

Paris 6 – EAPVS

Rapport d'Acoustique des Salles :

Etude de l'Acoustique de l'Auditorium de la Cité de la Musique

Benoit Cavelier
Alexandre Covinhes
Nicolas Perruchon

Année 2005-2006

Sommaire

Introduction

Programme de la Cité de la musique

Évolution du programme

La salle de concert

Une salle à Géométrie et Acoustique Variables

Analyse acoustique de la salle des concerts

Analyse de la salle avec l'acoustique géométrique

Analyse de la salle avec l'acoustique ondulatoire

Analyse de la salle avec l'acoustique statistique

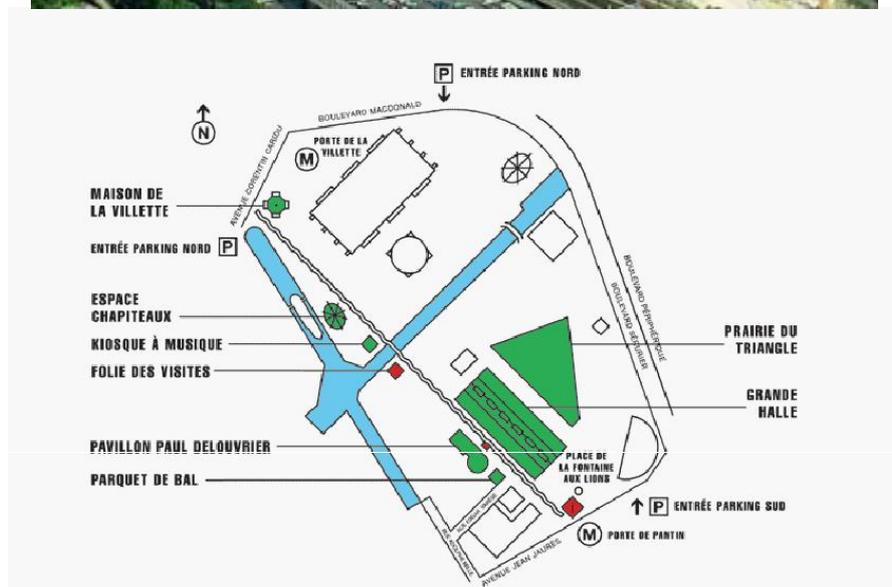
Conclusion

INTRODUCTION

L'aménagement du parc de la Villette fait partie des grands projets d'urbanisme et d'architecture qui ont été planifiés par François Mitterrand sous sa présidence.

L'objectif de cette opération était de créer dans le nord-est parisien un centre vivant et attractif d'activités et d'échanges culturels de dimension internationale.

En 1979, l'État crée l'Établissement Public du Parc de la Villette (EPPV) et lui confie l'aménagement sur le site d'un musée des sciences et des techniques, d'un parc urbain et d'un ensemble d'équipements pour la pratique et la diffusion de la musique.



En 1983, sur la base de consultations de très nombreuses personnalités du monde musical en France et à l'étranger, le programme de la Cité de la Musique est défini. Ce programme prévoit d'une part l'aménagement du nouveau Conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris, trop à l'étroit dans ses locaux de la rue de Madrid, et d'autre part un ensemble de trois salles de concert d'une capacité respective de 2700, 1000 et de 200 à 500 places, ainsi que leurs équipements annexes.

En 1984, pour des raisons budgétaires, la réalisation de la plus grande salle est différée, et il est décidé de ne réaliser dans un premier temps que les deux autres salles, leur capacité étant fixée entre 800 et 1200 places pour la première et 250 pour la seconde.

Sur la base de ce programme, le concours d'architecture est alors lancé. Christian de Portzamparc est désigné lauréat en Janvier 1985.



Programme de la Cité de la musique

Le Conservatoire national supérieur de musique de Paris a été installé en 1911 par Gabriel Fauré dans des locaux situés rue de Madrid. Ces locaux accueillant 1200 élèves ainsi que le musée instrumental sont devenus inappropriés et insuffisants pour une telle institution eu égard à l'évolution de la vie musicale et au manque d'espace pour exposer les pièces du musée, entreposées dans des caves et laissées à l'abandon.

Pour moderniser le Conservatoire, souhait de la majorité des musiciens professionnels de renommée internationale tels que Pierre Boulez, il était nécessaire de construire un outil correspondant aux besoins actuels :

- permettre aux jeunes artistes d'acquérir des connaissances historiques et culturelles plus vastes, d'aborder et de mieux maîtriser des répertoires plus larges
- placer les élèves dans les conditions professionnelles que requiert l'exercice de leur art en les confrontant au public
- développer les pratiques collectives dans des espaces adaptés en terme d'acoustique et de volume
- conforter le secteur de la création par l'apport des technologies contemporaines
- ouvrir l'éventail des disciplines et offrir la meilleure formation aux métiers de la musique, de l'art lyrique et de la danse.



Évolution du programme

La Cité de la musique est implantée dans la partie sud du Parc de la Villette, le long de l'avenue Jean Jaurès.

D'emblée, il est demandé de constituer la Cité en deux ailes, de part et d'autre de la Fontaine aux Lions. Cette division devra créer une place.

Les bâtiments situés dans la partie ouest de la place constituent le Conservatoire. Le programme précis défini dès le départ a permis la réalisation du projet à partir de 1986. Les travaux ont été réceptionnés en 1990 (soit une durée de travaux de quatre ans).

En revanche, la partie est de la Cité a connue une élaboration progressive du programme, notamment pour ce qui concerne les espaces prévus initialement pour accueillir la collection d'instruments du Conservatoire.

