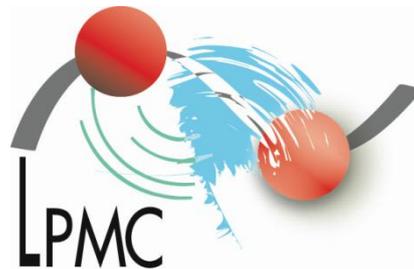


La réverbération en acoustique des salles

Mesure de l'aire effective d'absorption moyenne d'une
personne

GERMAN Arnaud - RAVERA Vincent

2012/2013



Sommaire

I Introduction	3
II Théories acoustiques	3
1 Le son : propagation en espace libre	3
Réflexion – Réfraction d’ondes sonores	4
Effets de la réflexion-réfraction	4
2 La réverbération.....	4
Ondes stationnaires – les modes d’une salle.....	4
3 Loi d’Eyring-Norris et loi de Sabine	5
4 Aire effective d’absorption	6
III Mesure de l’aire effective moyenne d’une personne.....	6
1 Protocole Expérimental.....	6
Choix de la salle.....	6
Choix du matériel.....	6
Capture de la réponse impulsionnelle de la salle	7
2 Exploitation des résultats.....	7
Mesure du RT60.....	7
Mesure de l’aire effective d’absorption moyenne d’une personne	9
Vérification de l’hypothèse de la loi de Sabine.....	9
IV Conclusion.....	10
V Remerciements.....	10
VI Sources bibliographiques.....	10
VII Matériel d’acquisition.....	10

I Introduction

Nous n'en sommes pas toujours conscients, mais où que l'on soit (bibliothèque, salon, cinéma, opéra ou église), la qualité acoustique d'un lieu va influencer l'intelligibilité d'un discours ou la qualité de perception d'une musique.

En effet, dans une salle d'opéra, on remarquera facilement qu'une musique semble plus agréable à l'oreille que dans une salle de conférence alors qu'un discours sera lui, plus compréhensible dans cette dernière. De plus, il peut être intéressant de remarquer, lors d'un déménagement par exemple, qu'une pièce vidée de son contenu résonne beaucoup plus que lorsqu'elle était meublée.

Ces différences de perception seront directement liées à la géométrie de la salle et aux matériaux qui la composent (murs, plafond, sol, meubles...). Ces propriétés caractérisent alors ce que l'on appelle la réverbération acoustique d'une salle.

Dans ce rapport nous allons étudier l'origine physique et les caractéristiques de ce phénomène, puis nous aborderons plus précisément l'influence de la présence d'un public sur l'acoustique d'une salle pour en déterminer ce que l'on définira plus tard comme « l'aire effective d'absorption d'une personne ».

Cette expérience cherchera à retrouver cette constante admise dans le milieu des acousticiens spécialistes des salles de concerts. Un grand nombre de personnes présentes dans une salle jouera un rôle déterminant sur la qualité acoustique de celle-ci, ce qui nécessitera un ajustement en conséquence.

II Théories acoustiques

1 Le son : propagation en espace libre

Le son est la propagation d'ondes de pression dans un milieu matériel, en général l'air. Si l'on considère les ondes d'une source ponctuelle **O** placée dans un milieu homogène dont la propagation est isotrope, alors tous les points d'une sphère de rayon *r* sont atteints au même instant. Cette sphère est appelée surface d'onde, les points de celle-ci sont en phase et effectuent par conséquent la même vibration. On assimilera les surfaces d'onde à des plans lorsque l'on se placera à grande distance de la source, ces ondes seront considérées comme des ondes planes.

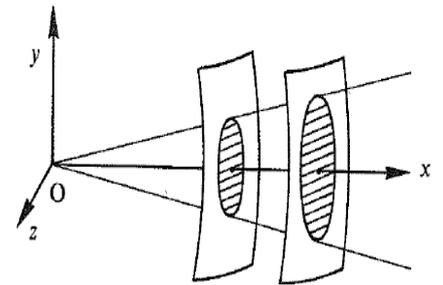


Fig 1

L'énergie locale (ou densité d'énergie), si elle n'est pas absorbée dans le milieu, décroît étant donné que l'énergie de la surface totale d'onde se conserve. Comme la densité d'énergie d'une onde est proportionnelle au carré de son amplitude, on aura dans le cas d'une onde sphérique, une décroissance en $1/r^2$. Le niveau de pression sonore (SPL) peut être calculé en un point par la formule suivante :

$$L_2 = L_1 - 20 \log_{10} \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \text{ dB [1]}$$

