

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Etude du comportement acoustique des salles

Abdelghani GRAMEZ¹

¹CNERIB, Cité Nouvelle El-Mokrani Souidania, Alger, a.gramez@gmail.com

Dans ce travail nous regrouperons les informations nécessaires pour une description précise de la qualité acoustique d'une salle, ou même de différents emplacements à l'intérieur d'une salle. Des critères objectifs mesurables seront donc identifiés pour les différentes sensations subjectives. Les principales méthodes adoptées pour le calcul et la prévisualisation de la durée de réverbération, de la distribution du champ sonore et de la réponse impulsionnelle d'une salle seront présentées, à savoir : les méthodes empiriques et statistiques, les méthodes ondulatoires et les approches géométriques. Nous préciserons pour chacune d'elles les modalités de son application ainsi que leurs limites. A travers quelques exemples, la deuxième partie de ce travail, donnera une idée sur le minimum d'information, sur le comportement acoustique d'une salle, qui peut être obtenu avec les logiciels de simulation acoustique actuels. Le premier exemple illustrera le calcul des différents paramètres acoustiques pour une salle de géométrie simple. Le deuxième et le troisième exemple seront exécutés sur un système de même géométrie tout en essayeront d'effectuer quelques changements sur la distribution des surfaces intérieures ainsi que les sources sonores pour voir leurs effets sur les différents paramètres acoustiques de la salle. Dans ces exemples, la dimension "auralisation", récemment incorporée dans les programmes de simulation, sera prise en charge.

1 Introduction

Le problème de la qualité acoustique des salles est multidimensionnel : géométrique (ou physique), objectif (lié au champ acoustique), subjectif, (lié à la perception). Dans les trois domaines "Architectural, Objectif et Subjectif", il existe un nombre important de paramètres : les salles peuvent être différentes dans leur conception (de dimensionnement aux chaises, plancher, et ainsi de suite jusqu'aux petits détails). Dans le domaine objectif, les champs acoustiques décrits par le concept de la réponse impulsionnelle, contiennent une richesse de différents composants acoustiques (réflexions), chacun d'eux est une fonction du temps, niveau, direction et fréquence. En outre, dans le domaine subjectif, chaque individu (auditeur) peut avoir sa propre manière d'exprimer le degré de confort acoustique dans une salle [1].

En d'autres termes, dans l'acoustique des salles, le monde réel est très complexe. A cet effet nous devrions donc simplifier les problèmes c-à-d réduire les degrés de liberté, par une bonne définition des concepts et un bon choix des paramètres significatifs dans chacun des trois domaines [1, 2, 3].

Dans ce travail, Nous essayons d'abord de présenter le vocabulaire utilisé pour décrire le comportement acoustique d'une salle. Nous isolerons par la suite l'ensemble de paramètres acoustiques permettant une évaluation complète de l'acoustique d'une salle. Puis nous décrivons brièvement les différentes approches de modélisation de l'acoustique des salles. A travers quelques exemples simples, exécutés sur deux environnements de simulation, la dernière partie sera réservée aux calculs des paramètres acoustiques des lieux destinés aux communications orales à savoir les temps de réverbération et l'indice de transmission de la parole.

2 Les méthodes d'évaluation du comportement acoustique des salles

2.1 La réverbération

Il y a plus de 100 ans, W.C. Sabine a constaté la correspondance quantitative entre la surface d'absorption, le volume et le temps de réverbération en secondes TR d'une salle [4] : $TR = 0,16V/A$, avec V est le volume de la salle, en m³ ; A est la surface équivalente d'absorption, en m².

Cet événement a marqué le début de l'acoustique des salles comme science et dans la plupart des normes d'aujourd'hui le temps de réverbération est déterminé comme une régression linéaire sur la courbe de décroissance de niveau de pression acoustique, dans la gamme -5 à -35 dB par rapport au niveau maximal, un exemple est présenté dans la figure 1.