Ces espaces ont progressivement évolué vers un véritable musée de la musique, et le projet a entièrement été remanié en 1991 et 1992, après que l'architecte Frank Hammoutène ait été choisi sur concours pour réaliser les aménagements intérieurs.

La partie-Est de la Cité de la musique a été inaugurée en 1996, après de nombreux aléas de chantier.

Le projet tel qu'il a été réalisé dans sa totalité est constitué par les éléments suivants :

- Lieux d'enseignement ouverts au public :
Trois salles de classes permettent d'accueillir respectivement de 250 à 400 spectateurs
- Locaux d'enseignement théorique et instrumental :
46 salles de 40 à 50 m² aux traitements acoustiques diversifiés selon les disciplines
- Infrastructure pédagogique comprenant :
Médiathèque
Centre audiovisuel
Gymnase
- Espaces de vie collectifs :

- Cafétéria
- Accueil-foyer
- Logements étudiants (139 studios)
- Institut de pédagogie musicale :
 - Destiné à l'enseignement scolaire
- Musée de la musique :
 - Expositions permanentes et temporaires
 - Salle de concerts
 - Centre de recherche et de restauration d'instruments
 - Centre de documentation organologique
- Salle de concert et ses annexes :
 - Capacité de 800 à 1200 places, destinée à être utilisée par le Conservatoire et par l'ensemble Inter-contemporain de Pierre Boulez, qui y a son siège
 - Annexes : aire de transit, vestiaires, loges, deux salles de répétition

La salle de concert

Le programme initial de la salle se limitait à une modularité géométrique permettant différentes dispositions spatiales des spectateurs et des interprètes (configuration classique à l'italienne, musiciens au centre du parterre, orchestre réparti dans l'ensemble du volume), la capacité d'accueil pouvant varier selon les dispositions de 800 à 1200 places.

La volonté de pouvoir auditionner tous types de musique a fait ultérieurement rechercher une modularité dans l'acoustique de la salle.

Christian de Portzamparc a conçu cette salle pendant la phase concours sans l'aide d'acousticiens. Ce n'est que plus tard que l'acoustique de la salle a été mise au point, notamment avec la participation de l'acousticien Daniel Commins, de l'IRCAM et du CSTB.

Une salle à Géométrie et Acoustique Variables

La configuration spatiale de l'espace scénique et de l'espace destiné aux spectateurs est complètement modulable pour offrir un riche panel de représentation possible : configuration classique à l'italienne, scène en position centrale, « orchestre éclaté » (notamment utilisé par Pierre Boulez, directeur de l'E.I.C., dans le cadre de ses compositions spatialisantes), configuration salle de projection, etc.

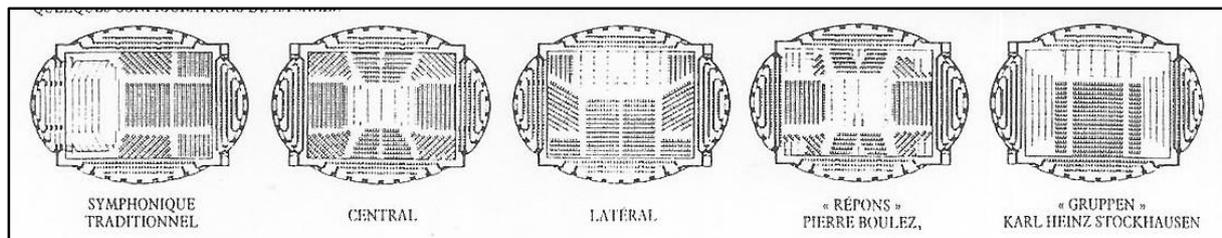


Configuration salle de projection



Configuration à l'italienne
(Courante)

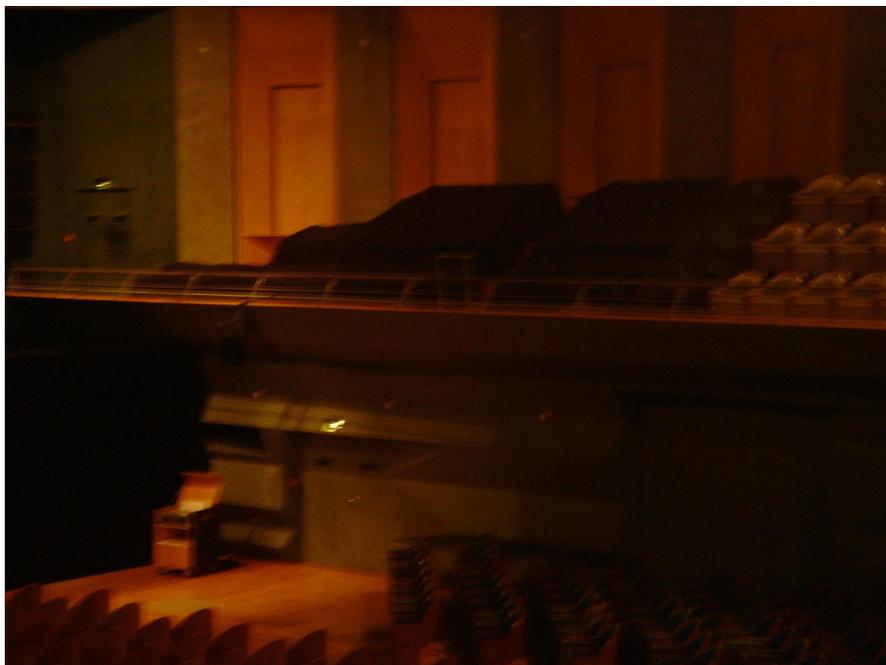
Quelques configurations de la salle :



Ces transformations sont facilitées par la disposition des sièges par groupes sur des podiums roulants. Et l'un des balcons est complètement escamotable pour se transformer en scène (disposition la plus souvent utilisée).

