

Chers étudiants

Bonjour à toutes et à tous.

J'espère que vous allez bien et que vous prenez toutes et tous bien soin de vous.

Comme cela nous a été demandé de procéder par l'administration, et cela conformément aux directives du ministère, le cours ci-après est le premier parmi une série de cours qui vont être conçus et mis en ligne spécialement pour que vous puissiez quand même travailler, et cela tant soit peu, pendant la période de confinement, liée à la pandémie du covid-19.

Personnellement, j'ai demandé qu'un sondage soit fait pour que je puisse m'assurer qu'il n'y a aucun étudiant en Master1 qui ne soit doté d'un ordinateur et d'une connexion internet continue. Le sondage a été mis en ligne mais le nombre trop faible de participants a fait que celui-ci n'a malheureusement pas abouti. La seule solution qui reste, est donc de mettre en ligne, comme cela a été exigé, les cours et les exercices de TD et que vous allez devoir faire sans du tout être dirigés par un enseignant. Les tout premiers cours et TD, qui ont déjà été faits ne seront pas repris ici.

Cependant, dans le texte de ce premier cours, dans ce qui suit, il y a quand même une première partie, qui a déjà été traitée en amphi, et une seconde partie, qui la complète et qui est traitée ici, pour la première fois. La première partie, comme expliqué, a été reprise pour faire en sorte à avoir, avec les deux parties, la continuité qui est absolument nécessaire pour la compréhension de la totalité du cours. Il y a lieu de savoir aussi que pour faire le travail du TD correspondant, et qui à son tour, va être mis en ligne très prochainement, il est indispensable que vous ayez entre les mains, la totalité du cours avec ses deux parties.

Donc, pour tout le temps de confinement qui reste, à chaque semaine, il sera mis en ligne, de la même façon, un cours et un travail de TD. Pour chacun des TD, vous aurez le sujet des exercices, la semaine même du cours. Vous disposerez ainsi d'une semaine pour faire le travail, après quoi, la solution entièrement rédigée sera mise en ligne la semaine d'après. Il est donc vivement conseillé d'obtenir par vous-même la solution et de n'utiliser celle qui est fournie par l'enseignant, que pour les vérifications et les éventuelles corrections.

Chers étudiants, même si le confinement que nous vivons est très anxiogène, j'espère que vous restez quand même positifs et que vous allez essayer de travailler un peu, parce que le travail pourrait, pour nous tous, nous aider, peut-être, à mieux supporter la situation très contraignante dans laquelle nous nous trouvons.

Bon travail et à mercredi prochain, pour le deuxième cours et le deuxième travail de TD.

1.3 Relation entre puissance acoustique et intensité acoustique

La pression acoustique ainsi que l'intensité acoustique sont deux grandeurs physiques qui caractérisent la volume du son et qui se mesurent respectivement en [Pa] et en $\frac{W}{m^2}$. A l'inverse, le niveau de pression acoustique, le niveau de puissance acoustique et le niveau d'intensité acoustique se mesurent, quant à eux, tous en décibel [dB] et ils ne constituent pas des grandeurs purement physiques mais des grandeurs qui sont liées à la sensation de l'oreille humaine, qui en l'occurrence, obéit à une loi logarithmique.

$$\boxed{I = \frac{p^2}{\rho \cdot c}} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{kg}{s^3} \quad (1.3.1)$$

$$p : \text{pression acoustique } Pascal \equiv Pa = \frac{N}{m^2} = \frac{kg \cdot \frac{m}{s^2}}{m^2}$$

$$\rho : \text{masse volumique de l'air à } 25^\circ C \quad \rho = 1.18 \frac{kg}{m^3}$$

$$c : \text{célérité ou vitesse du son dans l'air à } 25^\circ C \quad c = 340 \frac{m}{s}$$

1.4 Relation entre puissance acoustique et intensité acoustique

$$\boxed{I = \frac{P}{S}} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.4.1)$$

Une source sonore émet le son pendant un intervalle de temps donné avec une puissance, en Watts, plus ou moins grande. Cette puissance représente une certaine énergie acoustique en Joules par unité de temps.

$$P = \frac{E}{t} \quad \left[W = \frac{J}{s} \right]$$

Après son émission, le son se propage dans l'air suivant les trois formes d'ondes possibles : ou bien 1) une onde unidirectionnelle ou onde plane ; ou bien 2) une onde linéaire ou onde cylindrique ; ou finalement 3) une onde omnidirectionnelle ou onde sphérique.

Dans le cas le plus général, la propagation d'un son d'une puissance P , se fait selon le mode 3) à partir de la source S dans toutes les directions, dans des sphères dont le centre est situé en S et dont les rayons vont en augmentant, au fur et à mesure que le son s'éloigne de la source.

A un instant donné, le son arrive à la distance « r », c'est-à-dire que la puissance énergétique de départ P est répartie à ce instant-là sur la totalité de la surface de la sphère dont le rayon est justement égal à « r ». La puissance du son se retrouve par conséquent répartie sur le nombre total de m^2 , dont est constituée la surface de cette sphère.

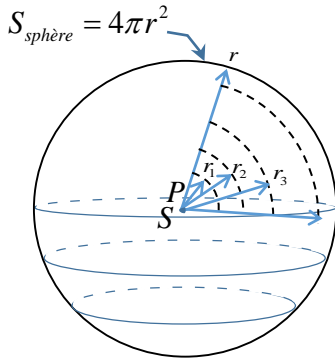


Figure 1.3.1 : Agrandissement de la sphère et augmentation de sa surface lors de la propagation du son à partir de la source.

Pour chaque m^2 de la surface de la sphère, l'intensité acoustique à la distance r de la source sera par conséquent

$$I_r = \frac{P}{4\pi r^2} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.4.2)$$

En d'autres termes, si le son est une onde omnidirectionnelle, celle-ci se propage dans toutes les directions et son intensité, comme on le vérifie dans la pratique, diminue lorsqu'on s'éloigne de la source S . Cette diminution de l'intensité acoustique, lorsqu'on se trouve de plus en plus loin de la source S , s'explique par le fait que, la puissance P , c'est-à-dire

l'énergie acoustique par unité de temps, émise par la source sonore, se répartit sur la surface d'une sphère de plus en plus grande, du fait que le rayon " r " de cette sphère va en augmentant (Fig. 1.3.1), lorsque le son se propage.

