

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA  
BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingéniorat.

Département : Electromécanique.

Domaine : Hygiène et Sécurité Industrielle.

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle.

Spécialité : Hygiène et Sécurité Industrielle.

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

**Thème:**

**ETUDE DE LA REVERBERATION EN ANALYSE Aoustique  
DANS UNE SALLE DE COMMANDE (FERTIAL-ANNABA)**

**Présenté par :** SLIMANI MOHAMED AMINE

MANSEUR MEHDI

**Encadrant :** ABDERREZZAK HOCINE

*Grade: MCB*

*Université UBMA*

### Jury de Soutenance :

HADJADJ Aoul Elyes	Professeur	UBMA	Président
ABDEREZZAK Hocine	MCB	UBMA	Encadrant
LAKHEAL Ali	MAA	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

## Dédicaces

### Je dédie ce travail

A toute ma famille, ma mère et mon père merci pour votre soutien moral et financier.  
A celle qui m'a transmis la vie, l'amour et le courage à toi ma très chère maman.  
Toute ma joie, mon amour, mes reconnaissances, j'espère qu'un jour je pourrais rendre un peu de  
ce que tu m'as fait pour moi, je te remercie, et que dieu te protège.

A mon père qui a sacrifié sa vie pour ma réussite et qui a éclairé mon chemin par ces conseils  
judicieux, que dieu lui prête bonheur et longue vie.

Je ne peux pas oublier mes frères<<ABD EL RAHMEN >>, << DHIYA EDDINE >>,  
<<BILLEL>> et Ma chère nièce<<MERIEM ILYNE>>, pour leur affection, leur soutien et  
leur patience .Que j'aimerai toujours, je vous souhaite une longue vie plein de prospérité.

A tous mes chères cousines et cousins.  
A toute la famille <<SLIMANI >>

A mes très chers amis<<DJABER>>, <<AMIR>> et <<AIMEN >> en souvenir de notre  
sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble pendant des  
années.  
A toute la promotion **2019/2020**.  
A toutes mes amies et mes collègues.

«MOUHAMED »

## Dédicaces

### Je dédie ce travail

A toute ma famille, ma mère et mon père merci pour votre soutien moral et financier.

A celle qui m'a transmis la vie, l'amour et le courage à toi ma très chère maman.  
Toute ma joie, mon amour, mes reconnaissances, j'espère qu'un jour je pourrais rendre un peu de  
ce que tu m'as fait pour moi, je te remercie, et que dieu te protège.

A mon père qui a sacrifié sa vie pour ma réussite et qui a éclairé mon chemin par ces conseils  
judicieux, que dieu lui prête bonheur et longue vie.

Je ne peux pas oublier mon frère <<SAMI YUCEF>>, mes sœurs <<SARA>>, <<INES>>, et  
ma fiancée <<HANANE>>, pour leur affection, leur soutien et leur patience. Que j'aimerai  
toujours, je vous souhaite une longue vie plein de prospérité.

A tous mes chères cousines et cousins.

A toute la famille <<MANSEUR>>

A mes très chers amis <<NADIR>>, <<ABDENNOUR>> en souvenir de notre sincère et  
profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble pendant des années.

A toute la promotion **2019/2020**.

A toutes mes amies et mes collègues.

## Remerciements

Le plus grand merci à ALLAH qui le seul guida dans le bons sens durant notre vie  
Au terme de ce travail, je veux adresser tous mes remerciements aux personnes avec  
Lesquelles j'ai pu échanger et qui m'ont aidé pour la rédaction de ce mémoire.

En commençant par remercier tout d'abord Monsieur **ABDERREZZAK. H** de m'avoir encadré,  
pour son aide précieuse et pour le temps qu'il m'a consacré.

Mes remerciements à Monsieur **HADJADJ. A.E** pour avoir accepté de faire président de jury de  
ce mémoire.

Je remercie également Monsieur **LAKHEAL. A** d'avoir accepté de participer à mon jury.

Je tiens à remercier tous mes enseignants durant cette année.

J'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille : Mes parents, mes frères, qui m'ont  
accompagné, aidé, soutenu et encouragé durant mes études.

Enfin je voudrais remercier aussi toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin âmes  
recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

« **MOUHAMED, MEHDI** »

## Liste des figures

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure 1 :	Les trois parties d'énergie sonore.	14
Figure 2 :	L'isolation et l'absorption (ou la correction) acoustique.	15
Figure 3 :	Modélisation de la réponse impulsionnelle d'une salle, d'après Techniques de l'ingénieur.	16
Figure 4 :	Schéma des ondes directes et réfléchies.	17
Figure 5 :	Les 3 phases d'un son réverbéré.	18
Figure 6 :	Sonomètre.	22
Figure 7 :	Source de bruit (Générateur de bruit).	23
Figure 8 :	Modélisation géométrique : Cordonnées des points.	30
Figure 9 :	Représentation de La Salle de commande en 3D.	30
Figure 10 :	Exemple d'affichage avec indicateurs de qualité.	31
Figure 11 :	Affichages CATT-ACOUSTIC exécutant un logiciel de temps de réverbération.	32
Figure 12 :	Affichages CATT-ACOUSTIC exécutant un logiciel de temps de réverbération.	32
Figure 13 :	Courbes de TR de la salle à l'état actuel.	35
Figure 14 :	Les Courbes de TR expérimentales et numériques.	36
Figure 15 :	Les Courbes de TR analytique et numériques.	37
Figure 16 :	Les Courbes de TR expérimentales, analytiques et numériques.	38
Figure 17 :	Spectre du temps de réverbération après correction acoustique	39
Figure 18 :	Les courbes de TR expérimentales avant et après la correction acoustique.	40
Figure 19 :	La différence entre deux local avec et sans la correction acoustique.	43

## Liste des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau 1 :	Les résultats expérimentaux obtenus du TR dans différentes bandes de fréquence.	24
Tableau 2 :	Les résultats analytiques obtenus du TR dans différentes bandes de fréquence.	25
Tableau 3 :	Les résultats numériques obtenus du TR dans différentes bandes de fréquence.	32
Tableau 4 :	TR optimaux en fonction des nouveaux coefficients d'absorption	39
Tableau 5 :	Coefficients d'absorption acoustique $\alpha_s$ (valeurs moyennes de produits divers).	44

## Sommaire

Résumé	8
Problématique	10
Introduction Générale.	11
<b>CHAPITRE I : Etude de la réverbération acoustique</b>	
I.1) Introduction.	13
I.2) La perception du son.	13
I.3) L'intelligibilité d'un son.	14
I.4) L'absorption acoustique.	14
I.5) Réverbération et qualité acoustique.	15
I.6) Analyse de l'énergie acoustique réverbérée.	17
I.7) Les trois phases du son réverbéré.	17
I.8) Les nuisibilités des sons réverbérés.	18
I.9) Conclusion.	19
<b>CHAPITRE II : Méthodologie de mesure du temps de réverbération</b>	
II.1) Introduction.	21
II.2) Méthode expérimentale de mesure du temps de réverbération.	21
II.2.1) Matériels utilisés.	21
II.2.2) Applications et caractéristiques.	24
II.2.3) Les résultats expérimentaux de TR de la salle de commande à l'état actuel des parois.	24
II.3) Méthode analytique.	25
II.3.1) Temps de réverbération recommandé de la salle de commande.	25
II.3.2) Les résultats analytiques de TR de la salle de commande à l'état actuel des parois.	25
II.4) Méthode numérique.	26
II.5) Conclusion.	26
<b>CHAPITRE III : Modélisation de la de la réverbération de la salle de commande sous CATT-ACOUSTIC</b>	
III.1) Introduction.	28
III.2) Présentation du CATT ACOUSTIC.	28
III.2.1) Principe général de fonctionnement du logiciel.	28
III.3) Procédure de Modélisation.	29
III.3.1) L'entrée des paramètres architecturaux.	29
III.3.2) L'entrée des paramètres d'absorption et de diffusion des matériaux constitutifs de la salle.	31
III.3.3) Le choix d'une ou des sources sonores et ses points de réceptions.	31
III.4) Conclusion.	33
<b>CHAPITRE IV : Traitement et amélioration de la réverbération sous CATT-ACOUSTIC</b>	
IV.1) Introduction.	35
IV.2) Résultats de TR à l'état actuel des parois de la salle.	35
IV.2.1) Discussion.	35

IV.3) Comparaison des TR expérimentales et numériques.	36
IV.3.1) Discussions.	36
IV.4) Comparaison des TR analytiques et numériques.	37
IV.4.1) Discussions.	37
IV.5) Comparaison des TR expérimentaux, analytiques et numériques.	38
IV.5.1) Discussions.	38
IV.6) Analyse et correction.	39
IV.6.1) Comparaison des TR avec les nouvelles parois et les TR avec les parois actuelles de la salle de commande.	40
IV.6.1) Discussions.	40
IV.7) Conclusion.	40

## CHAPITRE V : Correction acoustique et prévention des risques

V.1) Introduction.	42
V.2) Loi de Sabine.	42
V.3) Correction acoustique par les matériaux poreux et fibreux.	42
V.4) Le concept de l'absorption acoustique.	43
V.5) Valeurs moyennes des coefficients d'absorption acoustique.	43
V.6) L'intelligibilité de la parole.	44
V.7) Conclusion.	44
Conclusion générale.	45
Références bibliographiques.	46

## Résumé (arabe, français, anglais)

عن طريق التحليل الصوتي في ورشة عمل. خصص هذا العمل لدراسة الصدى فالصدى هو عبارة عن استمرار وجود الصوت في مكان ما بعد مقاطعة مصدر الصوت و هو مزيج من كمية من الانعكاسات المباشرة وغير المباشرة ينتج عنها صوت مشوش يتناقص تدريجياً. سمحت لنا نمذجة ومحاكاة غرفة التحكم لقد قادتنا هذه **FERTIAL - ANNABA** برؤية أهمية الصدى في غرف العمل . الدراسة إلى إجراء بحث حول الصوت ووجدنا أنه يجب أن يكون وقت الصدى الذي يتوافق مع وقت تضازل مستوى الصوت إلى مستوى معين، 0.8 ثانية كحد أقصى في غرفة بحجم معين. أكدت القياسات اللاحقة باستخدام مصدر صوت متعدد الاتجاهات ومقياس مستوى الصوت أهمية العمل الذي يتعين القيام به لذلك قمنا بتصميم غرفة التحكم على **Catt-Acoustic** ثم طورنا نموذج حساب صوتي رقمي بمعادلة **SABINE**. هنا. برنامج من خلال الجمع بين الطرق للحصول على القيم، تمكنا من استنتاج معاملات الامتصاص للمواد المختلفة المكونة للغرفة. سلطت هذه النتائج الضوء على تأثير بعض المواد على الراحة الصوتية لهذه الغرفة. ومن أجل تحسين الراحة الصوتية لهذه الغرفة باستخدام منتجات ماصة بشكل واضح اقترحنا لوحة ذات معامل امتصاص أفضل. وقد أظهرت النتائج أن الألواح تناسب الغرفة جيداً و ستلبي احتياجات الراحة الصوتية. من خلال تنفيذ هذه التغييرات ، سيتم تحسين جودة بيئة العمل ، مما سيشجع الوقاية بشكل أفضل من المخاطر التي قد تنشأ نتيجة الارتدادات السيئة في غرف العمل.