La salle est également modulable sur le plan de ses caractéristiques acoustiques. Le plafond de la salle de concert est motorisé et offre différentes surfaces d'absorption permettant ainsi de faire varier le temps de réverbération de la salle (dans le même principe que la salle de projection de l'IRCAM).

Enfin, pour les configurations nécessitant une absorption plus élevée, les techniciens ont recours à de grandes draperies absorbantes disposées au niveau des balcons ou recouvrant les sièges inoccupés par les spectateurs.



L'écart entre la configuration la plus absorbante et la plus réverbérante est de 2 à 3 dixième de secondes (1,5 à 1,7s).

Tr de références :

∅ Concert non amplifié : 1,7 à 1,9s (suivant le style)

∅ Concert amplifié/projection/cinéma : 0,4 à 0,6s.

Un temps de réverbération le plus faible possible est recommandé. En effet, avec les techniques actuelles de sonorisation, les professionnels du son gèrent tous les paramètres de réverbération, balances, etc. sur leurs consoles

∅ Opéra : 1 à 1,5s (suivant le style)

Le temps de réverbération doit être plus court que pour un concert non amplifié pour obtenir une compréhension optimale du chant ou de la parole. Le Tr est donc recommandé à hauteur d'une seconde.

Les musiciens apprécient vraiment les qualités acoustiques de cette salle de concert et sa polyvalence permettant une très large palette de styles musicaux de hautes qualités, répondant avec brio aux nouvelles exigences imposées par la musique contemporaine. L'aménagement de la salle a été suivi en outre par Pierre Boulez lui-même qui a préconisé cette modularité de la salle. Le seul véritable désagrément provient de l'équipement annexe de la salle de concert : aucune salle de répétition de grand volume, pour la scène aucun accessoire suspendu (absence de cintres), aucune séparation physique entre l'espace scénique

et le public, sans parler de l'espace tampon entre l'entrée en scène et les loges qui est une zone où circulent les Fenwick.

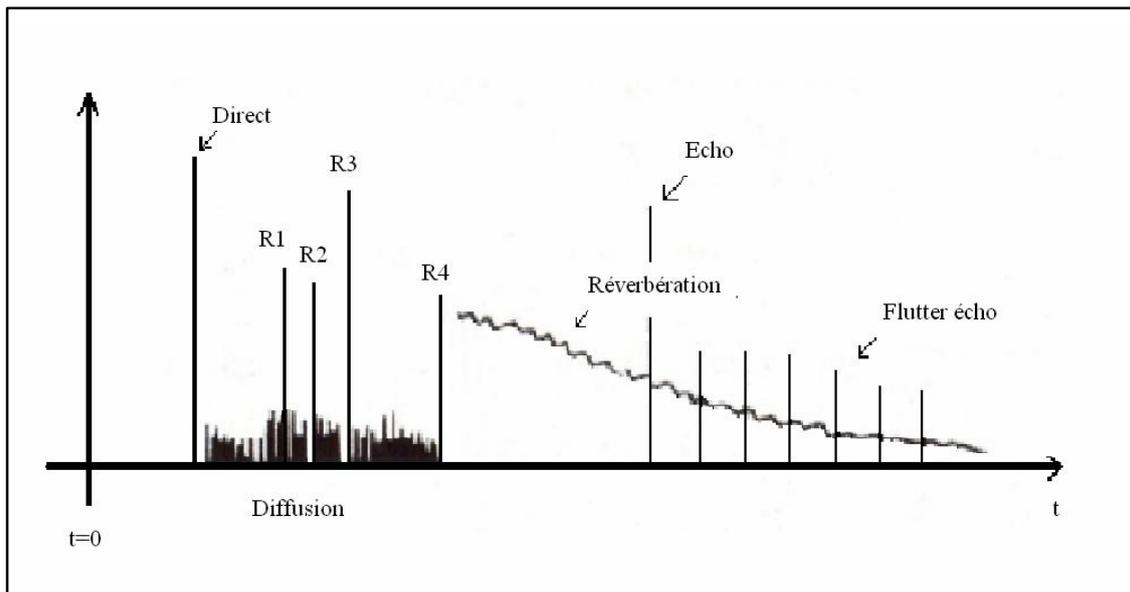
Sur le plan de l'espace destiné au public, les sièges sont disposés en quinconce pour une visibilité « optimale » des spectateurs en l'absence de pente au niveau du parterre.



Analyse acoustique de la salle des concerts

Lorsqu'un spectateur est situé dans une salle, les sons émis sur scène lui parviennent par des chemins acoustiques différents.

Tout d'abord, le son se propage de façon directe et atteint chacune de ses deux oreilles d'une façon qui dépend de la direction dans laquelle il voit les musiciens. Ensuite, il reçoit ce même son réfléchi (R1, R2, R3 et R4) une première fois sur les parois de la salle donc légèrement décalé dans le temps par rapport à l'onde directe et modifié du fait de l'absorption et de la diffusion des parois. Puis ce phénomène se reproduit un très grand nombre de fois jusqu'à ce que l'intensité sonore de ces contributions soit trop faible pour être perçue.