Remarque importante : Comme la propagation du son dans l'air se fait, dans la quasi-majorité des cas, de façon omnidirectionnelle, c'est donc uniquement ce mode de propagation qui sera toujours considéré tout le long de ce cours. Cependant, à chaque fois qu'il s'agira d'une propagation sous forme d'ondes planes ou linéaires ou bien dans les cas d'une propagation dans des milieux autres que l'air, il en sera fait mention de façon explicite. Par conséquent, dans tout ce qui suit, la propagation du son sera omnidirectionnelle et donc les ondes sonores, toujours de forme sphérique.

1.5 Niveau d'intensité acoustique en champ libre ou champ direct, à la distance r , en fonction de la puissance acoustique

$$L_{I_r} = 10 \log \frac{I_r}{I_0} \quad [dB] \quad (1.5.1)$$

Sachant que

$$I_r = \frac{P}{4\pi r^2} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

avec

$$I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

Il advient

$$L_{I_r} = 10 \log \frac{P}{4\pi r^2 I_0} = 10 \log \frac{P}{4\pi r^2} - 10 \log I_0 = 10 \log P - 10 \log 4\pi r^2 - 10 \log I_0$$

avec

$$P_0 = 1 \cdot 10^{-12} W$$

On montre que $10\log I_0 = 10\log P_0$ et donc $L_{I_r} = 10\log \frac{P}{P_0} - 10\log 4\pi r^2$

Sachant que le niveau de puissance acoustique L_W est donné par

$$L_W = 10\log \frac{P}{P_0} \quad [dB] \quad (1.5.2)$$

Finalement

$$L_{I_r} = L_W - 10\log 4\pi r^2 \quad [dB] \quad (1.5.3)$$

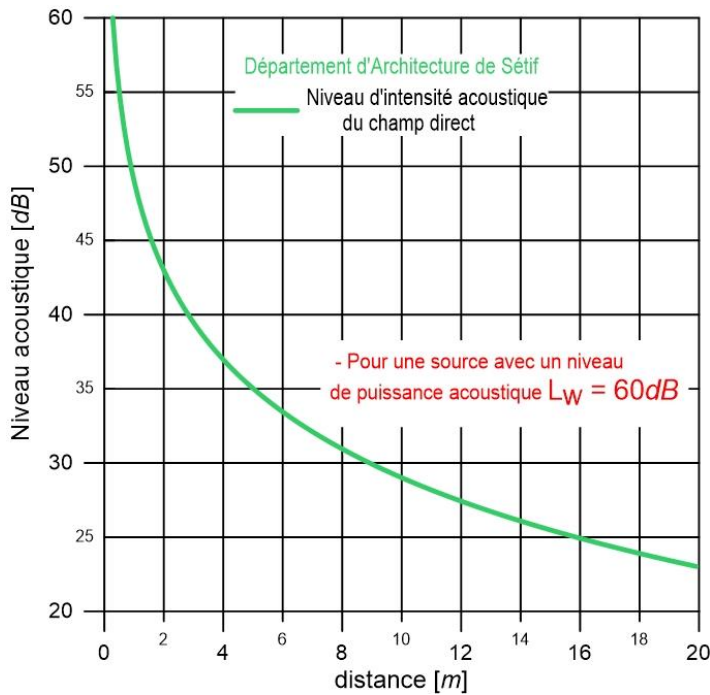


Figure 1.5.1 : Niveau d'intensité acoustique du champ direct en fonction de la distance - Propagation omnidirectionnelle - Source de 60dB.

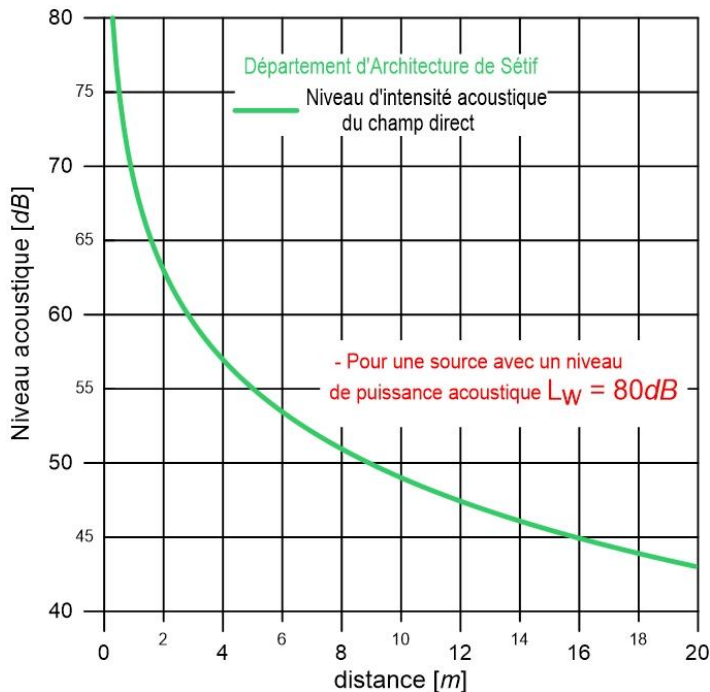


Figure 1.5.2 : Niveau d'intensité acoustique du champ direct en fonction de la distance - Propagation omnidirectionnelle - Source de 80dB.

1.6 Niveau d’intensité acoustique, à la distance r de la source sonore, dans une salle – Coexistence des champs direct et réverbéré

A l’inverse de la propagation du son à l’air libre, c’est-à-dire à l’extérieur, l’émission de sons, à l’intérieur de salles, crée, en plus du champ acoustique direct, un deuxième champ acoustique que l’on appelle champ acoustique réverbéré. A l’intérieur d’une salle, le champ acoustique direct obéit aux mêmes lois que celles qui gouvernent la propagation du son à l’extérieur. Le champ acoustique réverbéré, qui existe simultanément avec le champ direct, va obéir à d’autres lois, vu qu’il prend naissance à partir des réflexions dans toutes les directions, par toutes les parois, et verticales et horizontales, de la salle. Ce champ réverbéré va persister dans la salle, après l’émission de chaque son, et cela pendant une certaine durée, que l’on appelle durée de réverbération. Dans ce chapitre, la question de la durée de réverbération ne sera pas abordée, mais elle le sera plutôt, dans le chapitre consacré au traitement acoustique des salles. Ici, nous n’allons traiter que du problème du niveau d’intensité acoustique résultant des effets conjugués des deux champs acoustiques, à savoir : le champ direct, en traits continus, et le champ réverbéré, en pointillés sur la figure 1.6.1 a) et b).