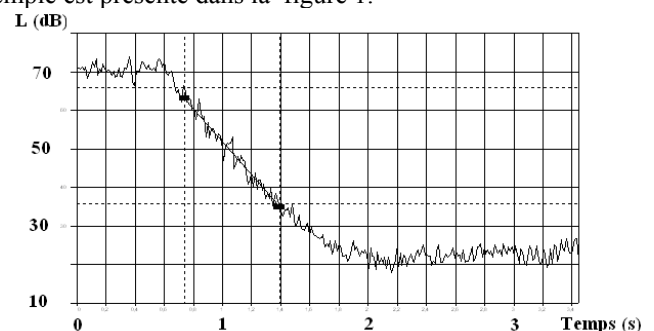


Figure 1 : Exemple de Courbe de décroissance du niveau de pression acoustique dans une salle

2.2 La réponse impulsionnelle

Après Sabine, la durée de réverbération dans une salle était considérée comme le principal indicateur de ses

propriétés acoustiques. Actuellement, l'enregistrement de la réponse impulsionnelle permet d'effectuer d'autres types de mesurages tels que les niveaux relatifs de pression acoustique, les rapports énergétiques précoces/tardifs, les proportions d'énergie latérale, les fonctions d'intercorrélation binaurale et les bruits de fond, sont nécessaires à une évaluation plus complète de la qualité acoustique des salles [1, 2, 3].

La réponse impulsionnelle est considérée maintenant comme la source de base d'information concernant les propriétés audibles du champ acoustique dans une salle. En effet, ce signal, une fois enregistré avec une technique multicanaux préservant les informations sur la direction de l'incidence, peut renseigner sur le comportement acoustique d'une salle entre deux positions spécifiques de la source et le récepteur [1, 2, 3].

Considérons une impulsion sonore de courte durée émise par une source sonore, la propagation de l'onde sphérique émis par cette source se fait dans toutes les directions, le premier son entendu par l'auditeur (à une position donnée) provient de la partie de l'onde, qui a propagé directement de la source au récepteur, ce qu'on appelle le son direct (voir figure 3). Ce composant est suivi par d'autres parties de l'onde qui ont subi une ou plusieurs réflexions sur les parois ou les objets présents dans la salle, voir figure 3.

Les réflexions tardives (qui arrivent en retard par rapport à l'onde directe) ont également une intensité plus faible par rapport à l'intensité de l'onde directe à cause de l'atténuation sphérique et à cause de l'absorption chaque fois que l'onde rentre en interaction avec un objet ou une paroi dans la salle. L'onde sonore continuera ce processus (réflexion- absorption) avant d'être perçu de nouveau par le récepteur, jusqu'à ce que toute l'énergie ait été absorbée par les parois et les objets, voir figure 3. La densité de ces réflexions tardives augmente avec le temps, mais l'atténuation due à l'absorption implique que leur niveau sonore baissera avec le temps. Cette décroissance de niveau est souvent entendue comme « réverbération » dans la salle.

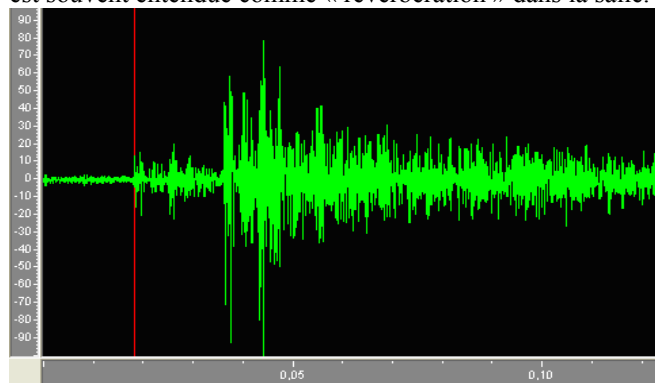


Figure 2: réponse impulsionnelle d'une salle de cours du CNERIB

2.3 Effets subjectifs des réflexions audibles

Premièrement, à cause de l'effet de masque, la réflexion sera inaudible si elle atteint l'oreille très rapidement après le son direct et/ou son niveau est très bas par rapport au son direct. Ainsi, il existe un seuil d'audibilité (des sons réfléchis) qui dépend du retard et de la direction d'incidence relative au son direct. Seulement si le niveau des ondes réfléchies est supérieur de ce seuil, la réflexion aura un effet audible. Les effets possibles sont (au moins) [1, 2, 5]:

- accroître le niveau (addition d'énergie) ;

- accroître la clarté, si elle arrive entre 50-80 ms après le bruit direct ;
- accroître la distribution spatiale : si la direction de réflexion dans le plan horizontal est différente de celui du son direct, les signaux reçus par les deux oreilles peuvent être différents (si l'angle entre le son direct et les sons réfléchis diffère dans le plan vertical seulement, l'effet est plutôt un changement de timbre ou de coloration du son) ;
- Faire un écho, typiquement observé pour des retards au delà de 50 ms et aux niveaux élevés de réflexion. Si le retard est très long, plus de 200 ms, l'écho peut être détecté même à des niveaux beaucoup plus bas ;
- Coloration : si le retard est court, par exemple au dessous de 30 ms, et le niveau est élevé, l'addition de phase du son direct et la réflexion créera un effet de « filtre en peigne », ce qui détériore sévèrement le spectre du signal ;
- Changer la direction de localisation : dans les cas où la réflexion est plus forte que le son direct. Ceci peut se produire par l'intermédiaire d'une surface concave ou en raison de l'atténuation excessive de son direct.