L_1 niveau sonore à la distance d_1 de la source et L_2 celui à d_2

L'absorption par l'air doit être prise en compte lorsque l'on considère de grandes distances de propagation et pour des fréquences élevées. Cette absorption varie en fonction de la température, et est d'autant plus grande lorsque l'humidité ambiante est faible. On pourra dès lors noter que dans notre expérience, la salle possède des dimensions suffisamment petites pour que l'atténuation provoquée par l'air puisse être considérée comme négligeable devant celle induite par chaque réflexion sur les différentes surfaces.

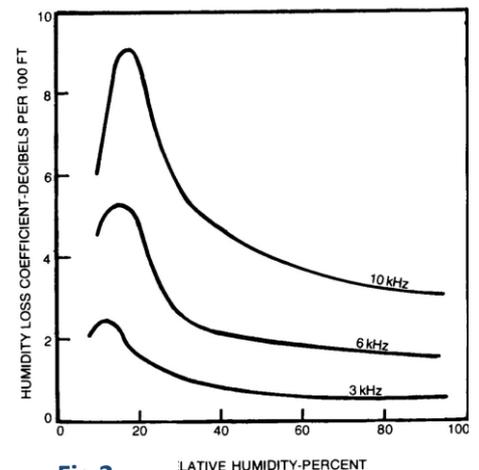


Fig 2

Réflexion – Réfraction d’ondes sonores

Avant de discuter les propriétés des champs sonores en espaces clos, considérons d’abord le processus qui est fondamental pour leur présence : la réflexion d’une onde sonore plane par un seul mur ou surface. Si l’on considère un mur infini, le problème est grandement simplifié, on a une réflexion de type spéculaire dont l’angle incident de l’onde plane est égal à l’angle de réflexion de celle-ci. On appelle ce modèle, le modèle géométrique (ou acoustique des rayons).

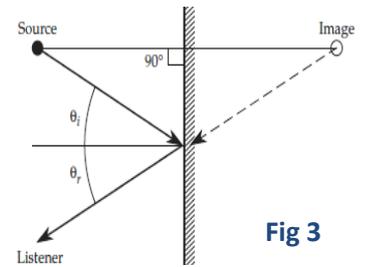


Fig 3

Si l’on considère une salle parallélépipédique, une source sonore possède alors 6 sources images primaires. Les images des images conduisent alors à un nombre infini d’images. Le son mesuré en un point sera donc la résultante du son direct provenant de la source et des contributions de toutes les images de celle-ci. Pour des temps suffisamment longs, on pourra utiliser une approche statistique de la réponse acoustique de la salle.

Ce modèle reste cependant très limité. En effet la bande passante d’ondes sonores audibles est de 20Hz à 20KHz soit des longueurs d’ondes variant de 1.7cm à 17m ($\lambda = \frac{c}{f}$ [2] $c = 340 \text{ m/s}$ vitesse du son dans l’air), or il est fréquent d’avoir une géométrie de salle qui présente des irrégularités sur des échelles couvrant toute cette gamme de longueur (par exemple quand une onde sonore « frappe » la tête d’un auditeur ou une irrégularité murale comme sur la figure 4). Il s’agit d’un modèle ondulatoire, plus adapté aux basses fréquences, où les ondes sonores seront diffractées lors des réflexions.

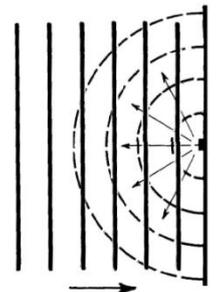


Fig 4

Effets de la réflexion-réfraction

A chaque réflexion, une onde sonore perd en intensité car le mur ou un obstacle absorbe une partie de son énergie. On peut illustrer cette perte comme la transmission d’une partie de l’amplitude de l’onde à travers le mur : l’amplitude de l’onde incidente étant la somme de celle réfléchi et de celle transmise.

2 La réverbération

Le temps de réverbération T (RT60) fut introduit au début du XXe siècle par W. C. Sabine, fondateur de l’acoustique architecturale comme la durée au bout de laquelle le niveau sonore a chuté de 60 décibels après extinction de la source. Il est intéressant de remarquer sur la courbe (figure 5) que la décroissance n’est plus exponentielle à partir de 0,6 s. Il s’agit de la contribution des modes basse fréquences de la salle dont le temps de réverbération est plus important que celui du reste des modes. Dans notre expérience nous ne tiendrons pas compte de cette particularité pour déterminer l’aire effective moyenne d’une personne (voir ci-dessous).