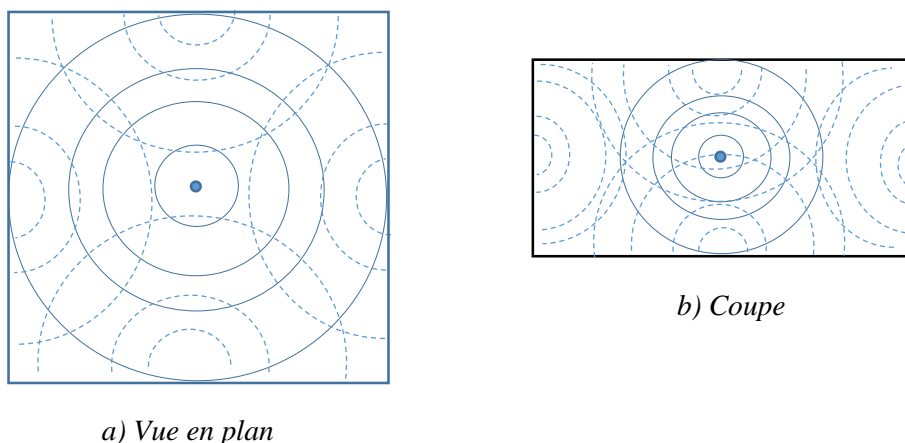


Figure 1.6.1: Représentation des champs acoustiques direct et réverbéré, dans une salle de forme parallélépipédique.

Dans une salle, le niveau d’intensité acoustique en un point est dû à l’effet simultané de l’intensité acoustique du champ direct et de l’intensité acoustique du champ réverbéré.

$$L_{I_r} = 10 \log \frac{I_r}{I_0} = 10 \log \left(\frac{I_1 + I_2}{I_0} \right) \quad [dB] \quad (1.6.1)$$

L’intensité du champ direct au point situé à la distance r par rapport à la source est donnée, d’après l’équation (1.4.2), par

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (1.6.2)$$

et l'intensité du champ réverbéré par

$$\boxed{I_2 = \frac{4P}{R}} \quad (1.6.3)$$

où la constante R de la salle est donnée par :

$$\boxed{R = \frac{S_t \times \alpha_m}{(1 - \alpha_m)}} \quad (1.6.4)$$

S_t : surface totale de toutes les parois en contact avec l'ambiance intérieure du local, c'est-à-dire, murs, plancher et plafond et même parois se trouvant éventuellement à l'intérieur du local.

α_m : coefficient moyen d'absorption de l'ensemble des parois du local, y compris des parois qui se trouvent éventuellement à l'intérieur du local.

Dans le cas où α_m n'est pas connu a priori, il se détermine avec la relation :

$$\alpha_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots + S_n \cdot \alpha_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (1.6.5)$$

S_i : surfaces des parois en contact avec l'ambiance intérieure du local.

α_i : coefficients d'absorption des matériaux des surfaces en contact avec l'ambiance intérieure du local. Ces surfaces étant les diverses parties opaques des murs, les vitrages, le plafond, le plancher et même d'éventuelles autres surfaces en contact avec l'ambiance intérieure du local.

En introduisant les équations (1.6.2) et (1.6.3) dans (1.6.1), on obtient pour le niveau d'intensité acoustique dans une salle

$$L_{r'} = 10 \log \left(\frac{P}{4\pi r^2} + \frac{4P}{R} \right) - 10 \log I_0$$

$$L_{r'} = 10 \log P \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) - 10 \log I_0 = 10 \log \frac{P}{P_0} + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$\boxed{L_{r'} = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)} \quad [dB] \quad (1.6.6)$$

1.6.1 Rappels utiles à la compréhension et à l'analyse des figures 1.6.1.1.a, b et c

Quatre résultats importants, liés aux niveaux d'intensité acoustique des champs, direct et réverbéré, ont pu être établis, par le calcul, lors des cours et des TD précédents. Il est possible

- *De généraliser ces résultats à l'ensemble de la pratique de l'acoustique en architecture.*

- D'utiliser ces résultats pour mener des calculs, qui vont permettre, dans ce qui suit, de faire ressortir de nouvelles lois extrêmement utiles pour la pratique de l'architecture.

Ces résultats peuvent être résumés comme suit.

- Rappel 1 : La coexistence de deux sons, ayant le même niveau de pression, ou bien de puissance ou bien d'intensité acoustique L , engendre un niveau acoustique résultant

$$L_{\text{résultant}} = L + 3\text{dB}$$

- Rappel 2 : Si parmi deux sons qui existent simultanément, le niveau acoustique de l'un d'entre eux dépasse celui de l'autre de 10dB, le son plus fort couvre complètement le plus faible.

$$\text{Si } L_1 \geq L_2 + 10\text{dB} \quad \text{alors } L_1 \text{ couvre complètement } L_2$$

- Rappel 3 : A chaque doublement de la distance r , lorsqu'on s'éloigne d'une source sonore, le niveau d'intensité acoustique L_I diminue selon la loi

$$L_{I(r \times 2)} = L_{I(r)} - 6\text{dB}$$

Si la distance a été doublée n fois, L_I peut être déterminé selon la loi

$$L_{I(r \times 2^n)} = L_{I(r)} - n \times 6\text{dB}$$

De la même façon, à chaque fois que la distance AB , figure 1.6.1.1, entre la source sonore au point A et un point B , où le niveau d'intensité acoustique L_{I_B} est connu, est divisée par 2, le niveau acoustique devient

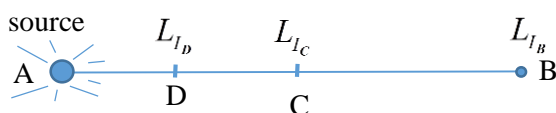


Figure 1.6.1.1 : Multiples et sous multiples de distances par rapport à une source sonore.