Ce travail est consacré à l'étude de la réverbération en analyse acoustique industrielle en salle. La réverbération est la persistance du son dans un lieu après l'interruption de la source sonore. La réverbération est le mélange d'une quantité de réflexions directes et indirectes donnant un son confus qui décroît progressivement. La modélisation et la simulation de la salle de commande **FERTIAL - ANNABA** nous a permis de constater réellement l'importance de l'acoustique dans les salles de travail. Elle nous a conduits à faire des recherches sur l'acoustique et nous avons trouvé, entre autre, que les normes fixent un paramètre important. Le temps de réverbération, qui correspond au temps de décroissance du niveau sonore d'un certain niveau doit être de 0,8s maximum dans une salle de volume donné. Les mesures réalisées par la suite à l'aide d'une source sonore omnidirectionnelle et d'un sonomètre ont confirmé l'importance du travail à accomplir ici. Nous avons donc modélisé la salle de commande sur le logiciel **Catt-Acoustic** puis développé un modèle numérique de calcul acoustique à l'aide de la formule de **SABINE**. En combinant les méthodes d'obtention des valeurs, nous avons pu en déduire les coefficients d'absorption des différents matériaux composants la salle. Ces résultats ont mis en valeur l'influence de certains matériaux dans le mauvais confort acoustique de cette salle. L'amélioration du confort acoustique de cette salle en utilisant des produits nettement absorbant ce qui nous a orientés vers la proposition de panneau ayant un meilleur coefficient d'absorption. Les résultats nous ont montrés que les panneaux convenaient bien à la salle et permettraient de satisfaire les besoins de confort acoustique. En mettant en œuvre ces modifications, la qualité de l'environnement de travail sera améliorée ce qui permettra une meilleure prévention des risques qui peuvent surgir suite aux mauvaises réverbérations des salles de travail.

This work is devoted to the study of reverberation in industrial acoustic analysis in a workshop. Reverberation is the persistence of sound in a place after the sound source is interrupted. Reverb is the mixing of a quantity of direct and indirect reflections resulting in a confused sound which gradually decreases.

The modeling and simulation of the **FERTIAL - ANNABA** control room allowed us to really see the importance of acoustics in work rooms. It led us to do research on acoustics and we found, among other things, that the standards set an important parameter.

The reverberation time, which corresponds to the decay time of the sound level to a certain level, should be 0.8s maximum in a room of a given volume.

Subsequent measurements using an omnidirectional sound source and a sound level meter confirmed the importance of the work to be done here. We therefore modeled the control room on **Catt-Acoustic** software and then developed a numerical acoustic calculation model using **Sabine's** formula.

By combining the methods of obtaining values, we were able to deduce the absorption coefficients of the different materials making up the room.

These results highlighted the influence of certain materials on the poor acoustic comfort of this room.

Improving the acoustic comfort of this room by using products that are clearly absorbent which led us to propose a panel with a better absorption coefficient.

The results showed us that the panels suited the room well and would meet the needs for acoustic comfort.

By implementing these changes, the quality of the working environment will be improved, which will allow better prevention of risks that may arise as a result of poor reverberations in work rooms.

## Problématique

La réverbération correspond à la persistance du son après extinction de la source. En fonction de l'endroit où l'on se trouve, ce phénomène sera plus ou moins observable comme par exemple si l'on prend grossièrement deux salles de commande, la réverbération ne se manifestera pas de la même manière dans les deux salles. Cela peut s'expliquer notamment d'une part avec le volume interne de la pièce et d'autre part avec l'absorption due aux parois et aux éléments présents dans la pièce.

De manière plus précise, la réverbération est le mélange entre les réflexions directes et indirectes lorsqu'une perturbation se présente dans le cadre de la pièce. Ce mélange se verra décroître progressivement avec la dissipation du son.

Les architectes et ingénieurs du son se sont sans cesse préoccupés de l'acoustique des lieux et ont cherchés à le comprendre et à le maîtriser afin d'avoir le meilleur rendu possible. Ce phénomène acoustique a généralement un effet positif sur le rendu sonore mais trop de réverbération peut diminuer la distinction des différentes fréquences de résonances et trop peu peut nuire à l'effet d'harmonie de son.

L'évaluation par le temps de réverbération suppose que la décroissance du son après l'interruption de l'excitation est régulière, suivant une loi exponentielle, d'un certain nombre de dB par seconde. Ce n'est pas le cas nécessairement dans les salles, particulièrement quand elles sont le produit d'un effort d'architecture sonore. Le son peut ainsi décroître d'abord rapidement, tandis que la queue se prolonge.

Lorsqu'on effectue plusieurs enregistrements de la réponse d'une salle, afin de déterminer le temps de réverbération, on peut obtenir des graphes très différents. L'intensité sonore dépend en effet beaucoup de la phase du signal d'excitation au moment où celui-ci disparaît. En 1965, (en) Manfred R. Schroeder proposa une méthode basée sur l'intégration de la puissance enregistrée, en partant de la fin. Il montrait que cette intégrale a la même valeur que la moyenne d'une infinité de mesures de la réponse de la salle. Elle permet de mettre en évidence les variations du taux de décroissance du son, qui sont un indice du manque de surfaces diffusantes<sup>4</sup>.

Pour mieux évaluer la réverbération, on peut mesurer la vitesse de décroissance du son par bande de fréquence, et calculer ainsi plusieurs RT60.

On peut représenter l'évolution dans le temps, bande de fréquence par bande de fréquence, dans un diagramme en cascade.

Des systèmes qui comparent le signal émis par la source à celui capté par un microphone permettent de caractériser la salle en direct et en présence du public, qui contribue par sa présence à la réponse acoustique de la salle.

## Introduction Générale

**L**a réverbération est la persistance du son dans un lieu après l'interruption de la source sonore. La réverbération est le mélange d'une quantité de réflexions directes et indirectes donnant un son confus qui décroît progressivement. Le temps de réverbération dépend de l'usage auquel le local est destiné. Trop de réverbération diminue l'intelligibilité de la parole.

**L**e temps de réverbération  $RT$  (ou  $RT60$ ) se définit comme le temps nécessaire pour que le son diminue de 60 dB par rapport au niveau de l'excitation.

**N**otre travail consiste à étudier la réverbération en analyse acoustique en salle de commande, dans ce contexte la mémoire comporte cinq chapitres.

**L**e premier chapitre est consacré à une présentation globale de l'étude de réverbération acoustique et les différentes notions de cette dernière.

**L**e deuxième chapitre traite la méthodologie de mesure du temps de réverbération, matériel utilisés, application et caractéristique.

**L**e troisième chapitre nous présentons les principes et les procédures de la modélisation de la réverbération de la salle de commande sous CATT-ACOUSTIC.

**L**e quatrième chapitre traite et améliore les résultats de la réverbération sous CATT-ACOUSTIC.

**D**ans le cinquième chapitre, une correction acoustique, prévention des risques et présentation de la loi de SABINE.

**E**n fin nous terminerons par une conclusion de cette étude.

# **CHAPITRE I**

## **Etude de la réverbération acoustique**

## CHAPITRE I : Etude de la réverbération acoustique

### I.1) Introduction

La qualité acoustique d'un lieu peut toujours influencer l'intelligibilité de la parole d'une conversation entre opérateurs.

En effet, dans la salle de commande de l'entreprise FERTIAL-ANNABA, on remarque facilement qu'une communication entre opérateurs semble dès fois peu compréhensible que dans un atelier alors qu'un signal sonore avertisseur sera lui, plus compréhensible dans ce dernier.

Ces différences de perception seront directement liées à la géométrie des lieux de travail et aux matériaux qui les composent. Ces propriétés caractérisent alors ce que l'on appelle la réverbération acoustique dans cette salle de commande.

Dans ce mémoire nous allons étudier l'origine physique et les caractéristiques de ce phénomène, puis nous aborderons plus précisément l'influence de la présence des matériaux composant les parois de la salle de commande sur leurs acoustiques pour en déterminer ce que l'on définira plus tard comme l'aire effective d'absorption des parois et des installations.

### I.2) La perception du son

Le fait qu'un son soit audible ou non dépend principalement de notre système auditif. Il a ses limites et il faut en tenir compte puisque le confort ou la correction acoustique sont liés à notre perception auditive. Les limites de notre ouïe sont les suivantes :

- En dessous de 20 Hz : inaudibles infrasons
- De 20 Hz à 400 Hz audible : graves
- De 400 Hz à 1600 Hz : audible : médiums
- De 1600 Hz à 20 KHz : audible aigus
- Au-dessus de 20 KHz inaudible : ultrasons.

Le son est divisé en bande d'octave afin de déterminer l'influence énergétique des différentes plages de fréquence sur l'énergie globale mesurée. La décomposition du spectre audible en bande d'octave est une division pratique de l'échelle des fréquences, identifiées par leur fréquence centrale (63, 125, 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000, 8 000 Hz).

La fréquence supérieure de chaque bande est le double de la fréquence inférieure. La fréquence centrale est la racine carrée du produit des fréquences extrêmes de la bande.

- 20 à 40 Hz
- 40 à 80 Hz
- 80 à 160 Hz
- 160 à 315 Hz
- 315 à 630 Hz
- 630 à 1250 Hz
- 1,25 à 2,5 KHz
- 2,5 à 5 KHz

- 5 à 10 KHz
- 10 à 20 KHz.

Entre notre tympan et cette source, il y a un environnement constitué principalement d'air que le son utilise comme support pour se transmettre.[1]

### I.3) L'intelligibilité d'un son

Le son est la sensation auditive due à une vibration acoustique. Le bruit est une superposition d'une infinité de sons possédant chacun une fréquence et une intensité propre.

Le temps de réverbération du son ou « l'écho » résulte de la réflexion des ondes sonores sur les parois à l'intérieur de la salle de commande.

Cet écho a pour origine les différents chemins, et par conséquent les temps de trajet différents, d'une onde sonore partant d'une même source pour atteindre un même point d'écoute. Il est nécessaire pour une bonne intelligibilité d'un son qu'il n'y ait pas d'écho, donc de limiter au mieux la réverbération.

Les salles dont les parois comportent des cavités absorbent l'onde donc l'énergie sonore ce qui permet d'éviter la réverbération.

Cependant un environnement trop absorbant est très intelligible mais nécessite une puissance sonore plus importante de la part de l'orateur, ce qui peut induire une fatigue.[1]

### I.4) L'absorption acoustique

Il est important pour conserver un son audible et intelligible de limiter la durée de réverbération. Lorsqu'une onde rencontre une paroi, son énergie incidente est divisée en trois parties :