Il est à signaler en plus, que le seuil d'audibilité, le risque d'écho et d'autres effets dépendent également des propriétés spectrales et temporelles du signal. Ainsi, avec la parole, il est beaucoup plus facile de détecter des échos quand le signal est lent.

3 Paramètres d'évaluation de la qualité acoustique

Le nombre considérable de paramètres proposés par différents chercheurs pour déterminer la qualité acoustique dans les salles a multiplié les méthodes expérimentales utilisées, tout dépend des caractéristiques à considérer. Ces paramètres sont associés en général aux sensations subjectives suivantes [1, 2]:

- Clarté : en ce qui concerne l'audition de la musique, la clarté se rapporte à la perception des tonalités séparées à temps et des instruments joués simultanément.
- La réverbération : représente le degré de vivacité de la salle.
- L'intelligibilité : est essentielle pour l'audition verbale et mesure la compréhension verbale.
- La sensation de l'espace (spatialisation) : mesure la sensation d'être enveloppée par le son, donnant l'impression d'être dans une petite salle, et étant près de la source de bruit.

Parmi ces propositions, nous pourrions mentionner la proposition d'Ando [4] qui est la plus exceptionnelle. Elle se base sur le fait que parmi tous les paramètres, seulement quatre sont statistiquement indépendants, c.-à-d., n'importe quelle variation de chacun n'affecte pas l'autre (paramètres orthogonaux). Ces paramètres sont : le coefficient de corrélation croisée binaurale (IACC), la durée de réverbération initiale (EDT), le facteur d'énergie ou la force d'énergie (G), et la durée entre le premier bruit direct et la première réflexion (ITD_G). La norme internationale ISO 3382 [6] mentionne six paramètres : la durée de réverbération T, la tenue acoustique ou la force d'énergie G, la durée de réverbération initiale EDT, le rapport de l'énergie précoce à l'énergie tardive C_{te}, la fraction d'énergie latérale précoce LF et le coefficient de corrélation croisé interauraux IACC. Pour mesurer l'intelligibilité de la parole les critères d'évaluation les plus significatifs utilisés sont la "réduction du pourcentage d'articulation des consonnes" (% ALC : Percentage of Articulation Loss in

Consonants) et "l'indice de transmission de la parole" (STI : Speech transmission index), le RASTI correspond à la méthode d'évaluation dite rapide de cet indice [1].

4 Modélisation de comportement acoustique des salles

4.1 Méthodes empiriques et statistiques

Les méthodes empiriques sont les premières qui ont été utilisées dans ce domaine, les modèles de Sabine et d'Eyring étant les plus populaires. Leurs méthodes offrent une évaluation approximative et rapide de certains paramètres à savoir le niveau de pression acoustique [2].

Les théories de Sabine et d'Eyring sont encore utilisées pour prévoir le niveau de bruit ou pour l'estimation des propriétés acoustiques de certains éléments de construction (parois, planchers...etc.). La théorie des champs diffus est aussi appliquée par les architectes pour donner une estimation rapide du champ acoustique dans une salle donnée.

Cependant, ces méthodes ont leurs propres approximations et limitations. Par exemple, la théorie des champs diffus ne peut pas être appliquée dans les salles fortement absorbantes [4].

4.2 Méthodes des éléments finis

Tout d'abord destinée à résoudre des problèmes structuraux, la méthode par éléments finis de volume (souvent abrégée FEM pour Finite Elements Methode) est également utilisée avec succès pour la résolution d'autres problèmes (diffusion, flux, etc.). Elle repose sur la décomposition de la solution recherchée en une somme de fonctions de base N_i , dont l'amplitude respective A_i est obtenue en résolvant une formulation intégrale variationnelle issue de la forme faible de l'équation en jeu. Cette forme intégrale est appliquée à l'ensemble du domaine étudié, discrétisé ensuite en une somme d'éléments liés les uns aux autres par l'expression de la variable recherchée sur leurs frontières (deux éléments voisins requièrent l'égalité de cette variable sur leur frontière commune).