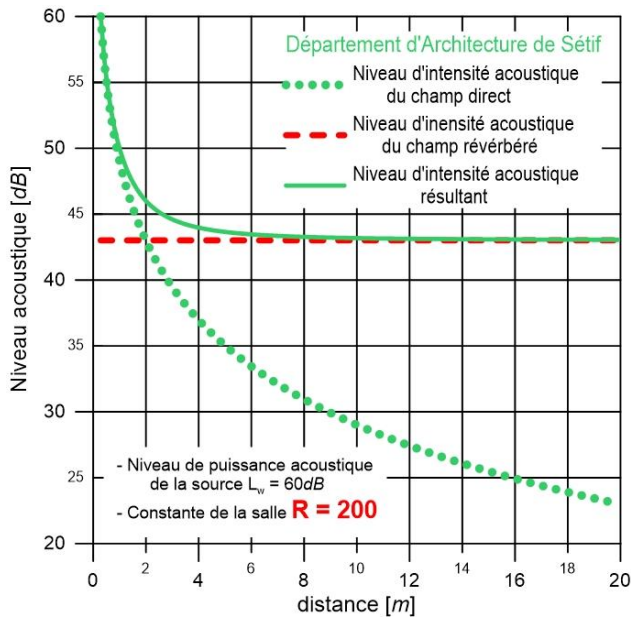
$$\text{si } AC = \frac{AB}{2}$$

$$L_{I_C} = L_{I_B} + 6\text{dB}$$

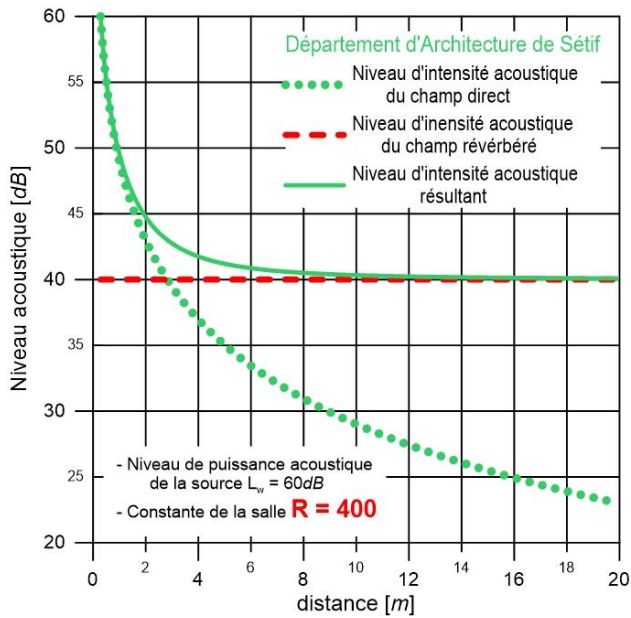
$$\text{si } AD = \frac{AC}{2}$$

$$L_{I_D} = L_{I_C} + 6\text{dB}$$

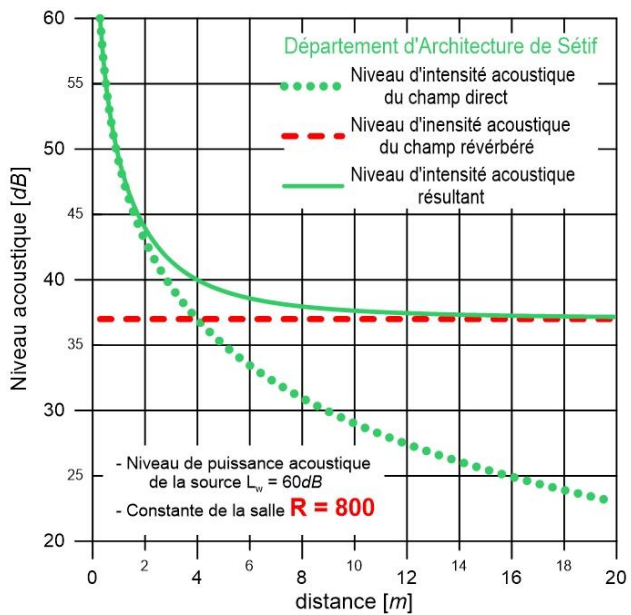
- Rappel 4 : Dans une salle, le champ acoustique réverbéré est indépendant de la distance. Celui-ci est donc identique quel que soit l'endroit où on se place, dans toute la salle.



a) Source de 60dB ; $R = 200$



b) Source de 60dB ; $R = 400$



c) Source de 60dB ; $R = 800$

Figure 1.6.1.1 : Niveaux d'intensité acoustique des champs, direct, réverbéré et résultant, dans une salle en propagation omnidirectionnelle.

1.7 Effet de la directivité des sources sonores sur le niveau d'intensité acoustique à l'intérieur des locaux

D'après la relation 1.6.1 le niveau d'intensité acoustique L_{I_r} , à la distance r de la source, lorsque la propagation du son dans l'air du local est omnidirectionnelle, est donné par

$$L_{I_r} = 10 \log \frac{I_t}{I_0} = 10 \log \left(\frac{I_{Direct} + I_{Réverbéré}}{I_0} \right)$$

$$L_{I_r} = 10 \log \left(\frac{\frac{P}{4\pi r^2} + \frac{4P}{R}}{I_0} \right) = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

Cette relation convient pour les cas où la propagation du son dans l'air est omnidirectionnelle, cas de la figure 1.7.1.a, et où l'intensité acoustique I_{Direct} du champ direct est le résultat de la propagation de la puissance P , à la distance r , sur toute la surface $4\pi r^2$ de la sphère de rayon r de l'onde sphérique. L'intensité acoustique du champ réverbéré $I_{Réverbéré}$, pour sa part, dépend également de la puissance acoustique P mais ne dépend, en revanche, aucunement de la distance. Il est important de faire remarquer qu'en plus de sa dépendance de P , $I_{Réverbéré}$ dépend essentiellement de la constante R de la salle. En d'autres termes, $I_{Réverbéré}$ sera le même, quel que soit l'endroit dans la salle et il sera d'autant plus fort que la puissance P est importante et que R est faible.

Dans le cas où la source sonore, par exemple, est un haut-parleur avec un cône de diffusion, la propagation du son ne peut plus être qualifiée d'omnidirectionnelle, puisqu'elle ne se fait pas dans toutes les directions de la même façon. On dit alors que la propagation du son est directionnelle et elle sera pour cela affectée d'un coefficient de directivité G , qui sera d'autant plus grand que l'angle solide, à l'intérieur duquel se fait la propagation, devient petit.