- Energie transmise
- Energie réfléchie
- Energie absorbée

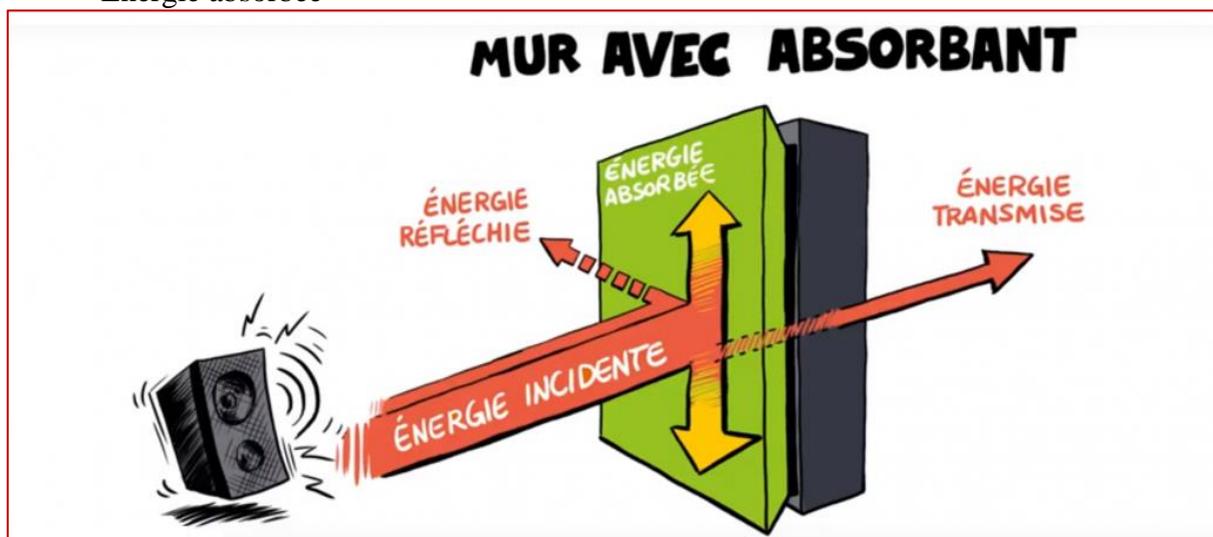
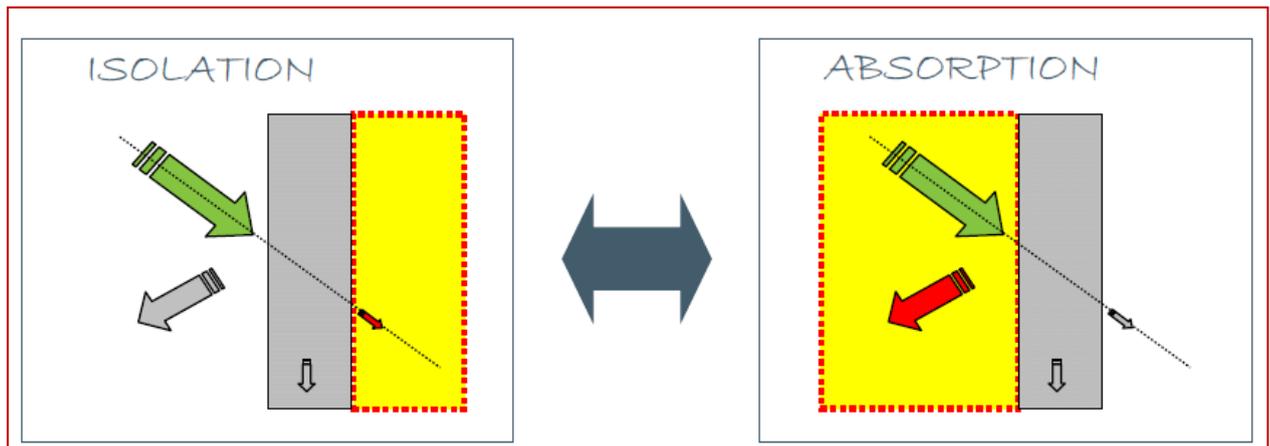


Figure 1 : Les trois parties d'énergie sonore

L'absorption acoustique limite la réverbération due à la multiplicité des échos renvoyés par les parois et les objets. L'acoustique de la salle se divise en deux parties en fonction des buts recherchés.

- L'isolation acoustique.
- La correction acoustique (absorption).



**Figure 2 :** L'isolation et l'absorption (ou la correction) acoustique

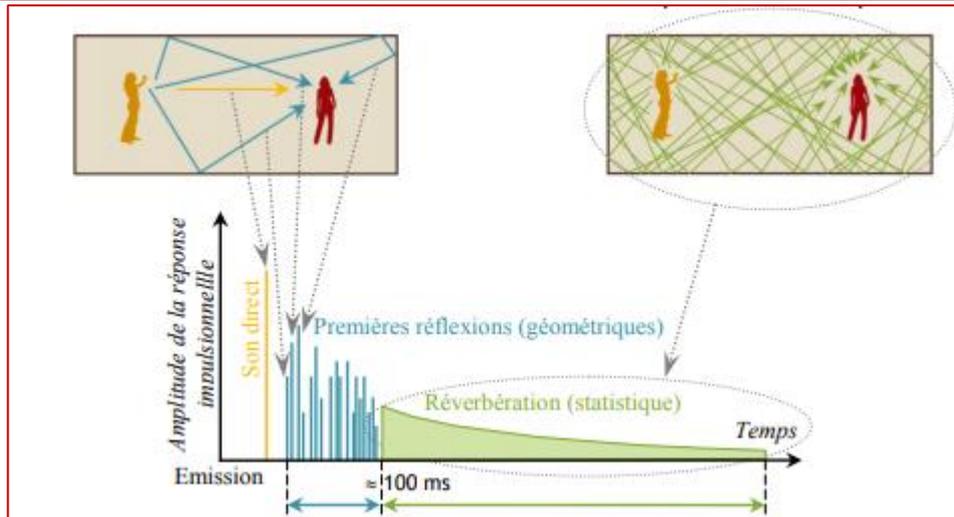
La correction acoustique permet de maîtriser la détermination du temps de réverbération à l'intérieur de la salle de commande, notamment par la pose de matériaux absorbants en paroi ou de matériaux réfléchissants pour mieux diriger l'onde sonore.[1]

### **I.5) Réverbération et qualité acoustique**

L'ensemble des phénomènes peut être étudié de manière approchée en observant, selon une approche géométrique de propagation des ondes sonores sous forme de rayons.

La réponse impulsionnelle de la salle de commande peut alors être modélisée comme une séquence obtenue des réflexions parvenant au récepteur. Statistiquement, la densité d'échos parvenant au récepteur varie avec le carré du temps. Au bout d'un certain délai, elle est telle que l'on peut considérer les échos sous un angle statistique.

C'est le domaine de la réverbération. Cette réverbération influe sur la qualité acoustique d'une salle.



**Figure 3:** Modélisation de la réponse impulsionnelle d'une salle, d'après Techniques de l'ingénieur

Pour mesurer le caractère réverbérant d'une salle, on peut définir le temps de réverbération TR60 d'une salle : temps nécessaire après arrêt de la source sonore pour observer une décroissance de 60 décibels du niveau sonore mesuré dans la salle.

Une première expression de ce temps de réverbération en fonction des caractéristiques est fournie par la loi de Sabine :

$$TR_{60} = \frac{0,16V}{A} = \frac{0,16V}{\sum_i \alpha_i S_i}$$

V : le volume de la salle,  
A : l'aire d'absorption équivalente de la salle,  
 $\alpha_i$  : le coefficient d'absorption de la paroi i,  
 $S_i$  : la surface de la paroi i.

Les caractéristiques des parois ou des obstacles présents dans la salle ont donc une influence sur le temps de réverbération ; les types de parois seront donc choisis en fonction du temps de réverbération souhaité de la salle.

La formule de Sabine a été établie en ne considérant que le champ réverbéré (ou diffus) avec une répartition parfaitement homogène du champ réverbéré dans la salle.

Cette hypothèse n'est jamais observée en pratique mais l'on peut s'en approcher et rester dans le domaine de validité de cette formule sous certaines conditions :

- La salle doit être peu absorbante,
- Les dimensions de la salle doivent être assez grandes,
- La salle doit être de forme simple (parallélépipédique),
- L'absorption de propagation dans le fluide doit être négligeable en regard de l'absorption due aux parois. [2]

## I.6) Analyse de l'énergie acoustique réverbérée

Une onde sonore est développée par de très courtes variations de pression dans un milieu compressible, comme l'air.

Un son est ce que perçoit l'oreille de cette fluctuation. Si l'onde, créée par une source sonore, traverse directement le milieu pour se rendre à l'auditeur, alors on parlera d'un son direct ou d'un son sec.

Par contre, la plupart du temps, l'onde sonore n'ira pas directement vers l'auditeur, en effet celle-ci sera réfléchiée par différente paroi (mur, plancher, plafond, objet, etc.).

Ce phénomène est nommé l'écho. De plus, si l'onde sonore est réfléchiée une multitude de fois, avant d'atteindre l'oreille, on parlera de réverbération.

La figure 4 aide à différencier les trois types de son lorsqu'une personne écoute une autre personne. [3]

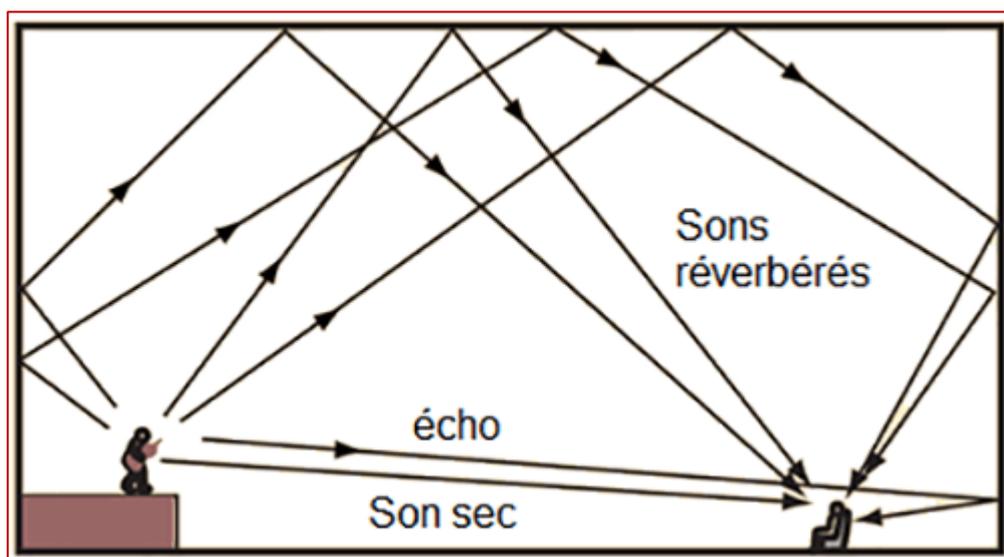


Figure 4 : Schéma des ondes directes et réfléchies

## I.7) Les trois phases du son réverbéré

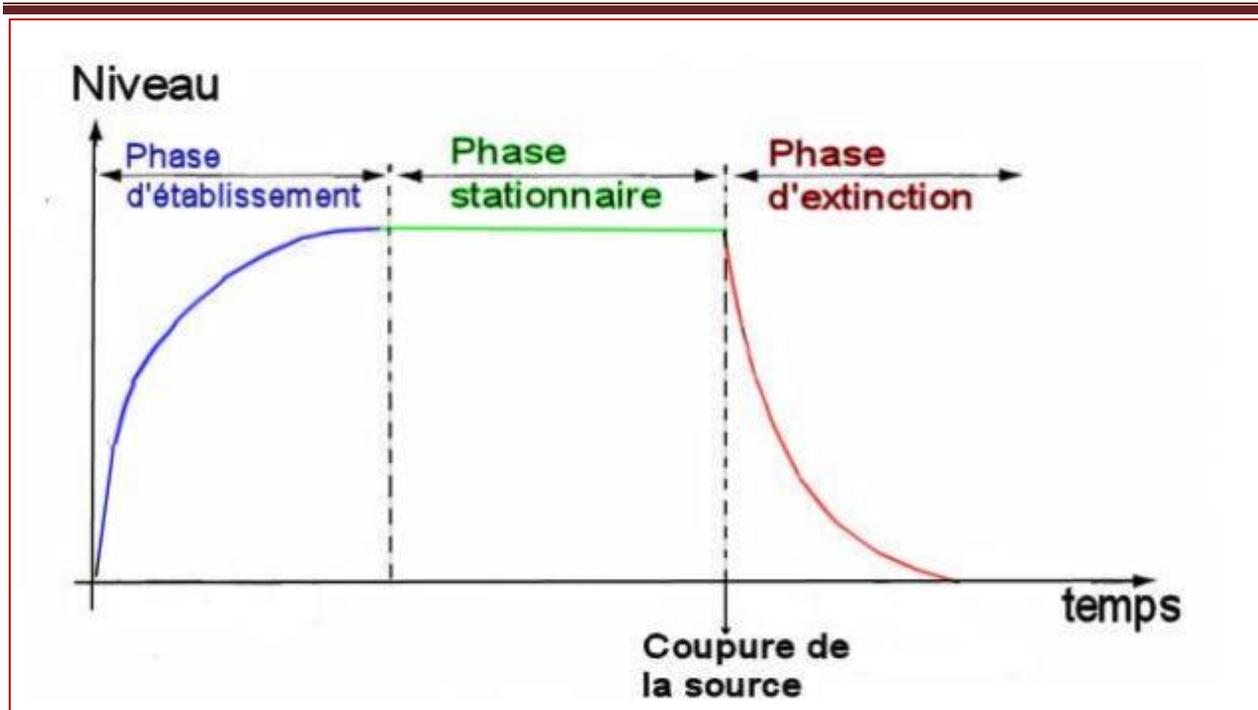
Soit une source sonore dans une salle.