L'usage de fonctions de base dont la somme doit approcher la solution recherchée permet de s'affranchir de la recherche de solutions analytiques de l'équation régissant le domaine étudié. Ainsi, il est possible de résoudre des équations non-linéaires complexes. Cependant, le nombre de coefficients A_i est très important, car ils caractérisent aussi bien une discrétisation du domaine que des frontières.

Dans la méthode des éléments finis de frontière (Boundary Elements Method), les coefficients A_i appliqués aux fonctions de base permettent d'approcher au mieux (best fit) la forme recherchée. Cependant, si les fonctions de base sont choisies de manière à résoudre analytiquement cet opérateur, on peut résoudre le problème en ne discrétisant que les limites du domaine. Autrement dit, le problème est résolu par la méthode intégrale : la solution se présente sous la forme d'un noyau corrigé par des intégrales de contour, auxquelles on applique une forme faible et qui seront discrétisées pour la résolution du problème. Pour cette raison, on nomme cette seconde approche méthode des éléments finis de frontière (abrégée BEM pour Boundary Elements Method).

Cependant, l'une et l'autre méthode sont limitées aux fréquences élevées car la discrétisation nécessairement fine des frontières (ou du domaine) conduirait alors à des matrices de très grandes dimensions [5]. Les méthodes par éléments finis peuvent être appliquées dans n'importe quelle géométrie et délivrent des résultats de grande précision sous réserve de convergence de la solution numérique et au prix de systèmes matriciels nécessitant de longs temps de calcul. Cela signifie que ces modèles « ondulatoires » sont typiquement limités à des basses fréquences et aux salles de petites dimensions. En outre ces méthodes peuvent être considérées, dans le cas général, comme trop précises pour être utiles dans des environnements architecturaux où les résultats sont souvent exprimés pour des bandes d'octave ou de 1/3 d'octave de fréquence. Tout ce qui a été évoqué dans ce paragraphe justifie la faible utilisation de ces méthodes dans ce domaine.

4.3 Méthodes géométriques

Il existe une autre possibilité de décrire la propagation du son par des particules sonores se déplaçant au long des rayons du son. Ces modèles géométriques sont bien adaptés pour l'étude de propagation du son en hautes fréquences (petite longueur d'onde) et pour l'étude de l'interférence dans les structures compliquées [2].

En effet, dans la gamme dite des moyennes fréquences audibles (de 500 à 4000 Hz ce qui correspond à des longueurs d'onde comprise entre 0.085 m et 0.68 m) et pour des cavités de dimensions supérieures à un petit multiple de la longueur d'onde (plusieurs mètres), les méthodes d'acoustique géométriques sont les plus usitées pour décrire le comportement acoustique d'une salle à travers sa réponse impulsionnelle.

Il est à signaler que quel que soit la méthode utilisée pour décrire les réflexions, que ce soit en traçant un nombre fini de « rayons acoustiques » et en poursuivant chacune de leurs réflexions (méthode de tir de rayons) ou en représentant chaque réflexion par une source-image (méthode source-image), ces méthodes obéissent aux mêmes lois de l'optique géométrique. On peut donc réunir ces deux approches sous le terme "approche géométrique".

La méthode de tir de rayon emploie un grand nombre de particules émises dans diverses directions à partir du point source. Chaque particule desserrant de l'énergie à chaque réflexion, selon le coefficient d'absorption de la surface, aura une nouvelle direction de propagation qui est déterminé par la loi de Snell de l'optique géométrique. Ceci s'appelle une réflexion spéculaire [2].

Cette méthode présente quelques avantages à savoir sa capacité d'inclure les surfaces courbées aussi bien que les phénomènes de diffusion: en effet, ni l'un ni l'autre de ces derniers n'est possible avec la méthode de source-image (voir plus loin). L'autre avantage est que cette méthode est assez rapide et facile à mener.

La limitation principale de cette méthode est son inexactitude en représentant une «vraie» réponse impulsionnelle. En effet, il y a un risque que quelques réflexions seront rassemblées à partir des fausses réflexions alors que d'autres chemins de réflexion ne seront pas inclus [7].