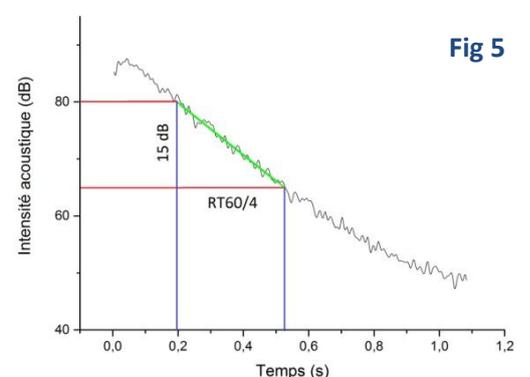


Fig 5

Ondes stationnaires – les modes d’une salle

Lorsque l’on considère la réflexion entre deux murs parallèles, on peut noter l’apparition de modes stationnaires. En effet, on aura alors un système résonant pour des fréquences multiples de la fondamentale : $f_0 = \frac{c_s}{2l}$ [3] avec l la distance séparant les murs. En trois dimensions, dans une pièce parallélépipédique, on pourra observer des modes axiaux (entre deux murs), tangentiels (dans un plan parallèle à un mur) et obliques (faisant intervenir une trajectoire quelconque). Une résonance individuelle, lorsqu’on cesse de l’entretenir, en coupant la source, voit son énergie qui décroît exponentiellement au cours du temps. Les premiers modes d’une pièce (modes axiaux de basses fréquences) ont une décroissance plus lente que les autres modes, et prédominent sur ces derniers en fin de réverbération.

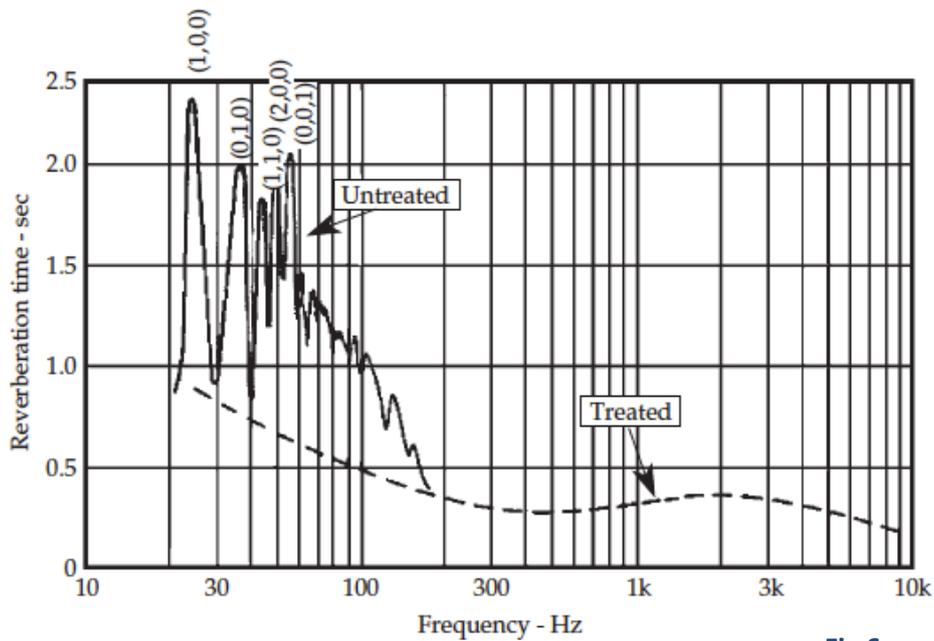


Fig 6

Lorsqu'on mesure le temps de réverbération avec des signaux purs à basse fréquence, on met en évidence de longs temps de réverbération aux fréquences modales. Ces pics sont caractéristiques des premiers modes et ne sont pas représentatifs de la salle considérée comme un tout. Une densité modale élevée (à haute fréquence), qui permet une distribution uniforme de l'énergie sonore, est nécessaire pour appliquer les équations de la réverbération d'origine statistique (d'après Beranek et Schultz).