À  $t = 0$ , on émet un son.

La puissance délivrée par la source sonore est maintenue constante un certain temps.

Puis on arrête l'émission du son.

S'ensuivent trois phases (figure 5)



**Figure 5 :** Les 3 phases d'un son réverbéré

La première phase est l'établissement du son réverbéré, son niveau augmente progressivement dans la salle. La seconde phase est la phase stationnaire, où le niveau réverbéré reste constant. Enfin la dernière est la phase d'extinction, pendant laquelle le son réverbéré diminue progressivement en fonction du temps de réverbération jusqu'à devenir inaudible.[4]

### **I.8) Les nuisibilités des sons réverbérés**

La plupart du temps, la réverbération représente une nuisance pour les auditeurs.

En effet, ce phénomène amplifie le son que peut produire une source sonore (machine quelconque, ventilation, etc.).

Plus l'onde prend du temps à se rendre au canal auditif de l'auditeur, par rapport au son émis, plus le volume du son semble amplifier.

Selon le secteur d'analyse, il est possible de vouloir un temps de réverbération court.

Pour ce faire, il faut changer la composition de la surface des parois du secteur d'analyse. Il est donc possible de modifier le temps de réverbération selon sa préférence. [3]

## **I.9) Conclusion**

L'effet sur l'intelligibilité est l'une des causes majeures de la gêne qu'on attribue à cette nuisance.

En effet, la perturbation de la communication entre opérateurs entraîne frustration et irritation.

De plus, la qualité de la communication orale est extrêmement importante à l'atelier, dans les bureaux, en milieu industriel.

Plusieurs méthodes ont donc été développées pour évaluer l'intelligibilité de la parole en présence de bruits déterminés.

En présence d'un bruit ambiant de niveau sonore élevé, on a tendance à parler plus fort, ce qui entraîne une augmentation de la proportion des fréquences élevées qui interviennent dans l'intelligibilité de la parole, mais cet ajustement automatique de la sonorité vocale devient rapidement insuffisant.

## **CHAPITRE II**

# **Méthodologie de mesure du temps de réverbération**

## **CHAPITRE II : Méthodologie de mesure du temps de réverbération**

### **II.1) Introduction**

Le temps de réverbération  $T_r$  est un paramètre essentiel intervenant dans la description de la qualité acoustique d'un local ou d'un espace ouvert. C'est un critère qualitatif pour l'intelligibilité du discours et le confort d'écoute de la parole.

Il sert aussi à corriger les effets de la réverbération en acoustique dans une salle et dans le cadre des mesurages de puissance acoustique.

Le temps de réverbération est le temps nécessaire à l'énergie sonore pour décroître de 60 dB lorsque la source s'arrête d'émettre. Du fait de la présence du bruit de fond, il est rare qu'on puisse mesurer une décroissance de 60 dB complète, c'est pourquoi il est habituellement mesuré pour une décroissance de 10, 20 ou 30 dB et le résultat est ensuite extrapolé sur 60 dB.

### **II.2) Méthode expérimentale de mesure du temps de réverbération**

L'émetteur est placé à la place de l'opérateur locuteur, c'est-à-dire à 1.30 m du sol. Les récepteurs sont placés aux endroits des opérateurs auditeurs dans la salle de manière à avoir un échantillon de valeurs représentatives de temps de réverbération aux différentes places de la salle.

Concernant le signal émis par l'émetteur (opérateur locuteur), il doit exciter toutes les bandes de fréquences de manière à pouvoir obtenir un temps de réverbération pour chaque fréquence. En faisant cela, on s'assure de pouvoir améliorer l'acoustique de la salle car le pouvoir absorbant d'une solution technique dépend des fréquences d'excitation.

Ainsi, le bruit émis avec une source omnidirectionnelle permet d'exciter les murs absorbants avec toute la gamme de fréquence dans toutes les directions.

#### **II.2.1) Matériels utilisés**

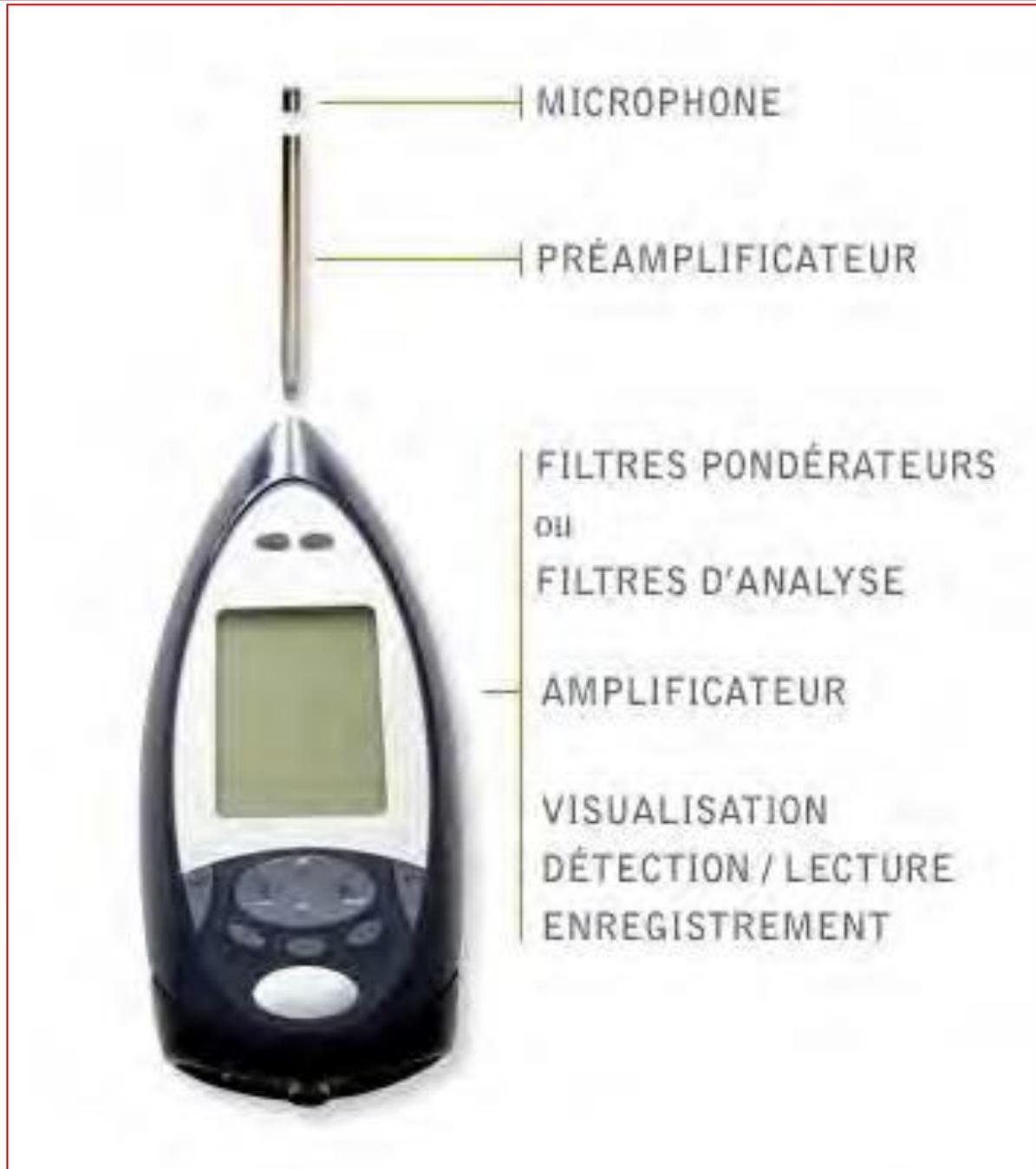
##### **Analyseur de temps de réverbération portable Type 2250-F**

Pressez sur la touche Départ/Pause et émettre un son, c'est tout ce dont on a besoin pour obtenir les conditions d'un mesurage de base.

L'état et l'avancement du mesurage sont immédiatement signalés par un feu tricolore, et le spectre résultant est affiché avec le  $T_r$  moyen de la salle. Les positions du mesurage sont présentées graphiquement sur l'écran.

Les modalités de mesurage sont conformes aux normes ISO 140, ISO 3382 et ISO 354.

Le type 2250-F est la quatrième génération de Sonomètres analyseurs Brüel&Kjær, Il est livré avec son module de mesures sono-métriques préinstallé.



**Figure6 : Sonomètre**

Quand il est combiné à une source sonore, le système type 2250-F/BZ-7227 déclenche son générateur de bruit incorporé, désactive celui-ci, puis mesure consécutivement le temps de réverbération et l'affiche sous forme de spectre et de courbes de décroissance.

Le mesurage peut être effectué par bandes d'octave ou de tiers d'octave mesurées en parallèle sur une plage de fréquences choisie, ce qui permet de focaliser la puissance acoustique sur la plage la plus pertinente.

Pour chaque bande, la décroissance est échantillonnée 200 fois par seconde et les temps de réverbération peuvent atteindre 30 secondes.



**Figure 7** : Source de bruit (Générateur de bruit)

## II.2.2) Applications et caractéristiques

### Applications

- Acoustique des locaux industriels.
- Acoustique des lieux publics, halls, auditoriums, etc.
- Correction de l'acoustique du bâtiment.
- Prise en compte de l'acoustique des chambres d'essai lors des calculs de puissance acoustique des machines et équipements.
- Calcul du coefficient d'absorption des matériaux.

### Caractéristiques (type 2250-F) :

- Analyse portative des temps de réverbération.
- Dynamique très étendue (pas de gamme à choisir).
- Bandes d'octave ou de tiers d'octave.
- Méthode Bruit impulsif (méthode Schroeder).
- Méthode du Bruit stable interrompu.
- Mesures en parallèle ou en série.
- Générateur intégré de bruit rose et blanc.
- Gestion des positions de mesure.
- Indicateurs de qualité des mesures.
- Annotations parlées ou écrites des mesures.
- Affichage du spectre, de la décroissance et de la moyenne des courbes de décroissance.
- Calcul du temps de réverbération moyen bande large.
- Logiciel PC pour reportions et traitement des données.[5]

## II.2.3) Les résultats expérimentaux de TR de la salle de commande à l'état actuel des parois

Les résultats obtenus du TR dans différentes bandes de fréquence.

250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
TR = 1,61s	TR = 1,94s	TR = 1,55s	TR = 1,50s	TR = 1,30s

**Tableau 1** : Les résultats expérimentaux obtenus du TR dans différentes bandes de fréquence.

**TR** : Temps de réverbération.

### II.3) Méthode analytique

La formule la plus utilisée dans les calculs des temps de réverbération, dans une salle en fonction de la fréquence, est celle de Sabine.