La méthode de source-image ou de miroir est basée sur l'idée que tout rayon sonore réfléchi par une surface

planaire peut être considéré comme un rayon provenant d'une source fictive, qui est l'image de la source sonore originale constituée par un miroir (la surface planaire de réflexion). Le processus se poursuivra pour des réflexions évoluées dues aux images des images, et ainsi de suite. Le champ acoustique, dans la salle, peut être calculé en additionnant les contributions de toutes les sources - images de l'espace. Si la source sonore originale émet une impulsion de Dirac, le processus donnera la réponse impulsionnelle de la salle [7, 8].

Une manière d'introduire la nature ondulatoire du son dans les modèles géométriques est d'assigner un coefficient de diffusion à chaque surface ; de cette façon, la réflexion sur une surface peut être modifiée par le comportement : de spéculaire pur vers en un comportement plus ou moins diffuseur. Cela s'est avéré essentiel pour le développement des modèles qui peuvent donner des résultats plus fiables [9].

Après la constriction des sources-images, un processus de contrôle de visibilité doit être exécuté afin de vérifier s'il n'y a pas des chemins non valides entre la source et l'auditeur. Il est important de noter que la visibilité des sources-images ne dépend pas seulement de la position de l'auditeur et que la visibilité de chaque source-image peut changer quand l'auditeur se déplace [7].

4.4 Méthodes hybrides

En raison des limitations inhérentes dans les méthodes de tir de rayon et de source-image citées plus haut, des modèles hybrides ont été développés pour optimiser et incorporer les caractéristiques positives de chacune de ces deux méthodes. Les méthodes hybrides peuvent contenir des modifications sur les méthodes générales (par exemple, on utilise des cônes, des faisceaux ou des pyramides à la place des rayons dans la technique de tracé de rayons). Les méthodes hybrides sont habituellement optimisées pour accélérer le calcul sans perte significative d'exactitude. Dans ce cas, les réflexions précoces sont en général déterminées par la méthode de source-image à cause de son exactitude pour trouver les chemins de réflexion [7, 9].

En tenant compte que le nombre de sources d'image se développe exponentiellement en fonction de l'ordre des réflexions [8], il est inefficace d'utiliser la méthode de source-image pour trouver les réflexions d'ordre élevé. Ces réflexions d'ordre élevé, sont, en général, manipulées avec la technique de tir de rayons.

La majorité des algorithmes hybrides incluent un test de visibilité en utilisant la méthode de tracé de rayon pour déterminer les sources valides.

5 Exemples de simulation

5.1 Salle de cours simple

Afin de donner une idée sur la puissance des logiciels de simulation acoustique des salles, qui combinent les meilleurs dispositifs des modèles de source d'image et des méthodes de tir de rayon, on propose ici le cas d'une salle simple avec sept surfaces pour servir tout simplement de modèle de référence. Dans cet exemple tous les détails de conception ont été négligés.

L'implantation de la géométrie de la salle ainsi que le calcul des paramètres acoustiques selon la norme ISO 3382 peuvent être effectués avec la plupart des logiciels de

simulation acoustique des salles (ODEON, CATT, EASE, ...etc.). Les 9 paramètres acoustiques connus T30, EDT, D50, C80, TS, G, LF, LFC, IACC d'une salle peuvent être calculés dans 6 bandes d'octave.

La table 1 suivante donne les coordonnées des angles, des sources et des récepteurs dans la salle prise comme exemple, voir figure 3.

Angles (coins)	x	y	z
1	4,22	0	0
2	4,22	9,74	0
3	-4,22	8,86	0
4	-4,22	0	0
5	1,54	9,74	0
6	4,22	0	5,23
7	4,22	0	5,23
8	5,23	9,74	5,23
9	-4,22	8,86	5,23
10	-4,22	0	5,23
Sources			
A0	1,5	3,5	1,5
A1	-1,5	5,5	1,5
Récepteurs			
01	-2	3	1,2
02	2	6	1,2
03	0	7,5	1,2

Table 1 : les coordonnées des angles, des source et des récepteurs

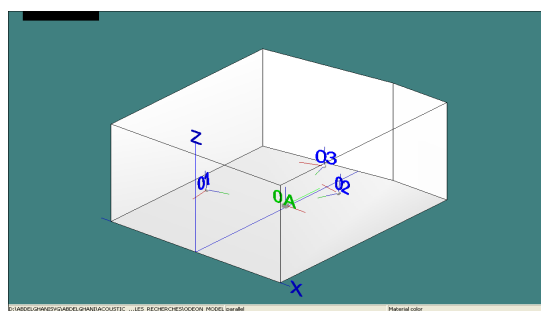


Figure 3 : vue en 3d de la position de la source et de récepteurs

Calcul des paramètres

La figure 4 représente la distribution temporelle de toutes les réflexions (complete echogram) et celle précoce (Early echogram) reçues respectivement par le récepteur 01, pour la bande d'octave centrée en 1kHz.