Il y a différentes façons d'aborder l'étude du comportement d'une salle où se propagent des ondes sonores :

- ü L'acoustique géométrique
- ü L'acoustique ondulatoire
- ü L'acoustique statistique

Analyse de la salle avec l'acoustique géométrique

L'acoustique géométrique est la partie de l'acoustique souvent utile car elle très intuitive, très visuelle et surtout très « parlante ». Ses grands principes et hypothèses sont issus d'une analogie avec l'optique géométrique. L'acoustique géométrique considère une réflexion spéculaire (selon la loi de Snell-Descartes : l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion), des rayons acoustique (par analogie aux rayons optique) qui se propagent en ligne droite et néglige les phénomènes de diffraction.

L'utilisation de cette technique suppose également que les dimensions des obstacles soient grandes devant les longueurs d'onde utilisées : elle reste donc valable pour les médiums et les aigus dont la longueur d'onde est considérée petite devant la dimension des obstacles.

Exemple :

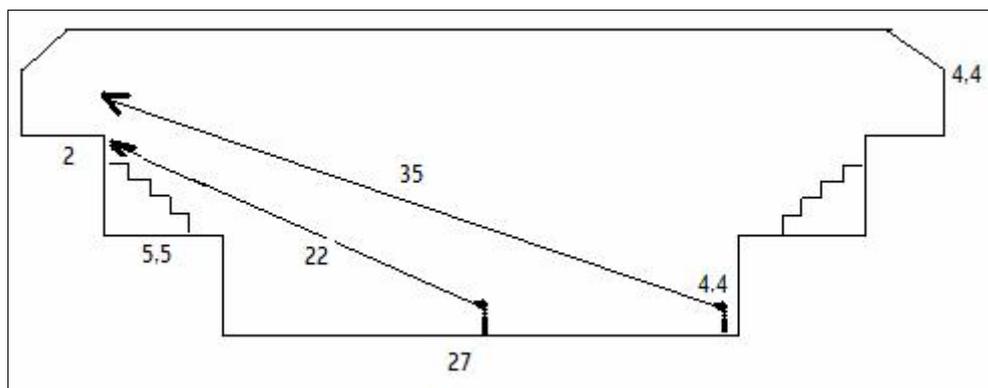
1000 Hz	longueur d'onde = 34 cm
8000 Hz	longueur d'onde = 4,25 cm

L'acoustique géométrique est en interaction directe avec l'architecture, car elle nécessite la comparaison des longueurs d'ondes aux dimensions de la salle et permet de repérer les formes focalisantes ou de soupçonner la présence d'écho. Son utilisation permet dans les phases préliminaires d'un projet d'éviter ce genre de phénomènes qui sont à proscrire pour une bonne qualité acoustique.

Analyse des dimensions de la salle :

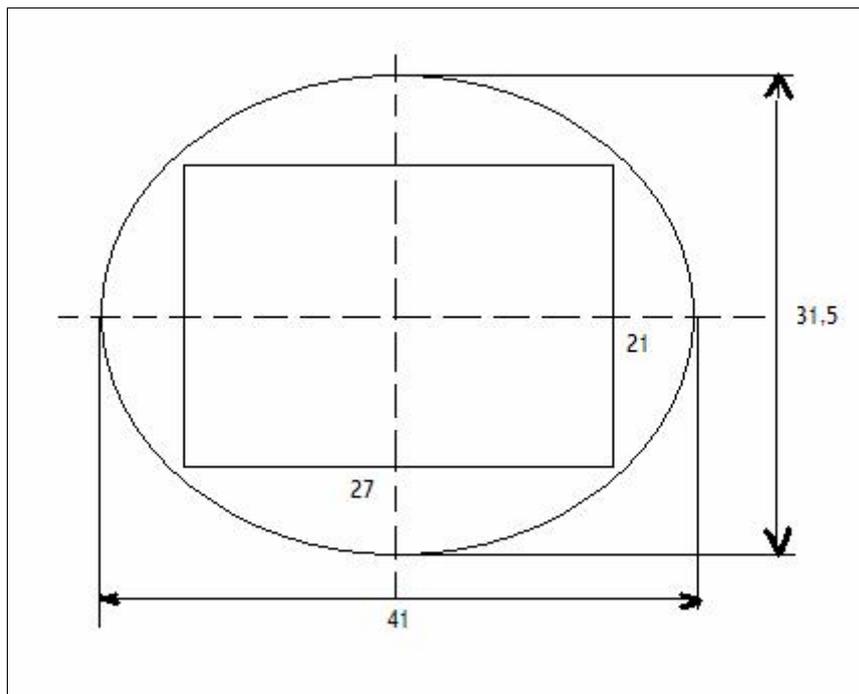
La salle des concerts possède un volume d'environ 12000 m³ et peut accueillir de 800 à 1200 personnes. Cela représente donc un volume de 10 m³ par personne, ce qui est convenable pour cette salle.

La disposition des 4 balcons autour du parterre central ainsi que la pente de l'escalier est suffisante et permet de rapprocher l'auditeur de la source sonore, et ainsi de conserver une bonne « force sonore » (critère mesurable qui est la différence entre le niveau de puissance d'une source et le niveau de pression dans la salle). Le siège le plus éloigné au balcon se situe à environ 22 m pour un orchestre en position centrale, ce qui assure une bonne force sonore. Les auditeurs de la galerie supérieure sont dans le cas le plus défavorable à environ 35 m de la source sonore. Toutefois on remarque l'inclinaison des parois juste derrière les auditeurs qui vont apporter les premières réflexions nécessaires pour renforcer le son direct.



