

Conception des salles de concert

Sensibilisation à l'espace sonore et sa maîtrise

R. Essert (Arup Acoustics)

Pendant des années, les plans acoustiques des salles de concert répondaient presque exclusivement à un critère de temporalité du son. Pourtant, la propagation du son est fonction à la fois du temps et de l'espace. Notre audition et notre perception du son sont sensibles à des paramètres temporels, mais aussi spatiaux.

Cet article retrace l'évolution de l'acoustique architecturale dans la conception des salles de concert en cette fin de siècle, sous l'angle des progrès en matière d'acoustique et de techniques connexes. Il présente les tendances actuelles en matière de modélisation et de systèmes de mesure visant à mieux déterminer quels champs sonores spatiaux conviennent à un spectacle donné et le rôle de la géométrie de la salle.

1. Introduction

Au cours des vingt-cinq dernières années, nos connaissances sur les effets de la répartition spatiale des sons sur nos sens ont fait de rapides progrès. La propagation du son dans une salle est désormais perçue comme la modification des attributs spatiaux du champ sonore en fonction du temps, ou comme un changement de la réponse en fréquence ou temporelle de l'espace pour une entrée (et une sortie) donnée. Etant donné que la sonorité d'une

salle est une fonction du temps et de l'espace, les données peuvent être subdivisées de bien des manières afin de mieux comprendre le phénomène. Cet article porte principalement sur la *réponse impulsionnelle* d'une salle, c'est-à-dire la réponse à une entrée donnée. Il s'agit là d'une partie fondamentale de l'analyse préalable à la modélisation, la mesure et la maîtrise.

Soit une source sonore et un dispositif de réception ponctuels (une seule oreille) : la réponse de la salle est appelée *réponse impulsionnelle 3D* (3DIR). Ce phénomène, qui englobe les effets de directivité de la source et du récepteur, peut regrouper divers ordres de données qui donnent ensemble toutes les informations relatives à l'amplitude en fonction du délai et de la direction. La *réponse impulsionnelle binaurculaire d'une salle* (BRIR) permet de décrire les stimulus présents à nos deux oreilles. Cela suffit pour établir des modèles de perception mais non une relation explicite avec la directionnalité du signal. La réponse 3DIR comporte des informations relatives à la direction et par conséquent des éléments relatifs à la géométrie du local (l'architecture de l'espace).

Deux questions méritent d'être posées. *Quel est le nombre nécessaire et suffisant de :*

- a) *degré de liberté ?*
- b) *voies de données ?*

Le thème de la compression des données ne peut être abordé que si une réponse est apportée à ces questions. Si l'étude repose exclusivement sur les modèles fondés sur la perception et sur la mesure de la réponse impulsionnelle binaurculaire d'une salle, nous saurons quelle est la sonorité d'une salle, mais il sera impossible d'établir une corrélation entre son et architecture. Il faut connaître à la fois

Langue originale : anglais.
Traduction de l'UER.
Manuscrit reçu le 15/12/1997.



les modèles de perception et d'espace pour établir cette corrélation entre le champ acoustique et l'architecture, d'une part, et la perception de l'autre.

Les récents travaux traitant de l'aspect spatial des champs sonores s'appliquent à l'analyse et à la conception des salles de spectacles, et, parfois, y trouvent leur origine. Cet article propose un examen de certains aspects de l'acoustique spatiale, des mesures spatiales, de la modélisation et du rendu acoustique. Nous verrons aussi quels sont les champs spatiaux les mieux adaptés aux différents spectacles et l'influence de la forme géométrique.

La conception des salles de concert s'est progressivement adaptée aux connaissances accumulées en matière de distribution spatiale du son, mais dans une mesure insuffisante. Grâce à la compréhension des liens entre architecture et acoustique, nous arrivons aujourd'hui à mieux traduire nos objectifs acoustiques en forme de salles. En étudiant en détail la musique et les performances de la salle, nous comprenons quels objectifs conviennent à quels types de salles et à quelles utilisations.

2. Perception

Les connaissances en matière de perception sonore ont beaucoup évolué depuis l'époque où W.C. Sabine mesurait à l'oreille les temps de réverbération du Sanders Theatre [1]. Un grand bond en avant a eu lieu dans les années 70, quand Marshall [2] et Barron [3], ainsi que les groupes de Göttingen [4] et de Berlin, ont avancé l'hypothèse que la largeur des salles était déterminante pour notre perception de l'espace acoustique. Ils en déduisaient que l'énergie latérale était impliquée, position aujourd'hui communément admise. Les avis restent partagés quant à sa quantité et la façon dont elle se manifeste, mais nous comprenons maintenant que tous les aspects de la forme d'une salle (emplacements, formes et angles des surfaces périphériques) sont effectivement audibles.

Les travaux réalisés par Jens Blauert [5] et ses collègues sur l'audition spatiale nous ont beaucoup appris sur les mécanismes et l'origine de notre perception de l'espace et du timbre. Nos oreilles, notre tête et notre buste filtrent le son avant qu'il n'atteigne le nerf auditif, ce qui crée une différence entre oreilles en fonction de la fréquence. Le même mécanisme implique qu'il y ait un lien entre la perception du timbre (et le volume) d'un son et la direction dont il provient. Le cerveau applique un certain nombre de règles complexes pour décoder en groupe un ensemble d'ondes réfléchies de différentes directions.