3 Loi d'Eyring-Norris et loi de Sabine

Considérons qu'après chaque réflexion sur un mur, un rayon est atténué par un facteur $(1 - \alpha)$ où α est le coefficient d'absorption. On considère de manière statistique qu'un front d'onde parcourt en moyenne la distance l entre deux réflexions consécutives. On estime l grâce à la formule suivante : $l = 4V/S$ [4] (cette formule a été vérifiée par simulation numérique de rayons aléatoires en espace clos durant le projet). En effet le front d'onde initial, après quelques réflexions sera diffusé de manière aléatoire dans la salle. Ainsi l'intensité d'une onde est réduite au bout du temps t d'un facteur : $(1 - \alpha)^{ct/l}$

Donc l'énergie qui atteint un observateur dans la partie réverbérante du signal est donné par :

$$E(t) = E_0 \exp[\ln(1 - \alpha)ct/l] \text{ [5]}$$

On pourra alors prédire le temps de réverbération grâce à la formule d'Eyring-Norris :

$$T = \frac{24 \ln 10V}{c[-S \ln(1 - \alpha)]} \text{ [6]}$$

Si $\alpha \ll 1$ alors $\ln(1 - \alpha) \approx -\alpha$

$$T = \frac{24 \ln 10V}{c S \alpha} \approx \frac{0,163 V}{S \alpha} \text{ [7]}$$

On aboutit alors à une forme simplifiée appelée loi de Sabine qui fut déterminée empiriquement lors des premières études de la réverbération. De nos jours cette formule reste très largement employée dès lors que l'hypothèse $\alpha \ll 1$ est vérifiée.

Loi de Sabine : $T = \frac{0,163 V}{A}$ [8] (V volume de la pièce et A aire effective d'absorption moyenne de la salle.)

4 Aire effective d'absorption

On définit maintenant l'aire effective d'absorption : $A = \sum_i S_i \alpha_i$ [9]

i représente chaque élément absorbant de la pièce

Cette aire effective rend compte de l'absorption par toutes les surfaces de la salle.

Dans le cas de notre expérience on différenciera l'aire effective d'absorption de la salle

$A_s = S_{salle} \alpha_{salle}$ [10] et celle d'une personne $A_p = S_p \alpha_p$ [11]

Pour un nombre n de personnes : $A = A_s + n A_p$ [12]

On peut aussi définir $\bar{\alpha}$ le coefficient d'absorption moyen : $\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i$ [13]

III Mesure de l'aire effective moyenne d'une personne

1 Protocole Expérimental

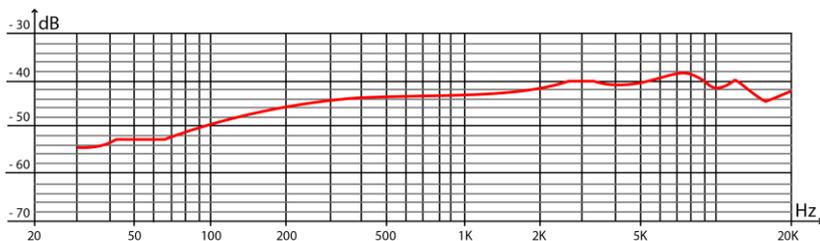
Choix de la salle

Le choix d'une salle adaptée à notre expérience sera décisif sur la qualité du résultat. En effet, nous cherchons une pièce présentant un faible bruit de fond et dont le temps de réverbération est suffisamment important pour pouvoir être mesuré. Ce choix peut être déterminé subjectivement par l'appréciation d'un simple « clap » dont la réverbération devra être correctement audible et prolongée. Après plusieurs essais sur le campus nous avons trouvé la salle adaptée : la future salle informatique de notre établissement, une salle faiblement meublée dont la géométrie est proche d'un simple parallélépipède rectangle.

Choix du matériel

Pour le choix du matériel nécessaire à l'acquisition de la réponse impulsionnelle de la salle, nous utilisons des microphones statiques cardioïdes (à petite membrane) reliés à une table de mixage elle-même connectée à la carte son externe d'un ordinateur portable.

Ce type de microphone est idéal car la réponse fréquentielle est quasi linéaire pour une très grande bande passante (figure 7) et parce qu'il dispose d'une grande sensibilité aux faibles amplitudes sonores. De plus, il offre une grande directivité, pour laquelle on peut obtenir une acquisition presque omnidirectionnelle en utilisant un couple opposé de microphones (sur la figure 8 on pourra noter la sensibilité du couple à 1kHz en fonction de l'incidence de la source sonore). Pour notre expérience, la source sonore a une incidence de 90° ce qui limite la capture du front d'onde direct afin de mesurer préférentiellement la réverbération de la salle.



