterait la *même énergie* que le bruit fluctuant, pendant la *même période d'analyse T* » : symbole $L_{eq,T}$.

Concrètement, le niveau équivalent est évalué après une **analyse statistique** du bruit. Un sonomètre est installé à l'endroit de la gêne et mesure en permanence, toutes les x secondes pendant la période d'analyse T , le niveau de pression L_p . Si, au cours de la période T , les niveaux sonores L_{p1}, \dots, L_{pN} , sont mesurés pendant les durées $\Delta t_1, \dots, \Delta t_N$, alors :

$$L_{eq,T} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \left(\Delta t_1 10^{L_{p1}/10} + \dots + \Delta t_N 10^{L_{pN}/10} \right) \quad (4)$$

Lorsque des niveaux équivalents sont mentionnés dans un rapport de mesure, ou dans un texte réglementaire, il est important de définir la période T ayant servi de référence à ces mesures. Il ressort clairement de l'expression (4) que cette période joue un rôle tout à fait fondamental dans l'évaluation du $L_{eq,T}$.

Si les niveaux sonores sont mesurés en dB(A), le niveau équivalent est aussi exprimé en dB(A). Le symbole est alors $L_{eq,A,T}$ ou encore $L_{eq,A}$ (si la période T est implicitement connue).

Dans certaines problématiques liées à la gêne acoustique, une pondération différente est adoptée suivant l'instant de la mesure. Ainsi, pour caractériser la gêne ressentie au voisinage des aéroports, on peut utiliser le L_{dn} : cet indice exprime un niveau équivalent, avec $T=24h$, pour lequel les mesures de nuit sont artificiellement pénalisées d'un excédent de 10 dB(A).

Le **sonomètre** est l'instrument de mesure acoustique type, utilisé dans la surveillance et l'évaluation des niveaux sonores dans l'environnement. Constitué d'un microphone, relié à un préamplificateur et à un écran d'affichage LCD, il est capable de délivrer non seulement des niveaux de pression efficace instantanés en dB ou dB(A), mais également d'effectuer une analyse spectrale en octave ou en tiers d'octave. Dans sa version « intégratrice » (**sonomètre intégrateur**), l'appareil peut mesurer des niveaux équivalents $L_{eq,T}$ selon la formule (4) et effectuer une analyse statistique complète du bruit, sur une période T déterminée.

5. La réverbération et l'absorption

Dans un espace intérieur, les ondes sonores parvenant à l'auditeur (ou au récepteur) proviennent :

- soit directement des sources ;
- soit des parois délimitant l'espace de propagation, après une ou plusieurs réflexions.

Ainsi, lorsque les sources s'arrêtent, le récepteur continue à capter les ondes réfléchies pendant un certain temps : ce phénomène s'appelle **la réverbération**.

Le **temps de réverbération** est une mesure de ce phénomène : il s'agit du temps mis par l'énergie sonore pour décroître de 60 dB après arrêt de la source. Dans la plupart des situations courantes, le temps de réverbération est compris entre 0.5 et 2.5 secondes. Quelques exceptions :

- dans une chambre anéchoïque, le temps de réverbération est nul (pas de réflexion sur les murs, donc pas de réverbération) ;
- dans une cathédrale, l'emploi de matériaux très réfléchissants (pierre, verre, béton lisse) permet d'atteindre des temps de réverbération compris entre 5 et 10 secondes ;
- ce dernier effet est poussé à l'extrême dans ce que l'on appelle une « chambre réverbérante », où des temps de réverbération de 15 à 20 secondes peuvent être atteints en basse fréquence.



Figure 7a : Chambre anéchoïque de l'institut Montefiore (Université de Liège)