En effet, pour la formule de Sabine, il faut que les coefficients d'absorption soient plus petits que 1.

$$T = 0.161 \frac{V}{A} = 0.161 \frac{V}{Sa + 4mV}$$

Dans cette formule, on retrouve :

a : Le coefficient acoustique moyen de surface (a=0,08)

V : Le volume de la pièce (V= 320 m<sup>3</sup>)

m : La constante d'atténuation du son de l'air (m=1)

S : La surface totale de la pièce (S= 11,7 x 9 x 6 = 631,8m<sup>2</sup>)

#### II.3.1) Temps de réverbération recommandé de la salle de commande

$$T = 0.161 \frac{V}{A} = 0.161 \frac{V}{Sa + 4mV} \rightarrow TR = 0.161 \frac{320}{631.8 \times 0.08} = 0.7s$$

m : valeur négligeable dans une salle de faible volume

#### II.3.2) Les résultats analytiques de TR de la salle de commande à l'état actuel des parois

Une fois les différents calculs faits, on a alors une valeur par bande de fréquences.

250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
TR = 1,01s	TR = 1,29s	TR = 1,05s	TR = 1,01s	TR = 0,93s

**Tableau 2 :** Les résultats analytiques obtenus du TR dans différentes bandes de fréquence.

Il faut alors en extraire un temps de réverbération moyen.

Il consiste simplement à faire la moyenne de chaque temps de réverbération des bandes de fréquences comprises entre 250 Hz et 4000 Hz correspondants au spectre de la voix humaine. On a alors :

$$TR = \frac{TR_{250} + TR_{500} + TR_{1000} + TR_{2000} + TR_{4000}}{5}$$

## II.4) Méthode numérique

La simulation informatique d'un espace sonore permet de prévoir les améliorations nécessaires et leurs impacts sur le confort acoustique.

Les logiciels de simulation permettent de prédire rapidement et précisément des critères subjectifs et objectifs et de prendre en compte les normes acoustiques applicables au moment de la conception.

Nous allons donc présenter un logiciel de prédiction, CATT-ACOUSTIC, puis nous décrirons les différentes étapes et enfin, nous présenterons les résultats fournis par notre modèle.

## II.5) Conclusion

La durée de réverbération est, pour une fréquence donnée, en un point donné, l'intervalle de temps correspondant à une décroissance de 60 dB du niveau d'intensité acoustique, lorsque le taux de décroissance est à peu près constant au cours de la réverbération.

Il est en général estimé entre -5 et -35 dB. Le TR60 traduit l'impression de réverbération ou d'ampleur.

Trop court, l'acoustique est jugée "sèche". Trop long, elle est confuse. Pour la parole : le TR ne doit pas être trop long pour éviter un effet de brouillage ( $TR_{60} < 1$  à 1,3 s).

Les méthodes de mesure du temps de réverbération nous a permis de mettre en lumière les phénomènes acoustiques au sein d'une salle de commande et d'apporter des éléments quantitatifs afin d'en avoir une meilleure compréhension.

Cette étude de la réverbération à petite échelle nous a permis de présenter l'importance de l'absorption des matériaux présents dans une salle de commande.

## **CHAPITRE III**

# **Modélisation de la de la réverbération de la salle de commande sous CATT- ACOUSTIC**

## **CHAPITER III : Modélisation de la de la réverbération de la salle de commande sous CATT-ACOUSTIC**

### **III.1) Introduction**

Ce logiciel qui est un logiciel de simulation acoustique permet de simuler la répartition de l'énergie sonore de la source dans l'espace de la salle de commande. La salle est dessinée et les données acoustiques des matériaux des différentes parois de la salle sont renseignées par l'utilisateur tel que les coefficients d'absorption.

L'utilisation de ce logiciel permet donc de calculer de nombreux paramètres tels que le temps de réverbération ou la répartition de l'énergie dans la salle. Il peut également prendre en compte plusieurs récepteurs dans la salle ce qui permet à l'utilisateur d'observer avec plus de détail la répartition sonore. Il est principalement utilisé pour les environnements complexes acoustiquement.

CATT offre deux types importants de prédictions basés sur les techniques de l'acoustique géométrique :

- Une cartographie de différentes grandeurs physiques.
- Des calculs détaillés : Les prédictions données par ce module de calcul utilisent un procédé combinant à la fois les caractéristiques du tracé de cônes et de rayons ainsi que le modèle des sources images. Cette méthode de simulation numérique permet la création des réponses impulsionnelles.

### **III.2) Présentation du CATT ACOUSTIC**

CATT Acoustic (Computer Aided Theatre Technique) distribué par la société Euphonie, est un logiciel de simulation acoustique. Il rend possible la modélisation des salles, des sources acoustiques et électro-acoustiques et offre la possibilité de calculer de nombreux paramètres utilisés en acoustique des salles. L'une des caractéristiques intéressantes proposée par cet outil est de pouvoir simuler l'écoute d'une source ou d'un système de sources, à différents points d'observations de la salle, permettant ainsi à l'utilisateur d'avoir un aperçu sonore de l'étude menée.[6]

#### **III.2.1) Principe général de fonctionnement du logiciel**

Le logiciel nécessite un certain nombre d'informations concernant la salle, les sources utilisées et l'emplacement des points de réception. Ces données sont répertoriées dans les fichiers d'entrées et sont utilisées pour tous les calculs de simulation. Les résultats de ces calculs sont consignés dans des fichiers de sortie. [6]

### Données d'entrées

Les données nécessaires à la modélisation sont :

- Les **caractéristiques géométriques** de la salle (les coordonnées de ses points, la définition de ses surfaces),
- Les **caractéristiques des matériaux** constitutifs (les coefficients d'absorption et de diffusion des matériaux qui la compose),
- Les **caractéristiques de la source** (type de sources, emplacements, orientations, directivité...),
- Les données concernant les **points d'écoutes** (emplacement dans la salle)

### Valeurs de sortie

Les résultats sont pour la plupart présentés sous forme graphique mais également synthétisés dans des fichiers texte. Les principaux résultats utilisés sont :

- La **visualisation** 2D et 3D de la salle,
- Les valeurs des **facteurs subjectifs** tels que le C80 ou le RASTI définies ci-dessous,
- Les valeurs des **indices objectifs** (temps de réverbération  $T_r$  Sabine ou  $T_r$  Eyring)

#### Clarté C80 :

Facteur de Clarté. Rapport exprimé en décibels de l'énergie d'une impulsion sonore perçue à la position d'écoute pendant les 80 premières millisecondes divisée par l'énergie perçue après les 80ms.

La Clarté C80 doit être comprise entre +6dB et -2dB, +4dB étant la valeur théorique idéale.

#### RASTI:

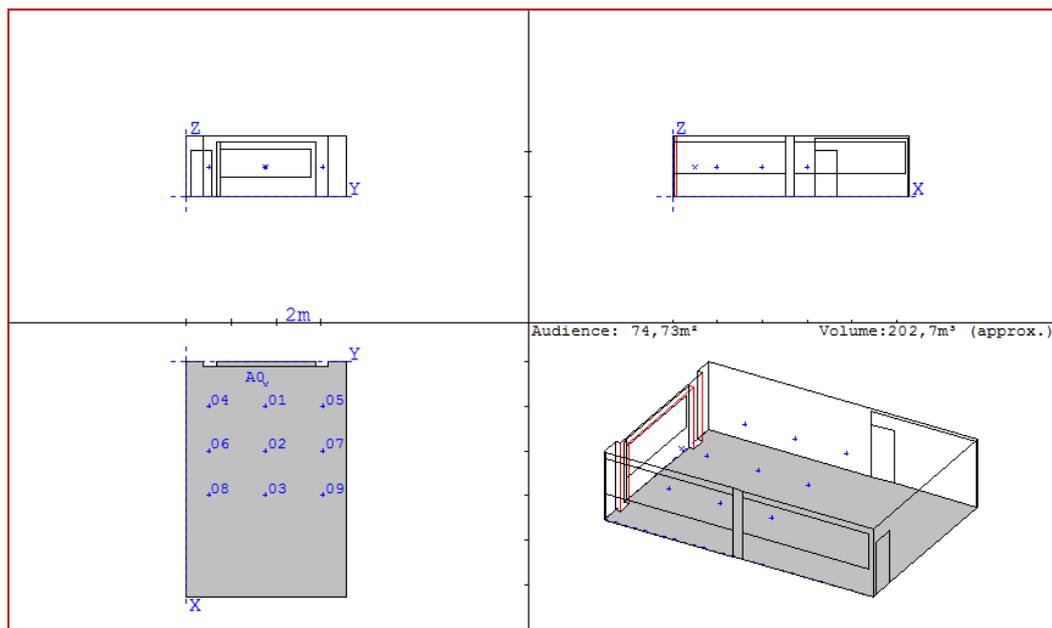
Rapid Speech Transmission Index. Indice d'évaluation de l'intelligibilité.

### III.3) Procédure de Modélisation

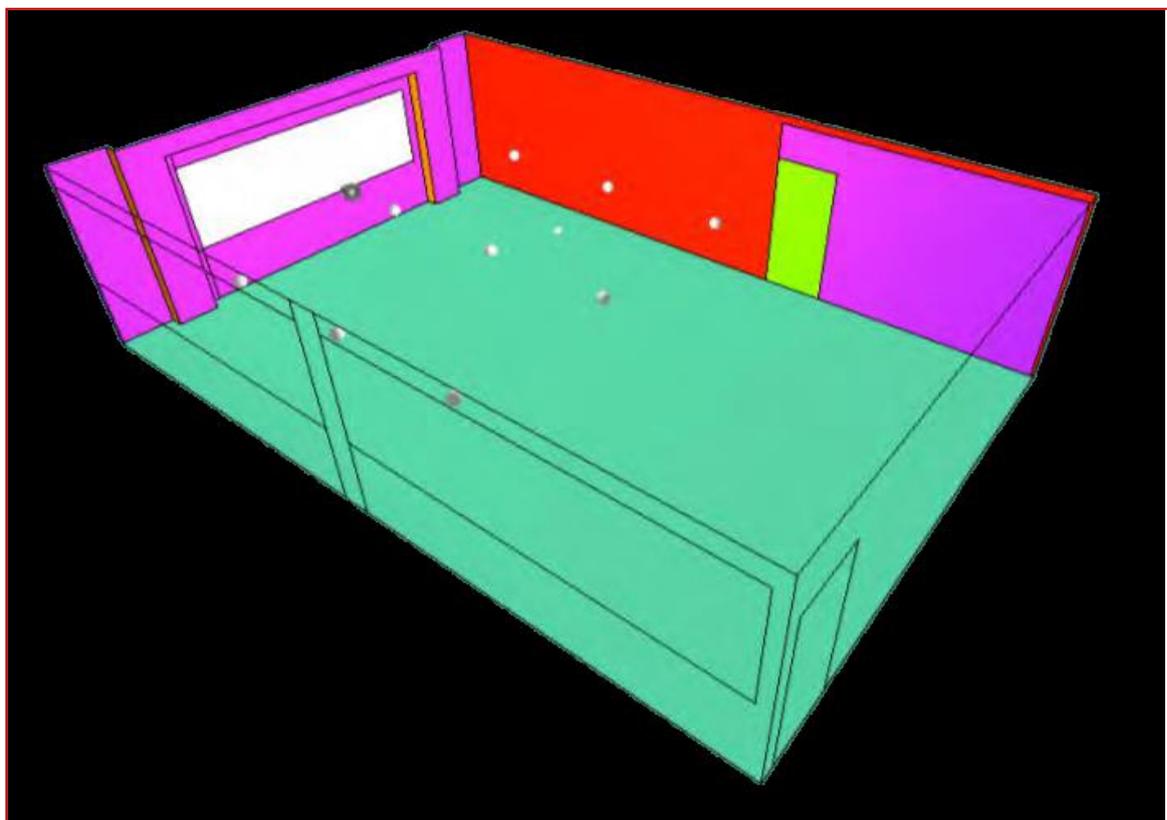
L'étude virtuelle d'une salle sous CATT peut se dérouler selon trois phases principales.[6]

#### III.3.1) L'entrée des paramètres architecturaux

La modélisation géométrique est obtenue en répertoriant toutes les données nécessaires à la création du modèle, à savoir : coordonnées des points de la salle et définition des plans composant la salle. Les coordonnées des points sont ensuite entrées.