Sur la figure 1.7.1.b, au lieu que la propagation de la puissance P du son soit omnidirectionnelle, comme dans le cas de la figure 1.7.1.a, elle est plutôt directionnelle puisque la propagation de la puissance énergétique du son se fait plus qu'à l'intérieur de la moitié de sphères de rayons r

, qui se développent depuis le mur vers l'intérieur de la salle, c'est-à-dire sur $\frac{4\pi r^2}{2}$. La relation

ci-dessus devient donc

$$L_{I_r} = 10 \log \left(\frac{\left(\frac{P}{\frac{4\pi r^2}{2}} + \frac{4P}{R} \right)}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{\frac{2 \cdot P}{4\pi r^2} + \frac{4P}{R}}{I_0} \right)$$

Pour l'ensemble des cas décrits par la figure 1.7.1, cette équation s'écrit sous une forme plus générale

$$L_{I_r} = L_w + 10 \log \left(\frac{G}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (1.7.1)$$

Dans le cas de la figure 1.7.1.b par exemple

$$G = 2$$

L'équation (1.7.1) devient

$$L_{I_r} = L_w + 10 \log \left(\frac{2}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 10 \log 2$$

$$L_{I_r} = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) + 3$$

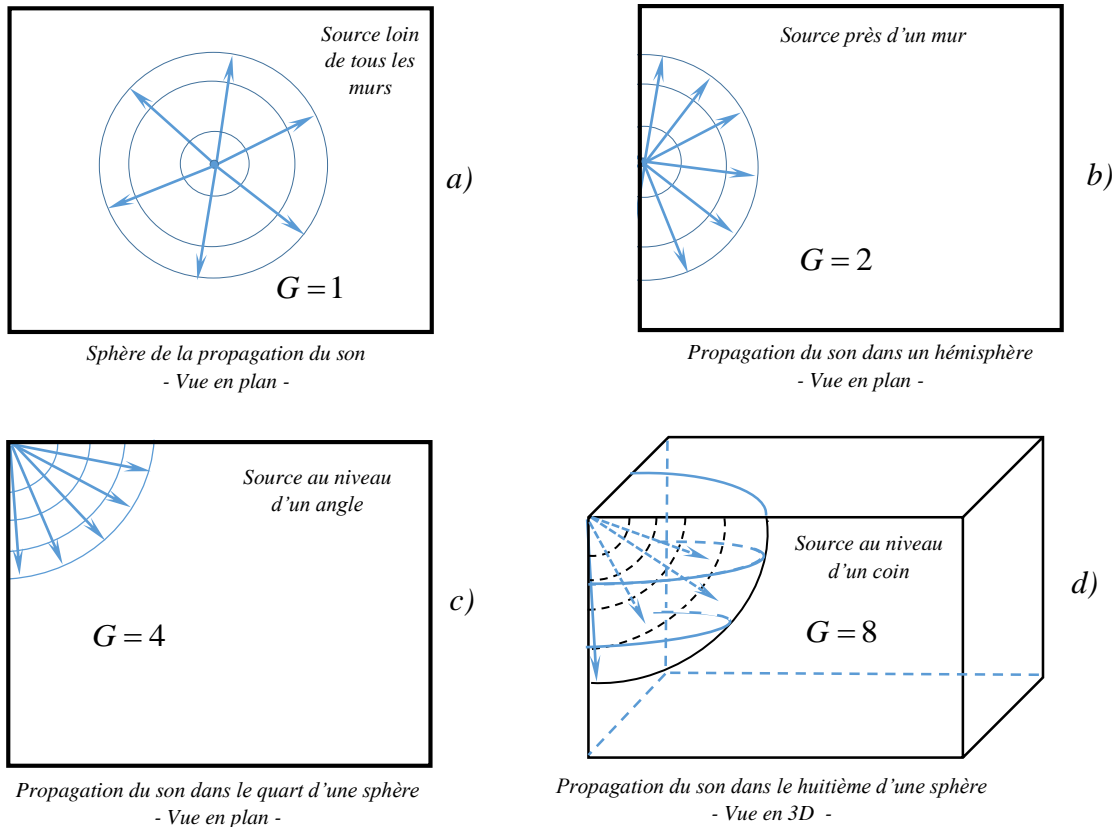


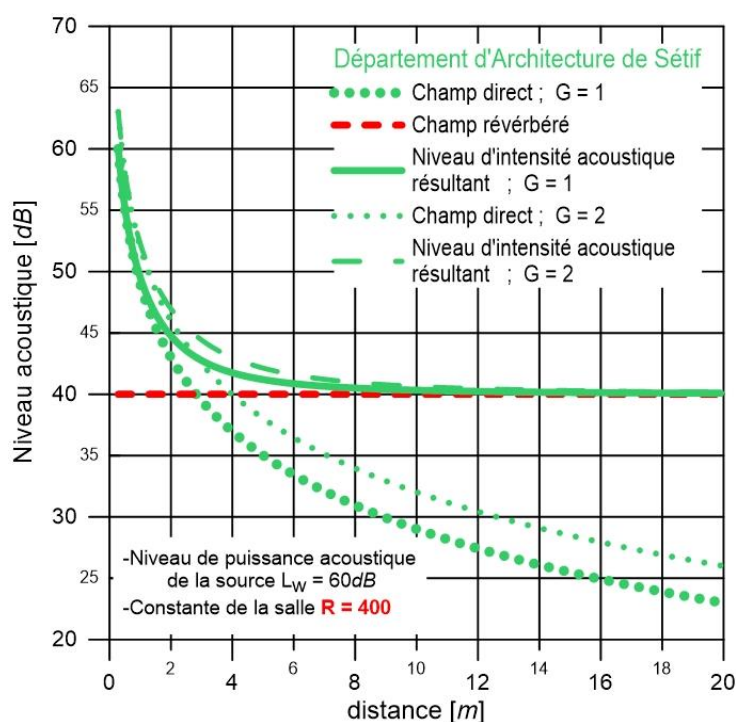
Figure 1.7.1 : Coefficient de directivité G en fonction de la position des sources sonores par rapport aux parois de la salle.

Par rapport au cas de la figure 1.7.1.a, le niveau d'intensité acoustique du champ direct dans l'équation du champ résultant L_r , a augmenté de $3dB$. Cela vient du fait que la moitié de la puissance énergétique totale de la source qui est réfléchiée par le mur vers la salle fait doubler l'intensité acoustique dans cette direction par rapport au cas de la figure 1.7.1.a. Dans le rappel \underline{I} , ci-dessus, il a été établi par le calcul que le doublement d'une source sonore entraîne une augmentation du niveau acoustique de $3dB$.

En allant de la figure 1.7.1.a à la figure 1.7.1.d en passant par les figures 1.7.1.b et 1.7.1.c on remarque qu'à chaque fois, il y a un doublement de l'intensité par le fait du doublement de la valeur du coefficient de directivité G et pour chacune des fois une augmentation de $3dB$.

$$10\log 1 = 10 \cdot 0 = 0dB \quad ; \quad 10\log 2 = 10 \cdot 0.3 = 3dB$$

$$10\log 4 = 6dB \quad ; \quad 10\log 8 = 9dB$$



La figure 1.7.2 ci-contre ainsi que les figures 1.6.1.1 a, b, c et d ci-dessus, sont données dans les paragraphes 1.6 et 1.7 comme représentations graphiques des résultats des calculs qui fournissent les équations des champs acoustiques, direct, réverbéré et résultant. L'analyse plus détaillée et l'utilisation pratique de ces figures se fera ci-dessous dans le paragraphe 2.2.3, et cela dans le but d'améliorer la qualité de l'audition par le contrôle de leur niveaux acoustiques respectifs.