Phénomène d'écho :

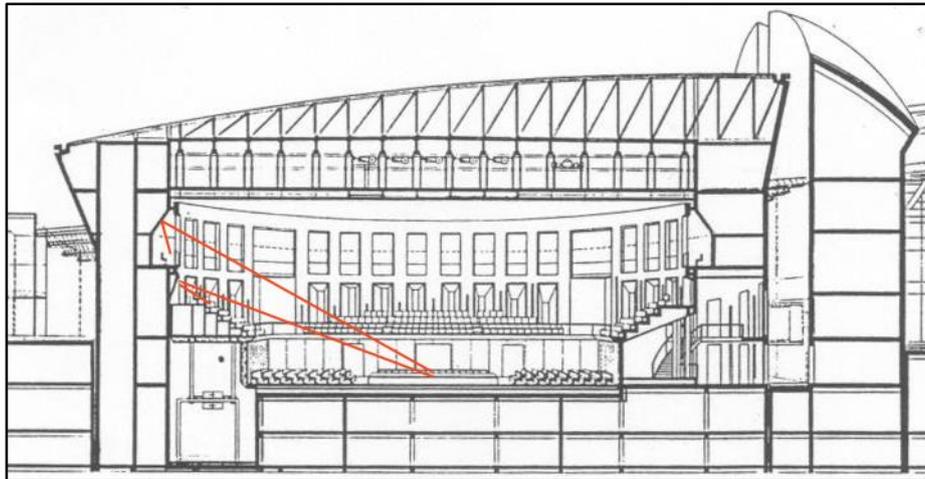
La présence d'écho est due à un retard entre le son direct et les premières réflexions. Pour une oreille exercée l'écho est perçu si le retard excède 66 ms, ce qui correspond à une dimension linéaire entre le point d'écoute et le point de première réflexion de 11 m. Donc pour des dimensions supérieures à 11 m entre le point d'écoute et le point de première réflexion il y a risque d'écho.



Pour l'ensemble des configurations, les sources sonores se situent sur le plateau rectangulaire de dimension 27 m par 21 m. La position pour laquelle l'orateur est le plus éloigné des 4 parois du plateau est la position centrale. A cette position il se situe à 10,5 m de la paroi correspondant à la longueur et à 13,5 m de celle correspondant à la largeur. On se situe dans les limites correspondant à l'apparition d'un écho à l'oreille du musicien (même remarque pour l'auditeur en position centrale).

Les parois inférieures assurant la qualité des premières réflexions du son leur parallélisme a été légèrement déformé pour éviter les phénomènes de résonance.

En ce qui concerne les auditeurs situés aux quatre balcons périphériques et à la galerie supérieure, les premières réflexions sont assurées par les niches creusées dans l'ellipse qui offrent des plans inclinés et peuvent ainsi rediriger l'onde sonore vers l'auditoire.

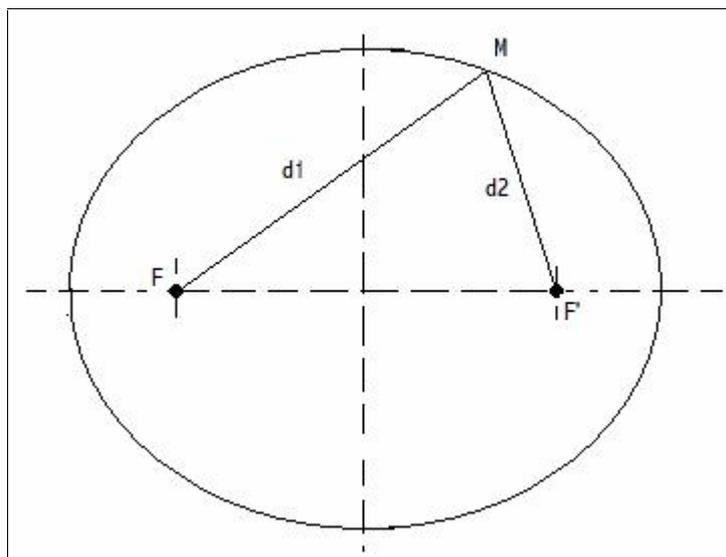


Coupe avec tracé de quelques rayons

Focalisation de l'onde sonore :

Définition de l'ellipse :