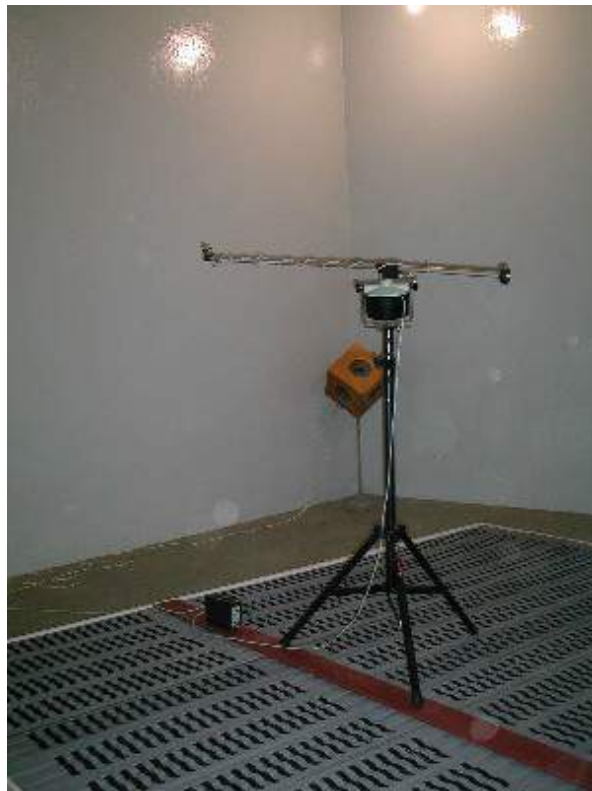


Figure 7b : Chambre réverbérante de l'institut Montefiore (Université de Liège), avec échantillon-test au sol.

Le temps de réverbération dépend de la fréquence : il est en cela directement lié aux coefficients d'absorption des parois délimitant l'espace intérieur. Le **coefficient d'absorption (symbole α)** d'une surface est défini comme le pourcentage d'énergie acoustique incidente absorbé par la surface. Il dépend principalement du (des) matériau(x) constituant la surface, du type de champ sonore incident et de la

fréquence. Le coefficient d'absorption sous incidence diffuse est mesuré en chambre réverbérante (voir figure 7b).

En basse fréquence, les coefficients d'absorption sont souvent plus faibles (du moins pour les matériaux couramment utilisés dans la construction), et donc la réverbération y est plus élevée qu'à haute fréquence.

Dans la conception d'espaces intérieurs (salles de cours, salles de spectacle, espaces publics, ...), l'acousticien assistera l'architecte dans le choix des matériaux et leur disposition afin d'atteindre un temps de réverbération optimal. Ce choix sera basé sur la connaissance des propriétés « absorbantes » des matériaux utilisés, propriétés que l'on peut obtenir à l'aide de tests acoustiques normalisés, dans des laboratoires agréés, et que chaque fabricant est invité à mentionner dans la description technique de son produit.

Figure 8 : Coefficient d'absorption de la laine de verre en fonction de la fréquence

6. L'isolation acoustique

Ce point faisant l'objet d'une communication spécifique au cours de la journée, il ne sera pas détaillé ici.

Signalons simplement en introduction que le « pouvoir isolant » acoustique d'une paroi est mesuré par la différence de niveau sonore de part et d'autre de cette paroi, lorsqu'une source émet d'un côté (local d'émission). **L'indice d'affaiblissement acoustique R** de la paroi (en dB) peut ainsi être déterminé, selon des procédures de mesure bien établies, en laboratoire ou in-situ.

Cet indice dépend de la fréquence : il est *en général* plus faible en basse fréquence (figure 9).

Le profane confond souvent absorption et isolation acoustiques. Il faut savoir qu'un matériau ayant de bonnes propriétés absorbantes (la laine de verre, par exemple) n'est pas nécessairement un bon isolant. Les caractéristiques physiques du matériau intervenant dans l'une et l'autre propriété sont en général différentes : ainsi, la masse surfacique joue un rôle prépondérant pour l'isolation, ce qui rend la laine de verre brute totalement inefficace.

Figure 9 : Exemple d'indice d'affaiblissement R en fonction de la fréquence

7. Bibliographie

- [1] Beranek L.L., Acoustics, Mc Graw-Hill (1954) ;
- [2] Kuttruff H., Room Acoustics, 4th edition, Elsevier Applied Science (2000) ;
- [3] Bies D.A. and Hansen C.H., Engineering Noise Control, Spon Press (1995) ;
- [4] Morse P.M. and Ingard K.U., Theoretical Acoustics, Mc Graw-Hill (1968) ;
- [5] Fahy F. and Walker J., Fundamentals of Noise and Vibration, Spon Press (1998) ;
- [6] Beranek L.L., Noise and Vibration control, Mc Graw-Hill (1971) ;
- [7] Embrechts J.J., Acoustique du bâtiment et lutte contre le bruit, notes de cours (Université de Liège).

$$T_R = \frac{0.163 \text{ V}}{\alpha \text{ S}}$$