Réponse Fréquentielle - Microphone DM8 Overhead

Fig 7

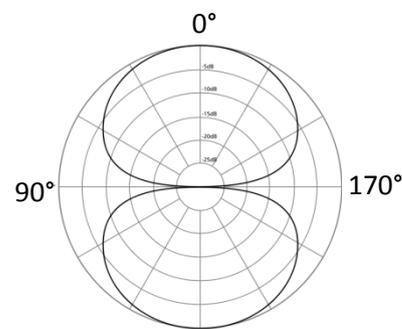


Fig 8

La table de mixage propose une amplification du signal électrique fourni par les microphones et permet une première égalisation du son.

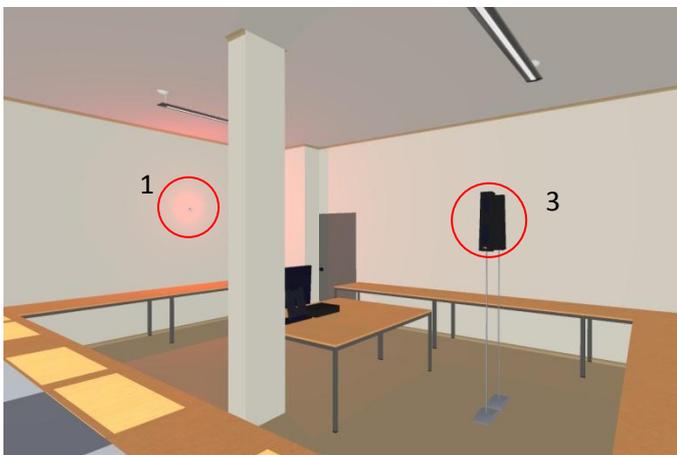
La carte son externe limite grandement le bruit électronique pouvant être observé avec une mauvaise carte son comme c'est souvent le cas de celle intégrée dans un ordinateur.

L'ordinateur portable offre une bonne mobilité et un très faible bruit sonore (bruit de ventilateurs).

Enfin, pour la source sonore, nous utilisons un petit explosif que l'on trouve dans les jouets pour enfants (pistolet à pétards) pour un faible coût. La détonation est brève, la puissance adaptée à la sensibilité des microphones utilisés et l'explosion reproductible avec la même intensité.

Capture de la réponse impulsionnelle de la salle

Pour la capture de la réponse impulsionnelle, on cherchera à éloigner la source du système d'acquisition afin d'éviter une saturation du niveau sonore pouvant être provoquée par le front d'onde direct émis par la source. Nous plaçons les microphones à mi-hauteur de la salle au même niveau que la source.



- 1) Source sonore
- 2) Périphériques d'acquisition
- 3) Couple de microphones

Fig 9

Volume total de la salle sans les meubles : $122,38 \text{ m}^3$

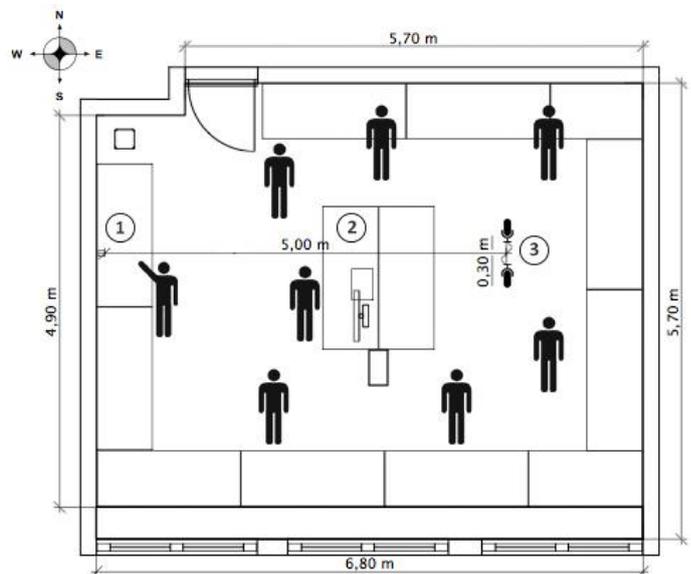


Fig 10

2 Exploitation des résultats

Mesure du RT60

Une fois l'enregistrement des réponses impulsionnelles de la salle réalisé avec un nombre variable de personnes, il nous faut en extraire le RT60 de chaque fichier son. Pour ce faire nous sélectionnons à l'aide du logiciel Audacity la portion du fichier audio où apparaît l'impulsion pour générer un fichier audio plus court.