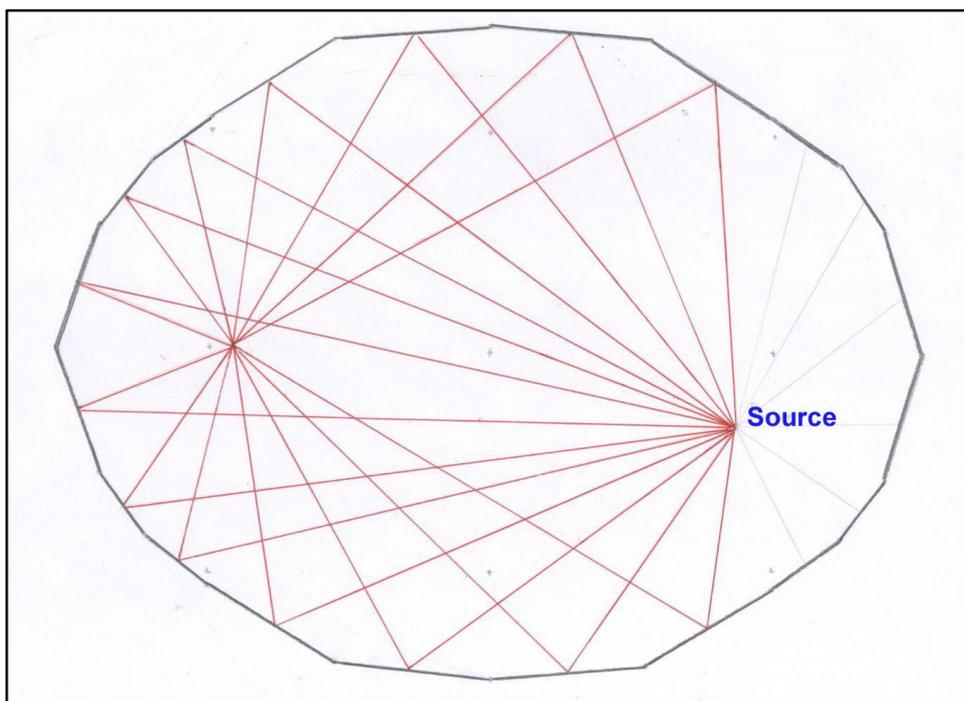
Une ellipse est le lieu géométrique des points M d'un plan dont la somme des distances d_1 et d_2 à deux points fixes de ce plan est une constante. Ces deux points fixes sont les foyers de l'ellipse. Ils sont désignés sur la figure 1 par les lettres F et F'. On utilise cette propriété pour tracer ce type de figure. En effet, si l'on place des épingles sur la surface du dessin à l'emplacement des deux foyers, et si l'on relie ces deux épingles par une ficelle de longueur $d_1 + d_2$, le déplacement d'un crayon gardant tendue la ficelle donne le tracé de l'ellipse.



Propriété de l'ellipse :

« Une ellipse a un centre de symétrie qui est le milieu de segment de droite joignant les foyers. Une ellipse est aussi symétrique par rapport à son grand axe, segment portant les deux foyers et limité à ses deux extrémités par la courbe. Elle est enfin symétrique par rapport à son petit axe, segment perpendiculaire au grand axe en son milieu. Dans un cercle, les deux foyers de l'ellipse coïncident ; le grand axe et le petit axe sont de même longueur. Une propriété intéressante de l'ellipse est la suivante : en chacun de ses points, la tangente est bissectrice de l'angle formé par les deux droites joignant ce point aux foyers. Cela explique, par exemple, certains phénomènes acoustiques produits par des voûtes en forme d'ellipse. »

Ces propriétés purement théoriques de l'ellipse confirment ce que l'acoustique géométrique permet de deviner « intuitivement ». En effet la forme générale de la salle s'apparente à une ellipse dont les parois sont irrégulières, ce qui nous permet de repérer grâce aux tracés de rayons deux « zones » de focalisation coïncidant avec les foyers de l'ellipse théorique. Ces zones se situent sur le tracé en plan aux deux extrémités du plan rectangulaire. Les auditeurs présents dans ces deux zones sont susceptibles de recevoir des niveaux de pression supérieure au reste de la salle.



Dessin ellipse (Mise en évidence de zone(s) de focalisation)

Analyse de la salle avec l'acoustique ondulatoire

Modes propres

L'acoustique ondulatoire est la partie de l'acoustique qui « tient compte de la réalité des choses » et en particulier qui met en évidence la présence de modes propres dans un espace fermé. Cette théorie considère la salle comme un oscillateur à 3 dimensions, et permet de comprendre la structure du champ acoustique dans le cas où la salle est parallélépipédique (modes propres). Cette méthode est limitée par la complexité de résolution des équations dans le cas de salles de formes quelconques.

Cette méthode est en interaction avec l'architecture dans le sens où la présence de modes propres est directement liée aux dimensions de la salle. Il existe le critère de Schroëder qui définit la fréquence en dessous de laquelle un mode propre émergera des autres modes et donc sera gênant pour l'auditoire. Cette fréquence s'exprime en fonction du temps de réverbération de la salle et de son volume :

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_r}{V}}$$

Donc pour un grand volume la fréquence de Schroëder sera basse et les modes propres passeront « inaperçu » à l'oreille de l'auditeur. Dans notre cas $V=12000 \text{ m}^3$ et $T_r = 1,6 \text{ s}$, d'où la fréquence de Schroëder : $f_s = 23 \text{ Hz}$

Les fréquences inférieures à 23 Hz sont inaudibles pour l'oreille humaine (bande audible allant de 50Hz à 20000Hz), ce qui ne posera aucun problème dans cette salle.

Analyse de la salle avec l'acoustique statistique

La théorie de l'acoustique statistique permet d'expliquer les phénomènes complexes de la théorie ondulatoire.

Elle suppose l'homogénéité du champ acoustique, la présence d'un champ acoustique diffus (en chaque point de l'espace toutes les directions de propagation sont équiprobables), et la propagation d'ondes planes.

Cette théorie et ces hypothèses ont permis au chercheur américain W.C. Sabine (1895) d'énoncer une formule liant à la fois la durée de réverbération, l'absorption du local et son volume.

Critères d'écoute d'une salle :

Critère d'intelligibilité :

Si on raisonne en terme d'écoute individuelle c'est le critère d'intelligibilité qu'il faut considérer. Ce dernier est défini comme le rapport du nombre de phrases comprises au nombre total de phrases prononcées.

Pour satisfaire à ce critère il est nécessaire d'avoir un T_r faible.