**Figure 8:** Modélisation géométrique : Cordonnées des points.



**Figure 9:** Représentation de La Salle de commande en 3D.

### III.3.2) L'entrée des paramètres d'absorption et de diffusion des matériaux constitutifs de la salle

Il existe une banque de donnée sous CATT dans laquelle quelques paramètres classiques d'absorption et de diffusion sont entrés ; mais ces paramètres étant souvent peu précis.

#### Affichage des indicateurs de qualité

Pour que l'utilisateur puisse se fier aux mesures obtenues, l'affichage des résultats s'accompagne d'émoticônes renseignant sur la qualité du mesurage réalisé. En tapant avec le stylet sur un émoticône affiché, un texte apparaît avec description des détails pertinents

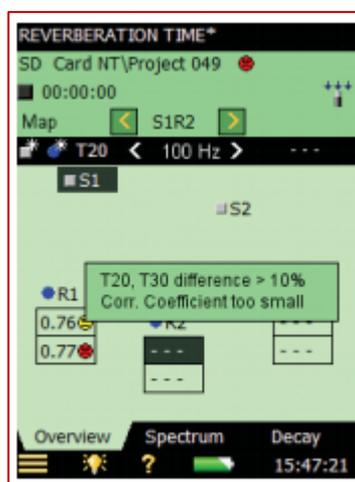


Figure 10 : Exemple d'affichage avec indicateurs de qualité.

### III.3.3) Le choix d'une ou des sources sonores et ses points de réceptions.

L'objectif étant de comparer les valeurs mesurées et les prédictions de CATT ; on doit placer la source virtuelle et les points de réception aux endroits où ont été faites les mesures. On pourra donc comparer les résultats fournis par le logiciel et ceux fournis par les mesures réelles.

Le temps de réverbération pouvant varier d'un endroit de la pièce à un autre, il est généralement mesuré à divers emplacements. La valeur moyenne pour toutes les positions mesurées fournit une évaluation globale, et les résultats par position caractérisent dans le détail l'acoustique du lieu, comme sur la Figure 11.

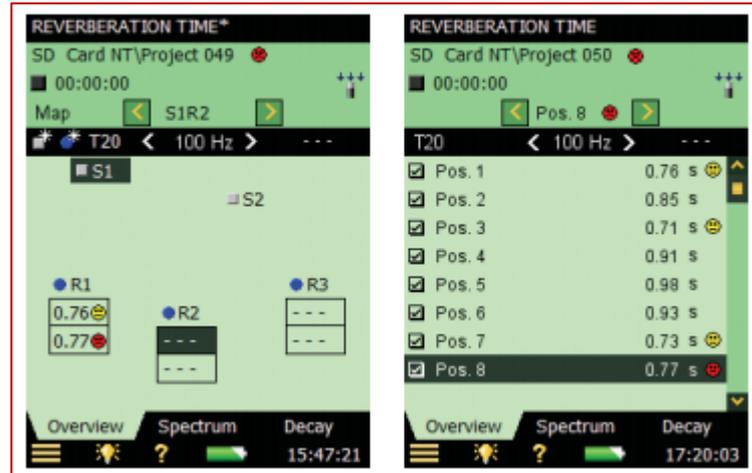


Figure 11 : Affichages CATT-ACOUSTIC exécutant un logiciel de temps de réverbération.

**Remarque :** L'écran de gauche schématise la répartition dans l'espace des sources et des récepteurs, tandis que, sur l'écran de droite, les positions des récepteurs sont listées dans un tableau.

Différentes valeurs moyennes peuvent être obtenues, basées sur les spectres ou sur les courbes de décroissance pour chaque bande de fréquence. Le spectre du temps de réverbération peut aussi être calculé sur la base d'une moyenne des courbes de décroissance.



Figure 12 : Affichages CATT-ACOUSTIC exécutant un logiciel de temps de réverbération.

**Remarque :** Spectre du temps de réverbération à gauche, courbe de décroissance à droite. Conversion du spectre du temps de réverbération (histogramme de la figure ci-dessus) numérique à l'état actuel de la salle de commande sous forme de tableau suivant.

250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
TR = 0,92s	TR = 1,24s	TR = 0,85s	TR = 0,60s	TR = 0,48s

Tableau 3 : Les résultats numérique obtenus du TR à l'état actuel des parois dans différentes bandes de fréquence.

### **III.4) Conclusion**

La simulation acoustique permet de prédire la qualité acoustique d'une salle en intégrant les performances des matériaux.

La distance de la source, le volume et la conception architecturale d'une salle de commande, jouent un rôle majeur dans la réduction de l'intelligibilité.

La simulation acoustique permet de faciliter le calcul de temps de réverbération de la salle de commande quand un certain nombre d'informations concernant la salle, les sources utilisées et l'emplacement des points de réception ils sont disponibles.

## **CHPITRE IV**

# **Traitement et amélioration de la réverbération sous CATT-ACOUSTIC**

## CHAPITRE IV : Traitement et amélioration de la réverbération sous CATT-ACOUSTIC

### IV.1) Introduction

Le traitement se fait par un changement des matériaux jusqu'à obtenir la valeur désirée. Pour corriger le temps de réverbération TR de la salle, on suppose que l'on ait un pic à 1 kHz que l'on veuille corriger, on choisira alors un matériau avec un coefficient d'absorptions suffisant à la fréquence 1kHz. Cette opération est répétée plusieurs fois jusqu'à obtenir la valeur de temps de réverbération recherchée.

### IV.2) Résultats de TR à l'état actuel des parois de la salle

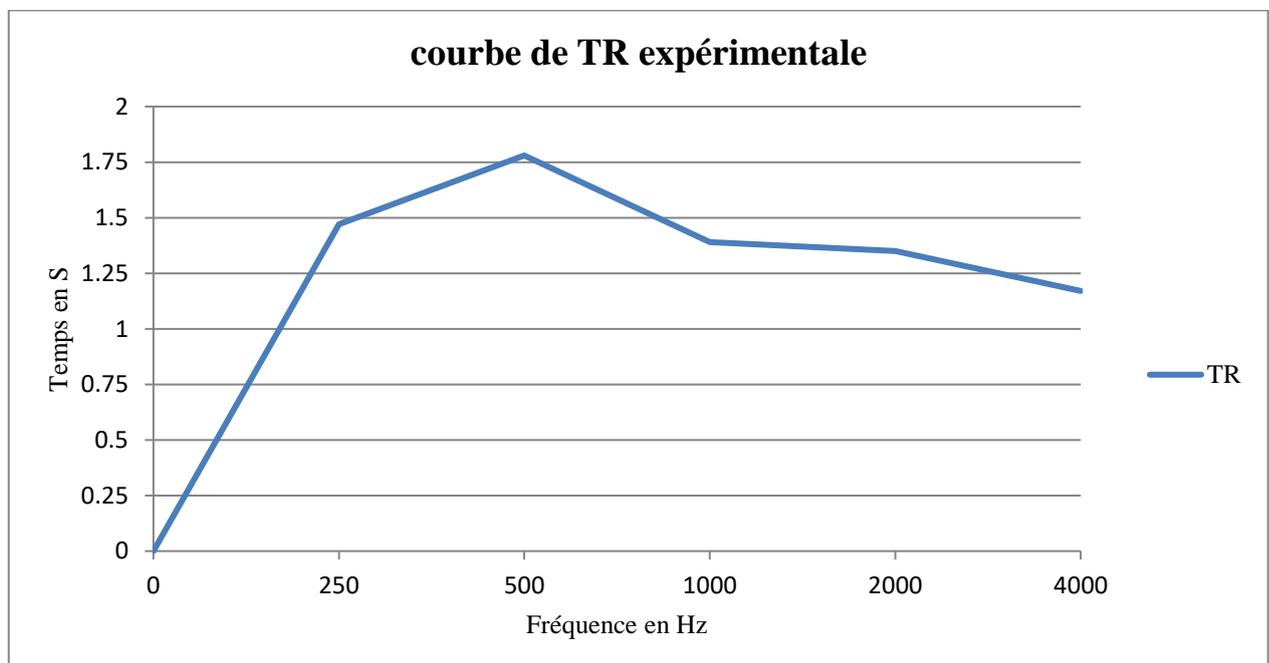


Figure 13 : Courbe de TR de la salle à l'état actuel des parois

#### IV.2.1) Discussion

Dans la salle de la commande, pour toutes les fréquences le temps de réverbération TR est mesuré plus élevé par rapport au niveau acceptable.

La valeur du temps de réverbération est identique pour tous les récepteurs et se stabilise un peu en les hautes fréquences. La valeur dans les basses fréquences est élevée, et la chute en fonction de la fréquence est due au phénomène de l'absorption mais n'est pas suffisante. Elle est ressentie d'une manière différente d'un récepteur à un autre suivant la position dans la salle.

### IV.3) Comparaison des TR expérimentales et numériques

Ainsi la comparaison des valeurs expérimentales avec les valeurs numériques doit permettre d'affiner les paramètres d'absorption des matériaux associés aux parois de la salle.

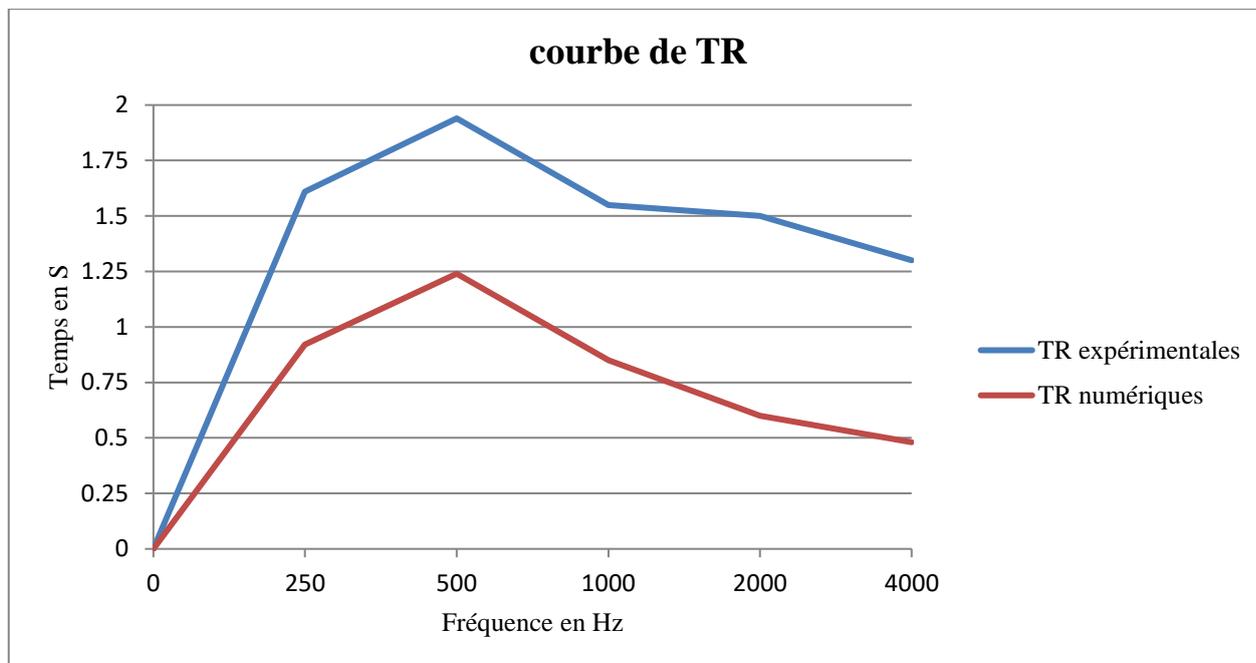


Figure 14 : Les Courbe de TR expérimentales et numériques.