Ensuite nous utilisons un programme que l'on a développé pour extraire les échantillons audio dans un fichier data contenant 2 colonnes (Le logarithme décimal du carré des échantillons et sa coordonnée temporelle en seconde).

Nous utilisons alors le logiciel d'outils tableur/graphique pour effectuer une modélisation de l'enveloppe sonore (figure 13).

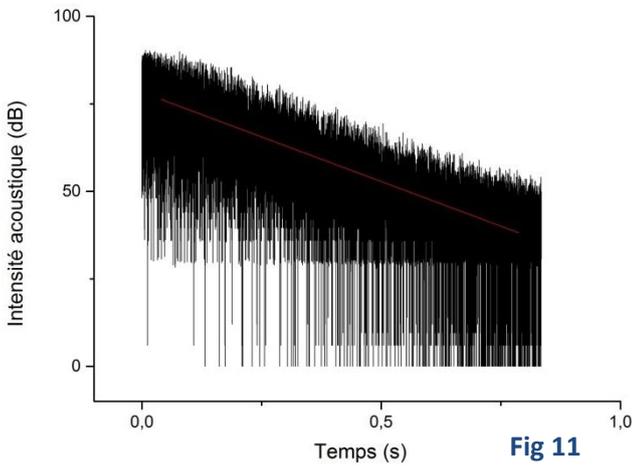


Fig 11

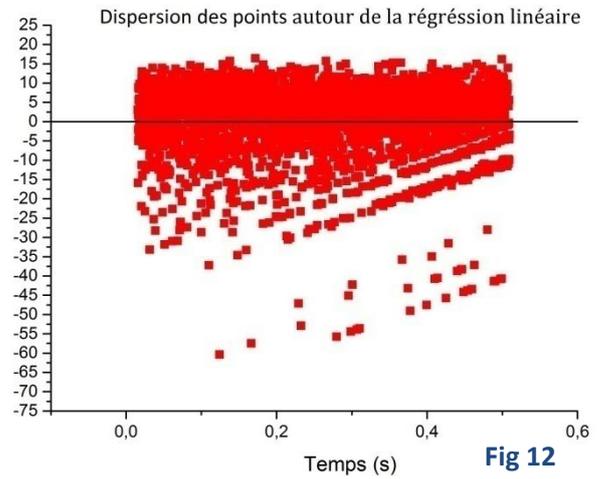


Fig 12

On peut voir sur les figures 12 et 14 les dispersions des points autour de la régression linéaire avec et sans enveloppe (figure 11 et 13), l'intérêt de l'enveloppe est de limiter cette dispersion.