Figure 1.7.2 : Niveaux d'intensité acoustique des champs, direct, réverbéré et résultant, dans une salle en propagation omnidirectionnelle avec $G = 1$ et en propagation directionnelle avec $G = 2$.

Absolute nécessité de la prise en charge de l'acoustique **dans les projets d'architecture**

A l'échelle nationale, la quasi-totalité de la production du cadre bâti est le siège de graves, si ce n'est de très graves, problèmes liés à l'inconfort acoustique. Il n'est pas du tout inutile de rappeler ici que le confort dans le bâtiment, d'une façon générale, est un droit pour les usagers et non un luxe. Construire des bâtiments, consiste et consistera, toujours, à concevoir puis à réaliser des enveloppes dont la raison même d'être, à chaque fois, est et sera toujours, d'abriter une ou plusieurs activités humaines, dans les meilleures conditions de confort et de sécurité possibles, à moindre coût ; conditions, qu'il n'est pas possible de réaliser sans l'existence de ces enveloppes. Pour cela, dans sa quête de qualité, la conception architecturale ne pourra jamais se délester de l'absolute nécessité de la prise en charge de l'éclairage naturel, de l'ensoleillement, de l'acoustique ainsi que de la thermique, pour ne citer que ces paramètres de confort, si essentiels dans les bâtiments qu'elle tente de créer.

Dans sa recherche des meilleures conditions de confort possibles pour les usagers des bâtiments qu'il crée, l'architecte ne manque jamais, de faire en sorte que ces bâtiments soient des œuvres architecturales admirables.

Lorsqu'elle est vraiment admirable, une œuvre architecturale recèle de qualités immatérielles extrêmement individuantes, du fait de l'inspiration qu'elle suscite, du sentiment de sécurité qu'elle procure et de l'élévation vers la transcendance dont elle peut être la source. A chaque fois que l'Homme pratique des espaces, tant intérieurs qu'extérieurs, que l'architecture aura produits avec soin pour lui, et uniquement pour lui, cet être, si beau et si précieux, s'élèvera, en gagnant en humanité, en raffinement et en délicatesse. Il tombe donc sous le sens que l'architecte veuille, à tout prix, éloigner de lui l'idée, d'être lui-même le truchement par lequel cet être, si beau et si précieux, puisse se retrouver dans des conditions d'inconfort, qui ne sont, faut-il le rappeler, rien d'autre que des conditions de souffrance. Or, il est indéniable que toutes les fois où l'acoustique n'est pas prise en charge, lors de la conception et/ou de la réalisation des bâtiments, la mauvaise qualité qui en résulte ne manquera pas d'être à l'origine de très grandes souffrances pour les usagers. Malheureusement, c'est cela qui est le lot des usagers algériens, dans une large majorité de bâtiments, de toutes les catégories, laissés en héritage de la conception architecturale expéditive, à travers tout le territoire national.

Afin de de mettre fin à cet état des choses, il devient très urgent que les nouvelles générations d'architectes algériens voient la conception architecturale sous un jour nouveau.

Chapitre 2

ACOUSTIQUE DES SALLES

La présente formation en « Acoustique » pour les architectes englobe trois préoccupations qui se déclinent ici sous forme de trois chapitres.

Chapitre 1 : Introduction à l'acoustique

Chapitre 2 : Acoustique des salles

Chapitre 3 : Isolation acoustique

Eu égard au temps imparti pour l'ensemble de la formation, les trois chapitres, et en particulier l'actuel chapitre 2, ne peuvent être dispensés que de façon non exhaustive.

L'étudiant est par conséquent appelé à parfaire ses connaissances et son savoir-faire, dans ce domaine, à titre personnel, et cela, même après la fin de ses études.

2.1. Introduction

La partie de l'acoustique du bâtiment, qui traite de l'isolation acoustique, s'occupe essentiellement de la transmission des sons, entre l'intérieur du local qui est pris en charge et l'extérieur ou bien les autres locaux, et cela, dans un sens de la transmission comme dans l'autre. Le but recherché est l'affaiblissement du niveau acoustique des bruits transmis, qui sinon, seraient gênants et préjudiciables aux activités abritées par les locaux que l'on désire protéger.

L'acoustique des salles, quant à elle, s'occupe par contre essentiellement des sons qui prennent naissance et qui se propagent à l'intérieur même du local, qui est pris en charge. Dans ce cas, l'objectif recherché est la recherche de l'amélioration de la qualité de l'audition ou de l'écoute au sein même de ces salles, par des traitements ou bien des corrections qui mettent en œuvre, ou bien des moyens architecturaux, ou bien des matériaux adaptés, ou bien les deux à la fois.

La prise en charge de l'acoustique des salles, nécessite de procéder d'abord à un listage et un catalogage des différentes classes de salles et de mettre par la suite en lumière les qualités acoustiques qui les caractérisent et que l'acoustique des salles est appelée à y assurer. Ainsi, on remarquera que le mot de salle est en général utilisé pour désigner des locaux caractérisés par une relative grande surface. On se gardera par exemple d'utiliser le mot de salle, pour parler des locaux tels les chambres ou bien les bureaux. Par contre, on parlera volontiers de salle de séjour, de salle d'un café, d'un restaurant, d'opérations, de classe, de conférences, de concert, des fêtes, de sport, ...etc. Concernant spécifiquement la qualité de l'audition, on fera la distinction entre les salles destinées à la parole, celles destinées à des représentations musicales et les salles destinées pour des utilisations diverses.

- Les salles destinées à la parole doivent être le siège d'un niveau élevé d'intelligibilité, c'est-à-dire que les mots qui y sont prononcés doivent être compris sans effort par tous les auditeurs quel que soit l'endroit dans la salle. On distinguera pour cette classe de salles, les auditoriums, les salles conférences, les amphithéâtres, salles de prière, salles de cours, salles de réunions ainsi que toutes les salles qui partagent les mêmes caractéristiques. Les salles des cafés ou bien des cafés littéraires, les restaurants, les salons des hôtels sont autant de salles où les sources sonores peuvent ne sont pas être ponctuelles mais où la parole doit être intelligible.

- Les salles destinées aux petites et aux grandes représentations musicales, et qui nécessitent une acoustique particulière, sont les salles de concert ou bien les salles de grand concert ainsi que toutes sortes de salles des fêtes. Ces salles demandent des indices d'intelligibilité moins importants que pour les salles destinées à la parole mais doivent être le

siège d'un niveau de réverbération plus grand et qui doit d'ailleurs être de plus en plus important en allant des petites salles jusqu'aux salles de grand concert.