#### IV.3.1) Discussions

Pour la salle de la commande, pour toutes les fréquences le temps de réverbération TR numérique est inférieur par rapport au TR expérimentales mais en remarque la même courbe avec des résultats plus moindre, car les résultats par la simulation est plus précis que par expérience. Les valeurs de cette différence entre les résultats mesurés et simulé varient aux les obstacles naturels qui en rencontre dans la salle et les faut humains dans la procédure de mesurage de TR.

#### IV.4) Comparaison des TR analytiques et numériques

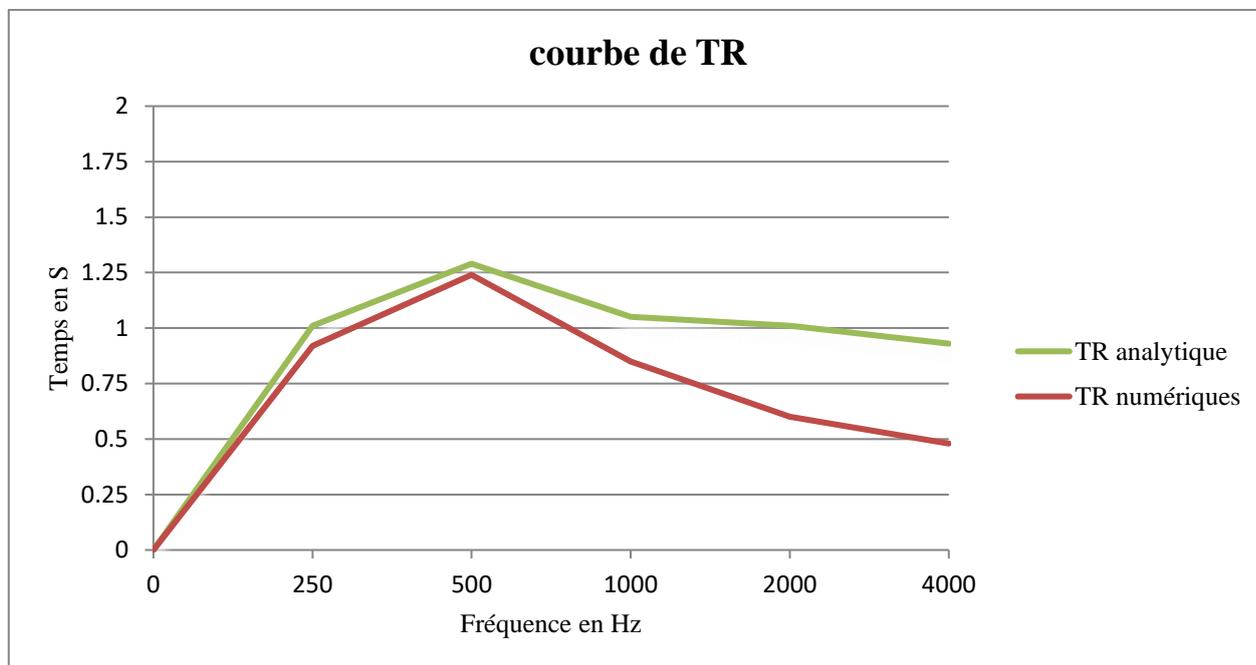


Figure 15 : Les Courbe de TR analytique et numériques

##### IV.4.1) Discussions

Pour la salle de commande, on trouve que les deux valeurs prévu et simulé sont égales aux basses fréquences de 0Hz à 500Hz donc un accord un peu est trouvé entre les valeurs prévu et simulées pour les paramètres TR ; puis la valeur prévue revient supérieure à la valeur simulée aux hautes fréquences de 1Hz à 4KHz, mais globalement un bon accord entre la simulation et l'excitation par sinus logarithmique (analytique). Les valeurs de cette différence entre les résultats prévu et simulé varient entre les positions du récepteur, les coefficients d'absorption des parois et des surfaces, et par ce qu'il existe une banque de donnée sous CATT dans laquelle quelques paramètres classiques d'absorption et de diffusion sont entrés ; mais ces paramètres étant souvent peu précis.

#### IV.5) Comparaison des TR expérimentaux, analytiques et numériques

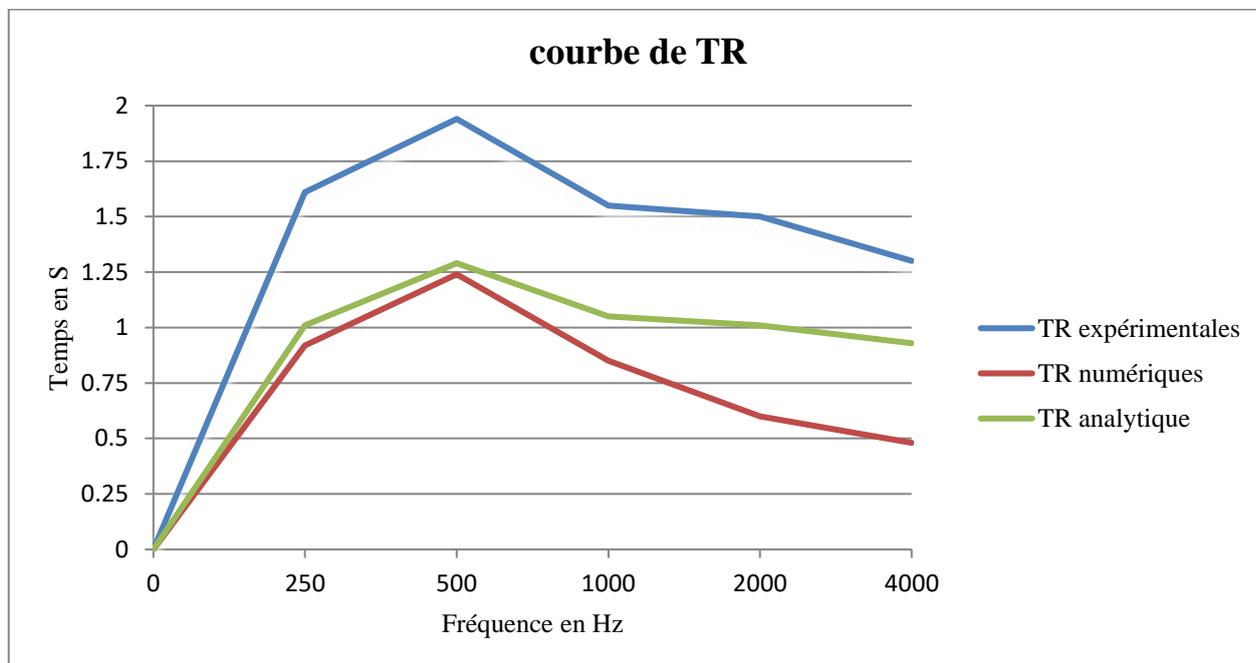


Figure 16 : Les Courbe de TR expérimentales, analytiques et numériques.

##### IV.5.1) Discussions

Les résultats obtenus par excitation sinus logarithmique balayé s'accordent un peu avec les résultats obtenus par modélisation acoustique (simulation), le contraire avec l'excitation par l'expérience, un écart considérable entre les deux méthodes est noté.

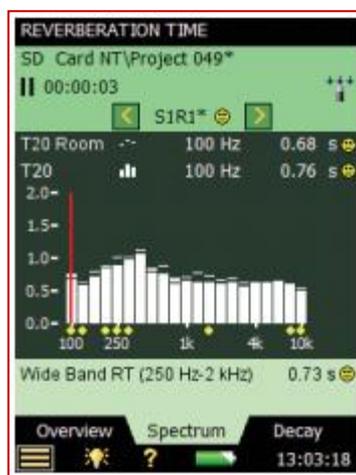
Dans la salle, le son se prolonge après la coupure de la source à cause des réflexions multiples sur les parois. Cette prolongation dépend de l'absorption des parois et de leurs revêtements. Si elle est trop importante, elle peut avoir un effet négatif sur l'intelligibilité de la parole, et donc altérer la qualité de transmission. C'est pourquoi, le temps de décroissance de l'énergie acoustique à l'extinction d'une source (correspondant à la durée de réverbération en champ diffus) est utilisé pour quantifier le phénomène, et ainsi caractériser les propriétés acoustiques d'une salle même aux basses fréquences.

#### IV.6) Analyse et correction

Nous remarquons qu'on a un temps de réverbération inférieur à la valeur recommandée, par contre la définition est bonne. Ceci se traduit par le fait que l'opérateur auditeur entend difficilement à cause de l'absorption élevée et le déséquilibre du temps de réverbération.

Si l'on veut laisser intacte la disposition architecturale, il y a la possibilité de changer les matériaux du plafond et des murs. Dans ce cas, les panneaux muraux et de plafond sont particulièrement recommandés en tant que matériaux d'absorption acoustique.

La modélisation par CATT acoustiques peut donc corriger l'acoustique de cette salle. Des solutions simples et économiques par de simples modifications peuvent être apportées sans modifier la conception de la salle. [7]



**Figure 17** : Spectre du temps de réverbération après correction acoustique

Matériau	Couche d'air en mm	Fréquence en Hz					$\alpha_s$ coef.absorption
		250	500	1000	2000	4000	
Panneaux légers en laine de bois 50 mm	50	0,45	0,6	0,75	0,85	0,9	TR Optimaux
		0.77s	0.81s	0.79s	0.56s	0.54s	