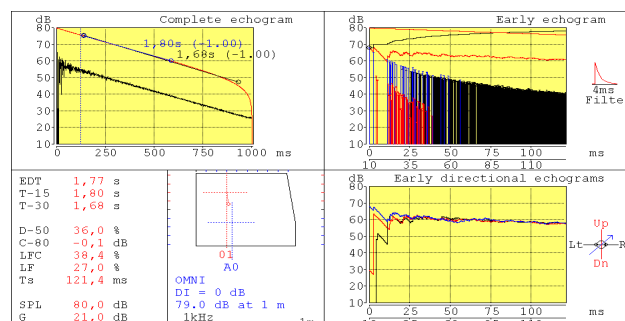


Figure 4: Echogram au niveau du récepteur 01 pour la bande centrée en 1kHz.

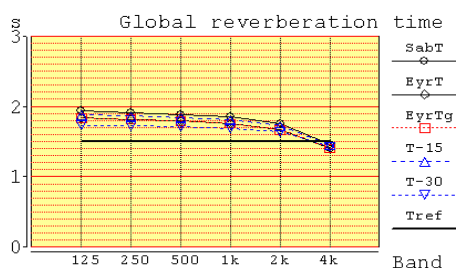
Temps de réverbération

CATT peut calculer cinq temps de réverbération : SabT, EyrT, EyrTg, T-15, T-30, voir figure 5. SabT est seulement valide pour des salles fermées avec faible absorption. T-15

et T-30 sont calculés à partir de courbes d'affaiblissement dans les intervalles -5 à -20 dB et de -5 à -35 dB respectivement. T-30 est considéré comme la meilleure évaluation du temps de réverbération (si T-30 ne peut pas être évalué dans un echogram trop court T-15 est employé à sa place) [10]. Tref est la durée de réverbération de référence choisie par l'utilisateur comme une référence de comparaison.

Intelligibilité RASTI

L'intelligibilité de la parole dépend, en ce qui concerne le milieu de propagation, principalement de deux paramètres, à savoir l'émergence du signal (la parole) sur le bruit de fond et le temps de réverbération. La figure 6 présente la variation de RASTI dans la salle.



	125	250	500	1k	2k	4k
EyrT	1,83	1,81	1,79	1,75	1,67	1,40
EyrTg	1,83	1,81	1,79	1,75	1,67	1,40
SabT	1,93	1,92	1,89	1,85	1,75	1,46
T-15	1,87	1,86	1,84	1,80	1,72	1,45
T-30	1,73	1,72	1,71	1,69	1,63	1,42
Tref	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50

Figure 5: Temps de réverbération

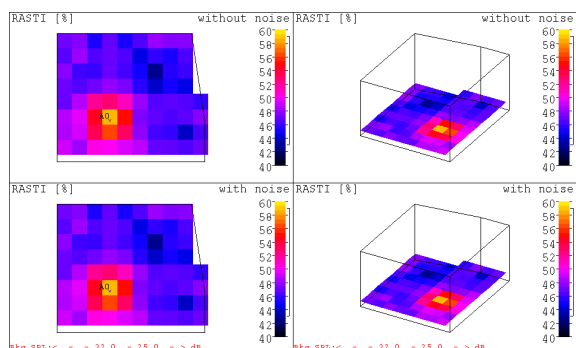


Figure 6: Variation de RASTI dans la salle.

Remarques

A partir des résultats de simulation nous remarquons que cette salle (de volume 416 m³) est caractérisée par :

- une durée de réverbération élevée, de l'ordre de 1,8 à 500 Hz. La valeur optimale est de l'ordre de 0,6 s [2].
- index de transmission de parole RASTI bas (0,47). La valeur optimale est entre 0,6 et 1.
- Définition D est de l'ordre de 34% (moyenne [2]),
- Clarté C80 (-0,3 dB) optimale entre -5 et +3 dB [2],
- Temps central Ts de l'ordre de 124,2 ms, la valeur de référence est inférieure ou égale à 80 ms [2].
- Force de signal G à 10 m, est de 20 dB.