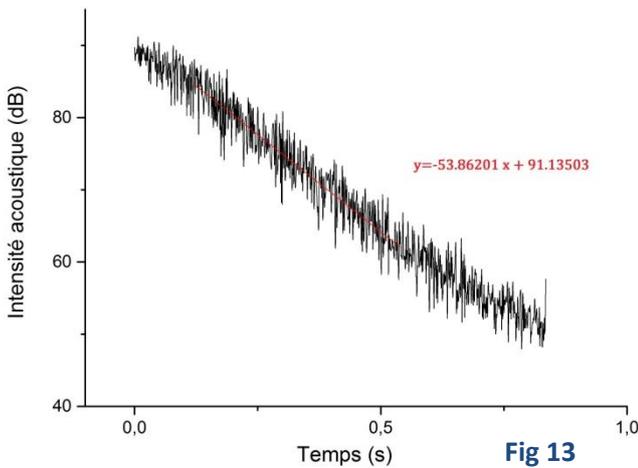


Fig 13

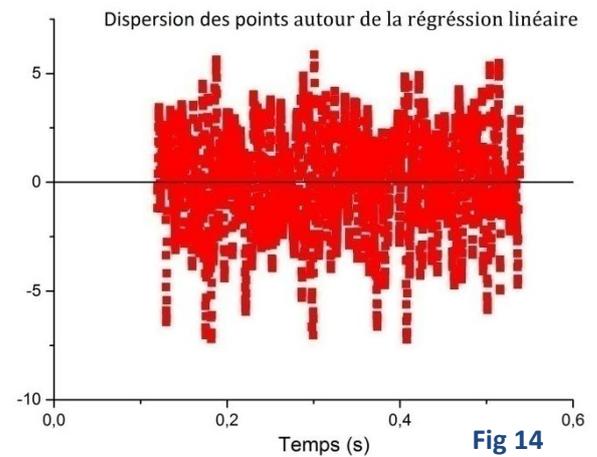


Fig 14

Nous réalisons ensuite une régression linéaire de la décroissance sonore. Il est nécessaire d'effectuer cette étape uniquement sur la partie de l'enveloppe qui décroît exponentiellement (figure 13). La pente de la droite obtenue nous permet alors de déduire Le RT60. En effet ce coefficient correspond à la décroissance en dB par seconde, donc par définition, le RT60 sera déduit par ce calcul :

$$RT60 = \frac{60}{a} \text{ [14]} \text{ Avec « } a \text{ » le coefficient de la pente.}$$

On regroupe enfin les différents RT60 calculés pour une population variable d'individus dans la pièce au sein d'un nouveau graphique (figure 15) $\frac{1}{RT60} = f(\text{nombre de personnes})$ dont la régression va nous permettre de calculer l'aire effective d'absorption moyenne d'une personne.

On peut remarquer une tendance linéaire au-delà de deux personnes et une plus forte absorption pour une personne. Cela peut être expliqué par le positionnement des personnes par rapport à la source. En effet pour une seule personne, celle chargée de déclencher l'explosion, la proximité avec la source provoque l'effet d'un écran qui absorbe une plus grande partie de l'énergie que si cette même personne était placée à plus grande distance.

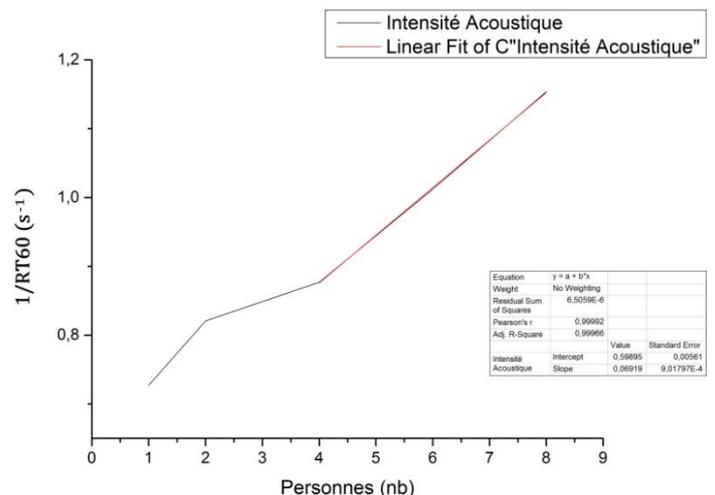


Fig 15

Mesure de l'aire effective d'absorption moyenne d'une personne

On définit b le coefficient de la pente de la courbe ci-dessus tel que $\frac{1}{RT60} = b x + C$ [15], d'après la loi de Sabine

$$T = \frac{0,163 V}{A} \quad [8] \quad \text{on en déduit} \quad \frac{1}{T} = \frac{A}{0,163 V} \quad [16]$$

D'après la formule de Sabine : $A = \frac{0,163 V}{T} = nA_p + A_s$ [17]

$$\text{On a } \frac{1}{T} = n \frac{A_p}{0,163 V} + \frac{A_s}{0,163 V} \quad [18] \quad b = \frac{A_p}{0,163 V} \quad [19] \quad \text{d'où} \quad A_p = 0,163 V b \quad [20]$$

$$A_p = 0,163 \times 122,38 \times 0,06919 = 1,38m^2$$

Vérification de l'hypothèse de la loi de Sabine

On estime la surface totale de la pièce meublée à 200m², cette surface est difficile à déterminer plus précisément car le mobilier et les murs présentent des géométries pouvant être complexes.

On calcul alors le coefficient d'absorption moyen : $\bar{\alpha} = \frac{1}{S}(nA_p + A_s)$

Pour 8 personnes : $\bar{\alpha} = \frac{1}{200}(8 \times 1,38 + C \times V \times 0,163) = 0,115$ (C ordonnée à l'origine [15] et V volume de la salle)

Pour 2 personnes : $\bar{\alpha} = 0,0734$

On est bien dans les conditions permettant l'emploi de la loi de Sabine ($\bar{\alpha} \ll 1$) mais il faut faire attention à ne pas dépasser un nombre maximal d'une dizaine de personnes pour pouvoir utiliser cette approximation car au delà il faudrait avoir recours à la loi d'Eyring-Norris.