- Les salles destinées pour des utilisations diverses, c'est-à-dire les salles qui abritent, de façon simultanée ou non, des activités liées à la musique mais aussi des activités liées à la parole. Ce sont toutes les salles telles que les théâtres, les salles polyvalentes et les salles d'opéra.

2.2 Paramètres à contrôler lors de la conception des salles

La conception d'une salle, où une certaine qualité de l'audition est demandée, passe par le contrôle des paramètres qui président normalement à réalisation de cette qualité. Le contrôle doit pour cela être systématique et doit intéresser la totalité de ces paramètres. En effet, si un seul de ces paramètres devait être méprisé, lors de la conception, l'activité que la salle était sensée abriter dans de bonnes conditions, pourrait être définitivement compromise. Si tel était le cas et une fois la construction achevée, la correction après coup de l'ensemble problèmes résultants sera, d'une part, à l'origine de retards importants quant à l'entrée en activité de la salle, et demandera, d'autre part, de dépenses supplémentaires, en général très importantes. Les critères de qualité à respecter se divisent en deux groupes qui sont donnés ci-dessous.

Premier groupe

- ✗ Niveau acoustique maximum toléré en l'absence de son émis dans le local.
- ✗ Durée de réverbération réelle conforme à la durée optimale.
- ✗ Niveau d'intensité acoustique ou niveau sonore suffisant dans l'ensemble de la salle.
- ✗ Absence d'écho.
- ✗ Absence de focalisation.

Deuxième groupe

- ✗ Structure des premières réflexions
- ✗ L'indice d'intelligibilité

2.2.1 Niveau acoustique maximum toléré (Noise Rating : NR)

Les activités humaines que les locaux abritent dans le bâtiment et qui sont liées à la qualité de l'audition sont très nombreuses et très variées. Dans la salle où doit se dérouler une de ces activités, il est possible qu'il existe du bruit, dont l'origine n'est pas l'activité en question, mais qui peut, en fonction de son niveau acoustique, gêner cette activité et aller même jusqu'à empêcher complètement son déroulement. Par exemple, il n'est pas acceptable que les

spectateurs, dans une salle de cinéma, soient empêchés de vivre pleinement le film qu’ils sont en train de regarder, parce qu’ils n’arrêtent pas d’être gênés par des bruits incessants qui leur parviennent depuis la rue, jusqu’à l’intérieur de la salle.

Dans le tableau 2.1.1, on peut trouver, pour quelques une des activités, les niveaux sonores de bruit (Noise Rating : NR) à ne pas dépasser.

Niveau acoustique maximal toléré NR [dB]	Locaux	Niveau acoustique maximal toléré NR [dB]	Locaux
20	salles de concert, studios d’enregistrement	35-40	grands bureaux, restaurants calmes, commerces
25	auditorium, théâtres, salles de prière, salles de conférence	40-45	laboratoires, restaurants, bureaux de dessin
20-30	maisons d’habitation, hôtels, appartements	45-55	Conditions avec compréhension de la parole minimale
30-35	salles de classe, bibliothèques	50-70	Ateliers, usines

Source : https://energieplus-lesite.be/donnees/acoustique3/niveaux-de-bruit-maximaux-recommandes/#Noise_rating

Tableau 2.1.1 : Niveau de bruit à ne pas dépasser pour quelques activités dans le bâtiment.

Ces niveaux de bruit à ne pas dépasser constituent une des données très importantes à prendre en compte pour les projets d’architecture et d’urbanisme et cela dès le début du processus de maîtrise d’œuvre. Un choix judicieux de terrain permettra dès le début de la conception, et sans frais, de réaliser des conditions de confort acoustiques idoines, pour un projet spécifique, qui, sans cela, pourrait exiger des solutions très coûteuses et sans même réussir peut être à obtenir le même niveau de qualité en relation avec ces conditions. En cas de force majeure, l’architecte tentera de faire en sorte, par la conception d’abord et par le choix de systèmes constructifs adéquats ensuite, que ces chiffres soient respectés. En définitive, afin d’éviter au projet d’architecture de verser dans des situations d’échec, ces chiffres ne doivent en aucun cas être méprisés mais doivent au contraire être regardés plus comme des prescriptions que comme de simples recommandations.

2.2.2 Durée de réverbération

Comme cela a été déjà introduit au paragraphe 1.6, les sons émis dans des espaces clos subissent des réflexions par toutes les parois du local et cela dans tous les sens, générant ainsi un champ acoustique diffus, constant dans toute la salle et caractérisé par une totale inintelligibilité. Après l'émission d'une impulsion sonore dans la salle, le niveau acoustique se met à décroître linéairement jusqu'à ce que le son devienne imperceptible.