5.2 Auditorium

La géométrie de l'auditorium est présentée dans la figure 7. Les propriétés des surfaces intérieures de l'auditorium sont présentées dans le tableau 3. La nature et

les coordonnées des sources sont présentées dans la figure 8 et le tableau 4.

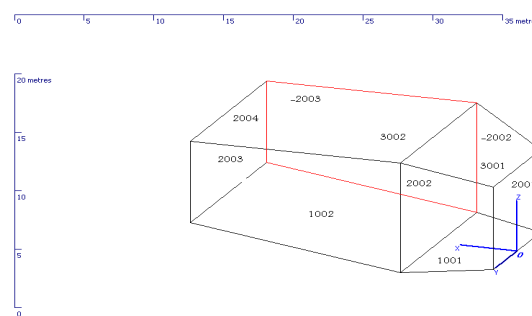


Figure 7: géométrie de l'auditorium

Surface	1001	1002	2001	-2002 2002	-2003 2003	2004	3001	3002
Superficie (m ²)	78	259,256	75	58,697	139,52	119,04	84,5	256
Matériau (base de donnée ODEON)	11001	11005	4042	4042	4042	4042	4042	4042
Coefficient de diffusion	0.7	0.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Table 2 : Les propriétés des surfaces intérieures

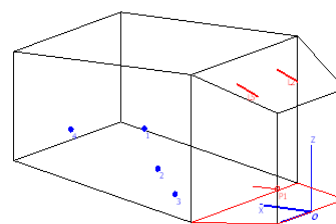


Figure 8: la position de sources (en rouge) et de récepteurs (en bleu).

Source	type	x	y	z
1	Ponctuelle Gain 65 dB	3	0	1,2
2	Linéaire (longueur 2m), gain 65 dB, Elévation 20° azimuth 0°	3	-3	8
3	Linéaire (longueur 2m), gain 65 dB, Elévation 20° azimuth 0°	3	3	8

Table 3 : type et position de source

Estimation rapide

A partir des propriétés acoustiques des matériaux ainsi que de leur surface, ODEON peut donner une estimation rapide de la durée de réverbération [11]. Cet outil s'avère très utile pour évaluer rapidement l'effet de différents matériaux sur le temps de réverbération. Mais, il est à signaler que ces méthodes ne sont pas exactes dans le cas de distribution irrégulière des absorbants ou dans le cas des locaux couplés.

Évaluation globale

C'est une méthode plus fiable pour le calcul des d'énergies, et de la durée de réverbération (figure 9).

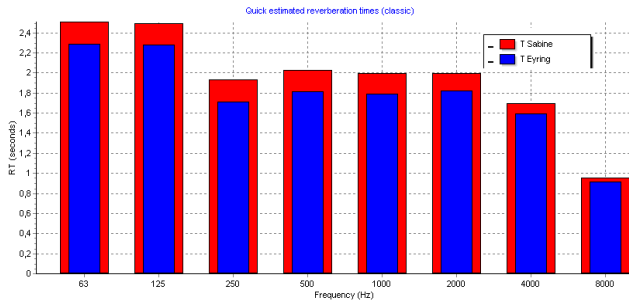


Figure 9 : Estimation rapide de la durée de réverbération

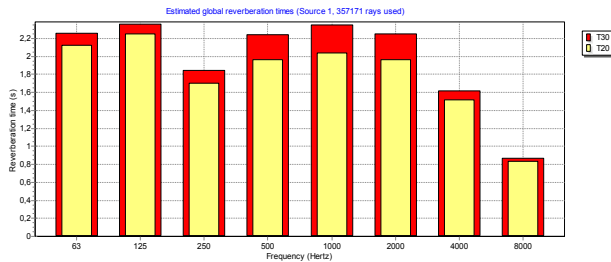


Figure 10 : durées de réverbération T30 et T20

La durée de réverbération du local est de l'ordre de 2,4 s à 500 Hz. Pour une activité basée sur la communication orale cette valeur est élevée (valeur conseillée entre 0,6 et 1s). Cette valeur peut être considérée acceptable pour la musique. L'indice de transmission de la parole STI est correct (valeur moyenne de l'ordre de 0,54), voir figure 11.