Dans le milieu des acousticiens des salles de spectacle, il est courant de définir l'aire effective d'absorption moyenne d'une personne à 0,5m². L'écart avec la valeur calculée au cours de notre expérience $A_p = 1,38m^2$ est tout à fait normal. En effet dans notre cas les mesures étant effectuées durant l'hiver, les personnes étaient vêtues plus que la normale (manteaux épais), leur absorption en est donc augmentée. De plus, dans une salle de concert, les personnes sont assises et exposent donc moins de surface de leur corps par rapport à une personne debout (une partie de la surface étant masquée par le fauteuil supportant la personne).



(Source de la photo <http://www.lepasseurcritique.com/>)

IV Conclusion

Nous avons évalué l'aire effective d'absorption d'une personne debout grâce à un protocole expérimental rigoureux et abordable. Celui-ci pourrait être optimisé avec d'avantages de moyens financiers, notamment avec des périphériques d'enregistrement de meilleure qualité, ou avec la possibilité de déclencher l'explosion à distance. La dépendance fréquentielle de cette mesure pourrait être envisagée dans une autre expérience faisant intervenir des stimulations sonores par bandes étroites de fréquences ou par l'utilisation de filtres numériques passe bande sur les fichiers audio. Les traitements numériques de ces mesures pourraient être automatisés pour une analyse plus rapide et adaptée à la correction de l'acoustique d'une salle en temps réel.

V Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement notre Tuteur Monsieur LEGRAND, enseignant chercheur à l'Université de Valrose, Responsable du Département de Physique au LPMC, pour le soutien et les connaissances apportées durant le déroulement de notre stage, ainsi que l'Université de Nice Valrose pour la mise à disposition de locaux et le prêt de matériel. Enfin nous remercions les bénévoles anonymes pour nous avoir apporté leur surface effective d'absorption.

VI Sources bibliographiques

Les graphiques d'analyse expérimentale ont été réalisés à l'aide du logiciel Origin Pro 9.0.0 d'OriginLab Corporation. (Figures 5, 11, 12, 13, 14 et 15).

Les différents programmes de manipulation de données audio ont été rédigés en langage C dont les codes sources sont issus en partie du livre « Numérical Reciepies in C – The Art of Scientific Computing » (Second Edition) des éditions CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

La vue 3D et le plan vu aérienne de la salle ont été réalisés avec le logiciel Live Intérieur 3D Pro – Belight Software. (figures 9 et 10).

Les différents diagrammes de la partie Théorique sont issus et adaptés du cours « Introduction à l'acoustique des salles - ISTS 1ère année » enseigné à l'ESRA de Nice par Monsieur Olivier LEGRAND (olivier.legrand@unice.fr) dont les références sont :

Heinrich Kuttruff, « Room Acoustics Fourth Edition », New York : Spon Press, 2000.

F. Alton Everest & Ken C. Pohlmann, « Master Handbook of Acoustics » New York: McGraw-Hill Companies, 2009. (Figures 1, 2, 3, 4 et 6).

VII Matériel d'acquisition

-Carte son : Zoom B2.1u (pédale d'effet pour basse pouvant servir d'interface acquisition audio)

-Logiciel de capture audio : Audacity 2.0.3

-Table de mixage : Yamaha MG16/4

-Ordinateur portable HP Pavilion fonctionnant sous Windows 7

-microphones : Prodipe DM8-C Claude Salmiéri

- ✓ Statique à condensateur
- ✓ Directivité : unidirectionnel
- ✓ Réponse : 50Hz-18 kHz
- ✓ Sensibilité : $-45\text{dB} \pm 3\text{dB}$ ($0\text{dB}=1\text{V}/\text{Pa}$ à 1kHz)
- ✓ Impédance de sortie: $200 \Omega \pm 30\%$ (à 1 kHz)
- ✓ Niveau maximum SPL: 136dB (à 1 kHz $\leq 1\%$ T.H.D)
- ✓ S/N Ratio: 60dB
- ✓ Tension d'alimentation: fantôme : 9V-52V DC