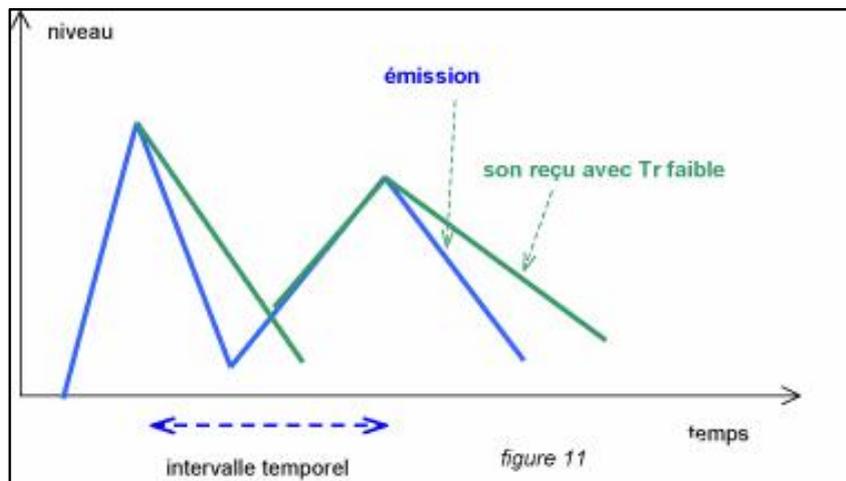


Figure 1: Intelligibilité pour un T_r faible

Avec un T_r faible, le 1er signal élémentaire émis "traîne" un peu, mais a déjà beaucoup diminué lorsque le 2ème est émis. On distingue bien les 2. L'intelligibilité du message est correcte.

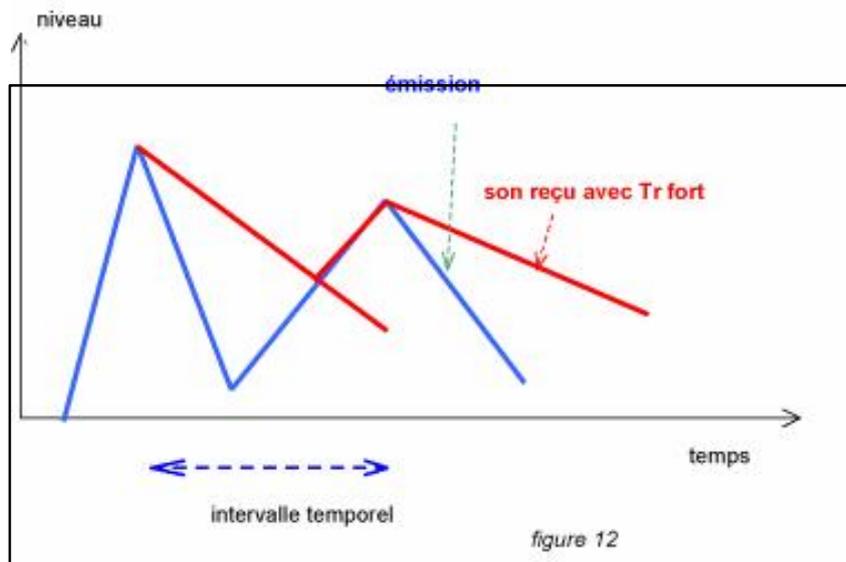


Figure 2: Intelligibilité pour un T_r fort

Avec un T_r élevé et le même intervalle temporel d'émission, on constate que le 1er a peu diminué lorsque le 2ème est émis : les 2 sons se mélangent, la distinction, donc la compréhension du message sonore, est plus difficile.

Critère d'homogénéité du son :

Dans une salle recevant du public on va faire en sorte que le message émis depuis une scène soit entendu de la même façon en tout point de la salle. Par opposition au critère d'intelligibilité on cherche à avoir un T_r élevé.

Pour obtenir un temps de réverbération élevé il faut privilégier les réflexions (limiter l'absorption).

Les réflexions vont permettre de renforcer le niveau sonore du champ réverbéré et ainsi de conserver une bonne homogénéité du son entre le devant et le fond de la salle.

Ci-dessous la figure nous montre bien la différence entre un T_r fort et faible. La première partie de la courbe correspond au champ direct et la seconde au champ réverbéré. Avec un T_r fort on constate que le niveau sonore du champ réverbéré reste élevé comparé au champ direct.

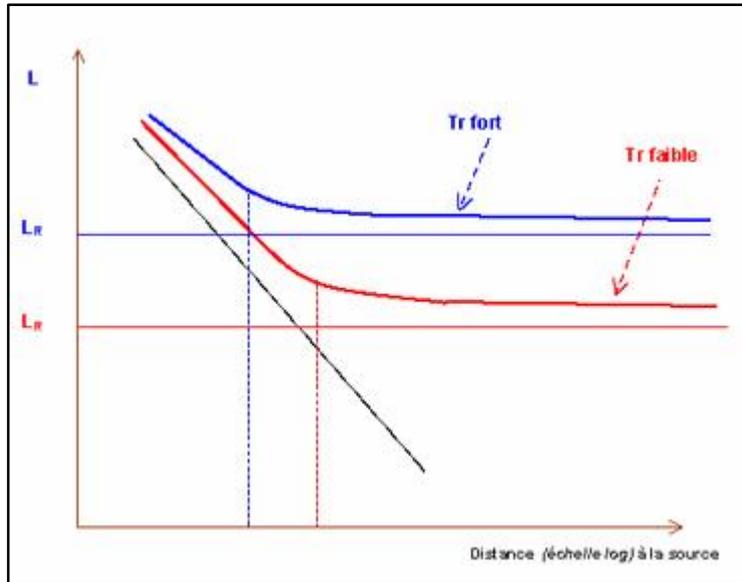


Figure 3: Influence du T_r sur l'homogénéité du son

En conclusion de ce paragraphe, on peut affirmer que pour avoir une bonne écoute il faut un temps de réverbération optimal. Les bons choix de compromis dépendent à la fois de la géométrie, notamment des dimensions de la salle, et de ce qu'on y écoute.