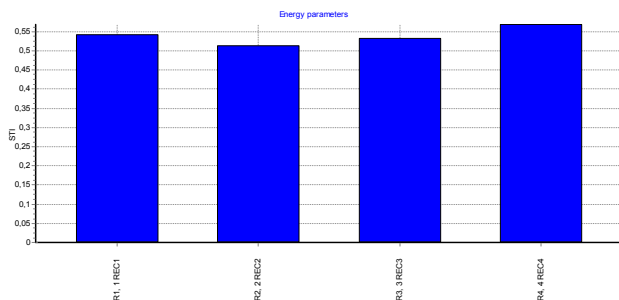


Figure 11: STI aux différents points de réception

5.3 Auditorium avec correction

Dans cet exemple nous essayons de réduire la durée de réverbération par la couverture de murs latéraux de l'assistance (2003 et -2003) par exemple par des matériaux absorbants (velours lourd).

Afin de renforcer le niveau sonore dans les zones les plus défavorisées (loin de sources) et améliorer l'homogénéité de la répartition du niveau sonore, nous envisageons l'installation de deux sources linéaires identiques aux deux premières déjà existantes.

Les résultats de calcul de la durée de réverbération ainsi que l'indice de transmission de la parole sont présentés dans les figures 12 et 13 respectivement.

L'auralisation se produit quand des effets acoustiques ou des signaux sonores sont transformés en résultat audible. Lorsque le signal binaural est présenté à l'auditeur sur un casque, il donne l'impression de l'acoustique en trois dimensions à une position particulière dans la salle. Ce qui est exactement ce que nous donnent ODEON et CATT par exemple.

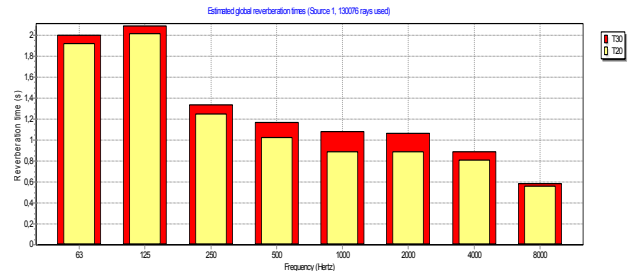


Figure 12: durée de réverbération

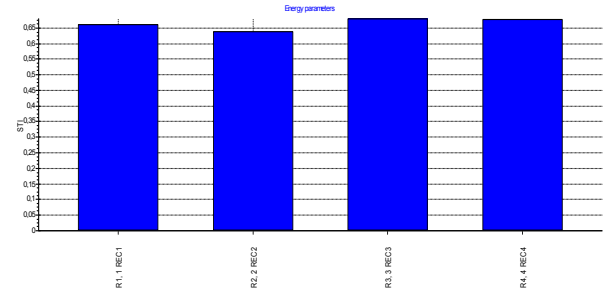


Figure 13: l'indice de transmission de parole

6 Conclusion

Ce travail avait pour objet de présenter les différents paramètres et les approches utilisées pour évaluer le comportement acoustique des salles. Des exemples ont été exécutés sur deux environnements de simulation afin de calculer les paramètres utiles pour une évaluation précise de la qualité acoustique d'une salle.

Références

- [1] T. Rossing Handbook of Acoustics, (Ed) Springer 2007.
- [2] Kuttruff, H.. Room Acoustics. Elsevier Applied Science (2000).
- [3] W.C. Sabine, Collected Papers on Acoustics. Peninsula Publishing, Los Altos, CA USA.(1992).
- [4] L. Beranek, Concert hall and opera houses, Springer Verlag, (2004).
- [5] Y. Ando, Concert hall acoustics, Springer, Berlin (1985).
- [6] Peter Damaske, Acoustics and Hearing, Springer 2008.
- [7] ISO 3382, ISO 3382, Acoustique - Mesurage de la durée de réverbération des salles en référence à d'autres paramètres acoustiques, 1997.
- [8] L. Savioja, Modeling Technique for virtual Acoustics, Helsinki University of technology, 2000.
- [9] J. H. Rindel, The Use of Computer Modeling in Room Acoustics, *J. Vibroeng.* N°3(4) / Index 41-72, (2000).
- [10] M. Vorländer, Auralization Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality, first edition, Springer 2008.
- [11] CATT-Acoustic v8, User's Manual, Room Acoustics Prediction and Desktop Auralization 2002.
- [12] ODEON Room Acoustics Program, Version 10.0, User manual. 2009.