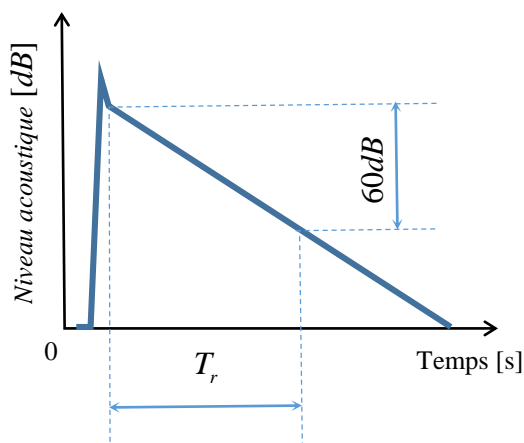


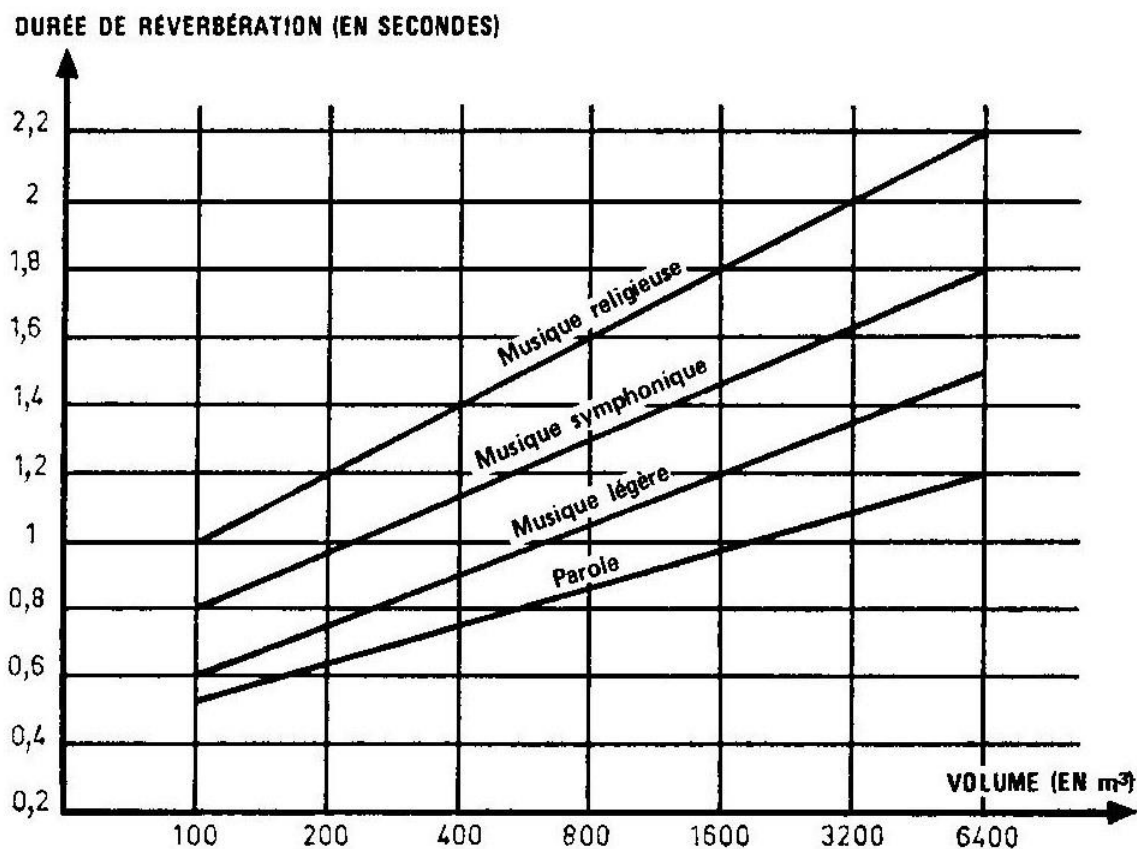
Figure 2.2.2.1 : *Durée de réverbération d'une salle en secondes*

La durée de réverbération T_r d'une salle c'est le temps que met le niveau acoustique du champ réverbéré, après l'émission d'une impulsion sonore, pour diminuer de 60 dB, c'est-à-dire pour que son intensité acoustique diminue au millionième de sa valeur. Après l'écoulement de la durée de réverbération T_r , le niveau sonore du champ réverbéré continue à décroître jusqu'à 0dB et même en dessous, c'est-à-dire avec une intensité inférieure à $1 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2}$.

Continuellement après l'émission des sons qui se succèdent et qui sont le fait de la parole ou bien de la musique ou bien des deux à la fois, les réflexions multiples engendrent un champ réverbéré qui va coexister avec le champ direct et va agir sur la qualité de l'audition en même temps par son niveau acoustique propre mais également par la durée de réverbération. Dans ce paragraphe il sera question de la durée de réverbération ; le niveau acoustique et ses effets sera discuté plus loin, dans la paragraphe 2.2.3.

C'est depuis les travaux Wallace Clement Sabine, que l'on sait que la durée de réverbération, prise séparément du niveau acoustique du champ réverbéré, a un effet direct sur la qualité de l'audition. Plus celle-ci est grande plus la parole devient moins compréhensible. Pour les représentations musicales, bien que celles-ci tolèrent des durées de réverbérations plus grandes, il n'en demeure pas moins que la qualité du son devienne mauvaise si ces dernières sont trop grandes. Lorsque la durée de réverbération est réglée sur ce qu'on appelle la durée optimale de réverbération celle-ci va au contraire avoir un effet positif non seulement sur les représentations musicales mais également sur la qualité du son même dans les salles spécialisées dans la parole.

Les durées optimales de réverbérations à réaliser dans les salles sont données en fonction de la destination des salles et de leur volume, sur la figure 2.2.2.2.



Source : Mathias Meisser, *La Pratique de l'Acoustique dans le Bâtiment*, Société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics, Paris , France.

Figure 2.2.2.2 : *Durée de réverbération optimale $T_{r, opt}$ en fonction de la destination de la salle et de son volume.*

Il s'agira alors de faire en sorte que la durée de réverbération réelle ou durée de réverbération de la conception, soit conforme à la durée de réverbération optimale, donnée par la figure 2.2.2.2 ci-dessus.

La durée de réverbération de la conception T_r est à calculer fonction des surfaces et des coefficients d'absorption réels des matériaux se trouvant en contact avec l'ambiance intérieure de la salle. La relation la plus utilisée pour le calcul de T_r est appelée loi Sabine. Cette loi est simple d'utilisation, mais, lorsque le coefficient d'absorption moyen

$$\alpha_m < 0.15$$

il y a lieu d'utiliser la relation connue sous le nom d'équation de Norris-Eyring. Bien que plus lourde d'utilisation, l'équation d'Eyring comparée à celle de Sabine, donne des résultats plus proches des chiffres réels, c'est-à-dire les chiffres obtenus par la mesure sur le site même.

La loi de Sabine est donnée par

$$T_r = 0.16 \frac{V}{S_{eq}} \quad [s] \quad (2.2.2.1)$$

Elle est à utiliser pour $\alpha_m \leq 0.15$.

La loi d'Eyring est donnée par

$$T_r = 0.16 \frac{V}{-S_{tot} \ln(1 - \alpha_m)} \quad [s] \quad (2.2.2.2)$$

Elle est pour sa part à utiliser pour $\alpha_m > 0.15$.

V : volume de la salle $[m^3]$

$S_{eq} = \sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_i$, S_i : surface de la paroi ou de l'élément i , α_i : coefficient d'absorption du matériaux dont est constitué l'élément i .

S_{tot} : aire totale de toutes les surfaces qui communiquent avec l'ambiance intérieure $[m^2]$

α_m : coefficient moyen d'absorption de l'ensemble des parois du local, y compris les éléments qui se trouvent éventuellement à l'intérieur de la salle.

Dans le cas où α_m n'est pas connu a priori, il se détermine avec la relation :

$$\alpha_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots + S_n \cdot \alpha_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

Pour les sièges et les personnes, des données par siège vide ou siège occupé, sont fournies sous forme de surface équivalente d'absorption, directement en $[m^2]$.