Durée de réverbération :

Quand, dans un local, l'émission d'un bruit cesse, on remarque que le bruit se réfléchit sur les parois pendant un certain temps. Cette traînée sonore est appelée durée de réverbération.

Elle est définie comme le temps mis par le son pour que son intensité diminue de 60 dB après interruption de la source sonore.

$$T_r = 0.16 \frac{V}{A}$$

où :

T_r : durée de réverbération, en secondes(s).

V : volume du local, en m^3 .

A : aire d'absorption équivalente du local, en m^2 .

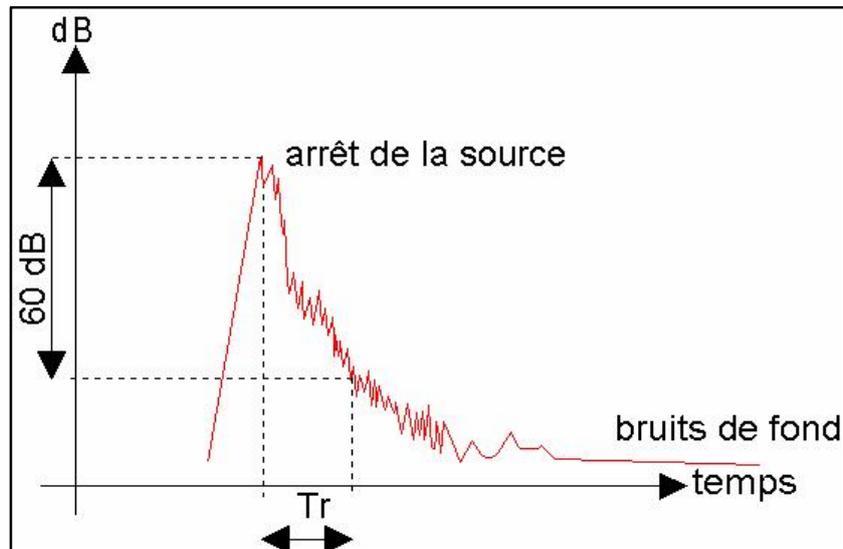


Figure 4: Temps de réverbération

Cette durée est d'autant plus longue que le volume du local est important et que les parois sont lisses et lourdes.

Analyse de la salle des concerts :

Volume= 12000 m³

Temps de réverbération = 1,6 s

Soit aire d'absorption équivalente = 1200 m²

Matériaux constitutifs de la salle :

Les éléments réfléchissants (tel que les parois en béton du parterre ou le plancher bois au sol) se situent en partie basse au plus près de la scène (source sonore) ceci afin de favoriser les premières réflexions.

Les éléments absorbants de la salle sont constitués en grande partie par les sièges, dont l'aire d'absorption équivalente est la même que celle d'une personne. Par conséquent la présence de spectateurs ne modifiera pas le comportement de la salle et ainsi la perception des musiciens en répétition sera identique à celle durant le concert.

De plus la salle possède une modularité acoustique obtenue d'une part grâce à des éléments orientables et motorisés situés en plafond, comportant une face absorbante d'un côté et une face réfléchissante de l'autre. D'autre part, des rideaux situés derrière la galerie supérieure peuvent être descendus et tirés sur l'ensemble de la circonférence de la salle pour absorber le son.

Cette modularité acoustique permettra de faire varier le temps de réverbération de la salle, et ainsi de s'adapter au type de musique jouée.

- ü Pour un concert sonorisé, on préférera un temps de réverbération plus court, par conséquent il faudra plus d'absorption (rideaux + plafond absorbant)

- ü Pour un concert symphonique (non sonorisé) on privilégiera des éléments plus réverbérant afin d'augmenter le temps de réverbération et de rendre la salle plus « vivante ».

Eléments contribuant au critère d'homogénéité du son :

Les niches au sein de l'ellipse, les cassures des parois du plan rectangulaire, la forme convexe du dos des sièges sont des éléments de la salle qui contribuent à diffuser le son dans toutes les directions.

Pour répondre au critère d'homogénéité il faut également que chaque auditeur soit à la même distance de la scène. La pente des sièges aux balcons aide à ne pas s'éloigner de la scène et la disposition en quinconce des sièges au parterre évite que la personne du rang de devant ne fasse office ni d'écran acoustique, ni d'écran visuel.

On note cependant qu'un compromis est nécessaire entre homogénéité du son (synonyme de temps de réverbération élevé), et intelligibilité du son (Tr faible), ce qui subjectivement paraît être concluant au vu de la bonne réputation de la salle des concerts de la Cité de la Musique.

Conclusion

L'analyse acoustique de l'Auditorium de la Cité de la Musique, montre qu'un juste compromis entre proportions de surface réfléchissante et surface absorbante est nécessaire pour répondre au mieux au critère de polyvalence de la salle.

Le caractère modulable de la salle (géométrique et acoustique), permet de réaliser cette « performance » qu'est la polyvalence. En effet, il est souvent compliqué d'adapter plusieurs styles musicaux à un même lieu, et le plus souvent il est préférable et moins coûteux de disposer de plusieurs lieux répondant chacun aux spécificités d'un seul style musical.

Actuellement le meilleur compromis possible semble avoir été trouvé, ce que est confirmé par l'engouement du public pour cette salle de concert.