**Tableau 4** : TR optimaux en fonction des nouveaux coefficients d'absorption

#### IV.6.1) Comparaison des TR avec les nouvelles parois et les TR avec les parois actuelles de la salle de commande

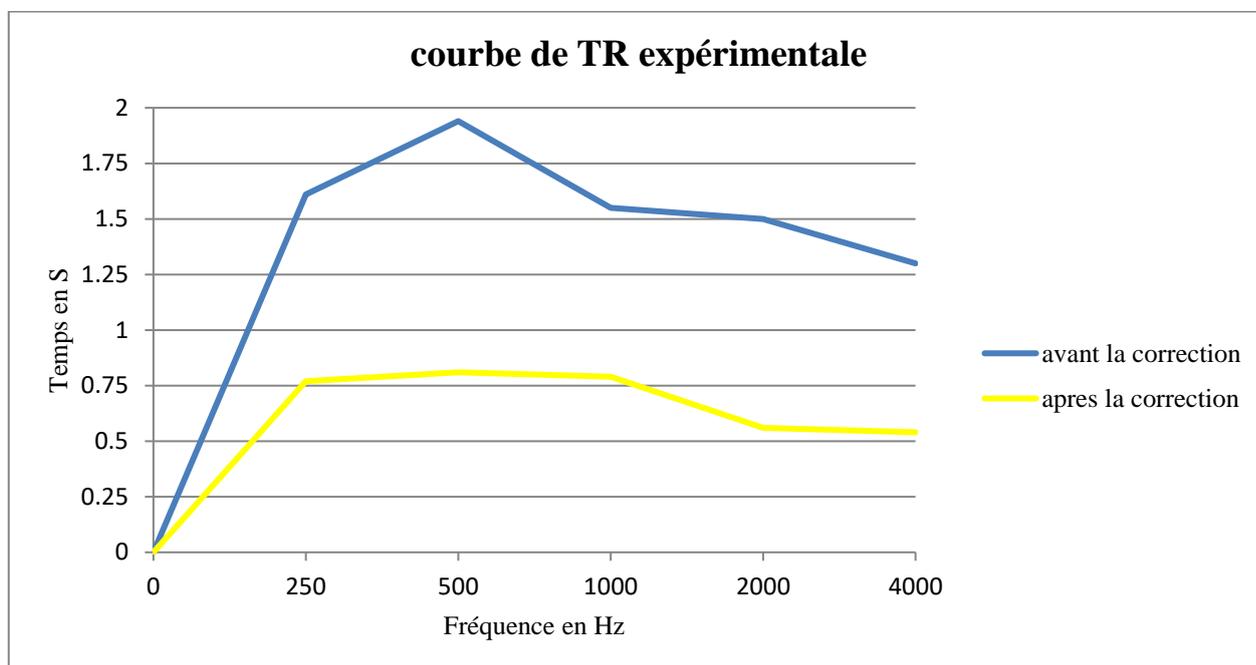


Figure 18 : Courbe de TR expérimentale avant et après la correction acoustique

#### IV.6.1) Discussions

Pour la salle des commandes après le changement des parois actuelles par des nouvelles parois (la correction acoustique), pour toutes les fréquences le temps de réverbération TR expérimentales après la correction est inférieur par rapport au TR expérimentales avant la correction. En remarque que le TR maximale de la salle (0,81) est à peu près égale à valeur recommandée (0,8s), car les nouvelles parois qui en mis en œuvre à des coefficients d'absorption plus élevée que les anciens ils absorbent le son émis et cette phénomène (correction acoustique) qui réduit le TR à la valeur recommandée.

#### IV.7) Conclusion

La modélisation par CATT-ACOUSTIC Aide nous de calculé le Tr des salles et trouve les solutions acoustique par simulation avec des solutions pas cher et facile.

La correction devra être complété par l'emploi de moyens électro-acoustiques avec coefficients d'absorption plus valable sur les parois et les surfaces de la salle pour réduire le Tr.

Après cette correction on arrive à un temps de réverbération égal à la valeur recommandée.

## **CHAPITRE V**

# **Correction acoustique et prévention des risques**

## **CHAPITRE V : Correction acoustique et prévention des risques**

### **V.1) Introduction**

Le but de cette étude étant d'améliorer l'acoustique de la salle de commande, nous utilisons le temps de réverbération  $T_r$  comme indicateur de confort acoustique.

En effet, ce temps est lié à des coefficients acoustiques nommés coefficients alpha Sabine permettant de caractériser le comportement acoustique des parois et par conséquent d'améliorer le confort acoustique de la salle par recouvrement de certaines parois par des panneaux absorbants.

Ce  $T_r$  s'obtient en observant la décroissance du bruit au cours du temps pour différentes fréquences. Cet indicateur est très facilement illustré dans la salle : une salle ayant un temps de réverbération élevé résonnera et une salle qui, au contraire, aura un  $T_r$  plus faible étouffera beaucoup plus le bruit.

### **V.2) Loi de Sabine**

Sabine a établi en 1898 la relation fondamentale entre le volume d'une salle, les propriétés d'absorption acoustique des surfaces de ses parois et le temps de réverbération.

Il construisit un modèle théorique où chaque élément de paroi est doté d'un coefficient d'absorption exprimant la part de l'énergie sonore absorbée par le matériau et où le champ sonore est idéalement diffus, c'est-à-dire que la probabilité des ondes sonores soient la même dans toutes les directions.

Dans ces conditions, utilisant un modèle d'acoustique géométrique statistique, il calcula le libre parcours moyen entre deux réflexions, et de là, avec la vitesse du son en paramètre, il montra que le temps de réverbération  $T_r$  pour la salle entière est proportionnel à son volume  $V$  et inversement proportionnel à la surface d'absorption équivalente  $A$  ( $k=0,161$  est une constante de proportionnalité). [8]

### **V.3) Correction acoustique par les matériaux poreux et fibreux**

En acoustique, les matériaux absorbants (absorption des hautes fréquences) sont à porosité ouverte (leurs pores communiquent entre eux).

Dans ces matériaux, l'air est mis en mouvement par les ondes sonores. Elles perdent de l'énergie par suite des frottements des particules d'air sur le matériau, et l'énergie acoustique est transformée en chaleur.

Pour augmenter l'absorption de ce type de matériau aux fréquences basses, il suffit d'augmenter l'épaisseur du matériau. [9]

#### V.4) Le concept de l'absorption acoustique

Le confort acoustique est la restitution parfaite du message sonore (parole) aux auditeurs quel que soit leur emplacement dans la salle sans dégradations (échos par exemple). Un mélange de surfaces absorbantes et réfléchissantes est nécessaire pour un confort acoustique maximal.[9]



Figure 19 : La différence entre deux local avec et sans la correction acoustique.

#### V.5) Valeurs moyennes des coefficients d'absorption acoustique

Pour procéder à des appréciations sommaires, il suffit de connaître les valeurs moyennes des coefficients d'absorption  $\alpha_s$  de certains groupes de matériaux acoustiques. Les fournisseurs de ces matériaux sont en mesure d'indiquer les coefficients d'absorption de leurs produits.

Matériau	Couche d'air en mm	Fréquence en Hz						$\alpha_s$
		125	250	500	1000	2000	4000	
Béton lissé brut	–	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04
Fenêtres fermées	–	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04
Crépi usuel	–	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04
Toiture Du risol	–	0,5	0,73	0,75	0,8	0,85	0,9	0,75
Tôle profilée lisse	–	0,06	0,2	0,15	0,14	0,1	0,05	0,12
Tôle profilée perforée	–	0,5	0,85	0,92	0,85	0,75	0,7	0,76
Pavaroc avec dessin	200	0,35	0,45	0,5	0,7	0,85	0,95	0,63
Plafonds métalliques perforés trous 10 –12%	250	0,35	0,7	0,75	0,85	0,9	0,8	0,72
trous 20 – 25%	250	0,4	0,75	0,85	0,9	0,95	0,95	0,8
Panneaux légers en laine de bois 50 mm	50	0,2	0,45	0,6	0,75	0,85	0,9	0,63
Absorbeurs en feuille pour locaux humides	50	0,1	0,7	0,8	0,8	0,75	0,45	0,6
Panneaux pyramidaux en matériau alvéolaire	–	0,15	0,4	0,8	1,05	1,05	1,05	0,75
Crépi acoustique 20 mm	–	0,05	0,15	0,35	0,57	0,72	0,64	0,41
Panneaux de fibres minérales verre/laine de pierre 50 mm	–	0,2	0,7	1	1	1	1,05	0,83
Baffles, h/d = 1/1	–	0,2	0,4	0,7	0,8	0,85	0,8	0,63

**Tableau 5** : Coefficients d'absorption acoustique  $\alpha_s$  (valeurs moyennes de produits divers).[10]

## V.6) L'intelligibilité de la parole

L'intelligibilité de la parole est une autre mesure du taux de transmission de la parole. Cette mesure est généralement utilisée pour étudier les propriétés acoustiques des salles où on observe des communications entre opérateurs. Elle peut être obtenue de trois manières différentes :

- On peut faire appel à des locuteurs et des auditeurs (mesures subjectives),
- On peut également utiliser des paramètres physiques (mesures prédictives),
- Des signaux artificiels (mesures objectives).

## V.7) Conclusion

La correction acoustique des locaux est une discipline qui relie des considérations physiques (propagation, réflexion et absorption du son sur les parois, calcul du temps de réverbération) aux aspects perceptifs (intelligibilité de la parole dans un local).

L'acoustique des locaux a été toujours une préoccupation pour les acousticiens et les experts de la sécurité.

Dans une bonne correction acoustique on retrouve une absorption maximale dans le local mais le temps de la réverbération très court.

Dans une mauvaise (ou l'absence) correction acoustique on retrouve le temps de la réverbération maximale du locale.

## **Conclusion générale**

La modélisation et la simulation de la salle de commande FERTIAL - ANNABA nous a permis de constater réellement l'importance de l'acoustique dans les salles de travail. Elle nous a conduits à faire des recherches sur l'acoustique et nous avons trouvé, entre autre, que les normes fixent un paramètre important.

Le temps de réverbération, qui correspond au temps de décroissance du niveau sonore d'un certain niveau doit être de 0,8s maximum dans une salle de volume donné.

Nous pouvions aisément dire, de part le court temps passé dans cette salle, que cette limite devait être dépassée.

Les mesures réalisées par la suite à l'aide d'une source sonore omnidirectionnelle et d'un sonomètre ont confirmé l'importance du travail à accomplir ici. Nous avons donc modélisé la salle de commande sur le logiciel Catt-Acoustic puis développé un modèle numérique de calcul acoustique à l'aide de la formule de Sabine.

En combinant les 3 méthodes d'obtention des valeurs, nous avons pu en déduire les coefficients d'absorption des différents matériaux composants la salle.

Ces résultats ont mis en valeur l'influence de certains matériaux dans le mauvais confort acoustique de cette salle.

L'amélioration du confort acoustique de cette salle en utilisant des produits nettement absorbant ce qui nous a orientés vers la proposition de panneau ayant un meilleur coefficient d'absorption.

Les résultats nous ont montrés que les panneaux convenaient bien à la salle et permettraient de satisfaire les besoins de confort acoustique.

En mettant en œuvre ces modifications, la qualité de l'environnement de travail sera améliorée ce qui permettra une meilleure prévention des risques qui peuvent surgir suite aux mauvaises réverbérations des salles de travail.

## Références bibliographiques

- [1] Correction acoustique des salles, Vincent Champilou et Bastien Coutant.  
<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01873288/document>
- [2] Conception acoustique d'une salle – Intérêt du prototypage et principe de conception de maquette, Caroline DE SA – Hélène HORSIN MOLINARO.
- [3] Par softdb Publié le mai 14, 2019 Dans Acoustique générale (site internet : <https://www.softdb.com/fr/reverberation-en-analyse-acoustique/#:~:text=Une%20onde%20sonore%20est%20d%C3%A9velopp%C3%A9e,l'oreille%20de%20cette%20fluctuation.&text=De%20plus%2C%20si%20l'onde,oreille%2C%20on%20par%20de%20r%C3%A9verb%C3%A9ration.>
- [4] Le système EchoBloc : traitement du signal dans les milieux réverbérant, Par Varin Virgile.  
<http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCDPHA MAUDIO 2011 VARIN VIRGILE.pdf>
- [5] FICHE TECHNIQUE, Analyseur de temps de réverbération portable Type 2250-F.
- [6] CATT-ACOUSTIC v8.0c, room acoustic modeling software, <http://www.catt.se/>.
- [7] N. Remy, "Acoustique des Salles", école nationale supérieure d'architecture de Grenoble,
- [8] Éric Vivié et Michel Cassan, « *Acoustique Architecturale* », dans Denis Mercier (direction), *Le Livre des Techniques du Son, t.1 - Notions fondamentales*, Paris, Eyrolles, 1987, 1<sup>re</sup> éd.
- [9] <http://www.madeinacoustic.com/fr/correction-acoustique>
- [10] Acoustique des locaux industriels <https://www.suva.ch/fr-CH/materiel/documentation/acoustique-des-locaux-industriels>