Notre perception du *caractère enveloppant* du son vient de différences d'amplitude et de phase caractérisant les signaux sonores qui atteignent nos

oreilles. Ando [6] et d'autres ont considéré que le *coefficient de corrélation interauriculaire* (IACC) était le meilleur indicateur de la perception du caractère enveloppant du son. Griesinger [7] a lié la « couleur » de la salle aux fluctuations de l'amplitude et à l'asynchronie entre les deux oreilles.

Il semble que nous ayons une perception pluridimensionnelle de l'espace acoustique. Parmi nos différents critères de perception de la musique dans les salles de concert figurent ce qu'il convient d'appeler l'*élargissement de la source* et la *présence*. Ces deux paramètres dépendent respectivement d'un précurseur basse fréquence et d'un signal retardé de fréquence plus élevée. *Est-il possible de les maîtriser indépendamment grâce à l'architecture ? A l'électronique ? Est-ce une bonne chose ?* Les travaux de Keet [8] ont clairement montré que certains effets spatiaux dépendent du niveau d'ensemble du son, ou, dans la pratique, de la valeur absolue de l'énergie latérale. Personne ne conteste l'importance de ces aspects spatiaux (présence, etc.) dans l'acoustique musicale, mais il est plus difficile de se mettre d'accord sur leur *optimum s'il existe*. Si tel était le cas, il dépendrait sans doute du type de spectacle ou du répertoire musical qui, en dernière analyse, sont fonction des attentes des auditeurs et de la perspective historique.

Ce que nous entendons et ce que nous aimons doit s'étudier sur la base d'analyses pratiques et de modélisation. *Quel est le degré de précision nécessaire ?* Si l'on cherche à créer un modèle de tous les processus physiques et psycho/physiologiques avec la plus grande précision possible, le résultat pourrait bien être surévalué si toutes les dimensions ne sont pas perçues ou si le degré de précision voulu n'est pas atteint.

3. Mesure spatiale du son

Sabine mesurait la durée de décroissance à l'oreille et au chronomètre ! Depuis lors, l'acoustique des salles se mesure le plus souvent au moyen d'un microphone omnidirectionnel. Les premières mesures et analyses de la réponse impulsionnelle, ainsi que l'étude des rapports énergétiques datent des années 60 et 70. Elles ne portaient en général que sur des données d'un seul canal. Des microphones directionnels et des réflecteurs paraboliques étaient parfois utilisés pour obtenir des informations directionnelles.

Abréviations

3DIR	Réponse impulsionnelle 3D
BRIR	Rép. imp. binauriculaire d'une salle
HRTF	Fonction de transfert relative à la tête
IACC	Coeff. de corrélation interauriculaire
RT	Temps de réverbération



Sachant que le son latéral et la différence binaurculaire étaient des éléments importants de l'acoustique architecturale, Barron et ses collègues se sont lancés dans des mesures de la *fraction latérale*. Ando, quant à lui, est allé plus loin avec la *corrélation interauriculaire croisée* et la *réponse impulsionnelle binaurculaire d'une salle*. La fraction d'énergie latérale en un point donné fait l'objet de mesures dans les salles depuis un certain nombre d'années. Toutefois Bradley [9], Beranek [10] et leurs collègues ont obtenu des résultats dont la corrélation avec la perception laisse à désirer.

Pour les concepteurs de salles de concert et de théâtre, les informations relatives aux aspects spatiaux du champ sonore jettent un pont entre le son et l'architecture. Ils peuvent ainsi mieux comprendre quelles surfaces réfléchissent le son vers l'auditeur. Il faut de plus étudier les éléments directionnels des champs des salles de spectacle et les relier aux caractéristiques de la perception.

Nos objectifs actuels en matière de mesures 3D visent notamment :

- l'élaboration d'outils de diagnostic pour mieux comprendre l'évolution temporelle du comportement directionnel du champ acoustique ;
- la capacité à évaluer l'intégralité de la réponse impulsionnelle spatiale 3D, y compris la pression acoustique en fonction du temps et de la direction ;
- la capacité de classer les données en fonction du temps et de l'espace ;
- la définition de nouvelles méthodes de visualisation, y compris l'animation ;
- à inférer le rendu acoustique des réponses impulsionnelles mesurées, quelles que soient les « oreilles » utilisées pour les enregistrements ;
- la constitution d'une base de mesures 3D réalisées dans de nombreux locaux différents.

Plusieurs groupes de chercheurs, parmi lesquels Elko (Laboratoires Bell), Broadhurst et Hanyu & Kimura, ont élaboré de grands dispositifs à haute résolution directionnelle. Ceux-ci permettent d'obtenir une résolution spatiale élevée, mais sont volumineux et encombrants et dépendent de la précision d'alignement de nombreux éléments. Il reste toutefois que quatre canaux d'information suffisent en général pour rendre l'intégralité du champ spatial 3D, bien que la résolution spatiale en pâtit. Ces quatre canaux sont constitués de *trois vecteurs directionnels orthogonaux* et de la *pression totale*.

Plusieurs groupes ont élaboré des systèmes pour mesurer l'acoustique des salles à l'aide de quatre microphones à pression omnidirectionnels disposés en tétraèdre :

- Yamasaki et Itow
- Sekiguchi, Kimura & Hanyu
- Korenaga

Un autre groupe, Abdou et Guy, a élaboré une méthode d'intensité 3D.

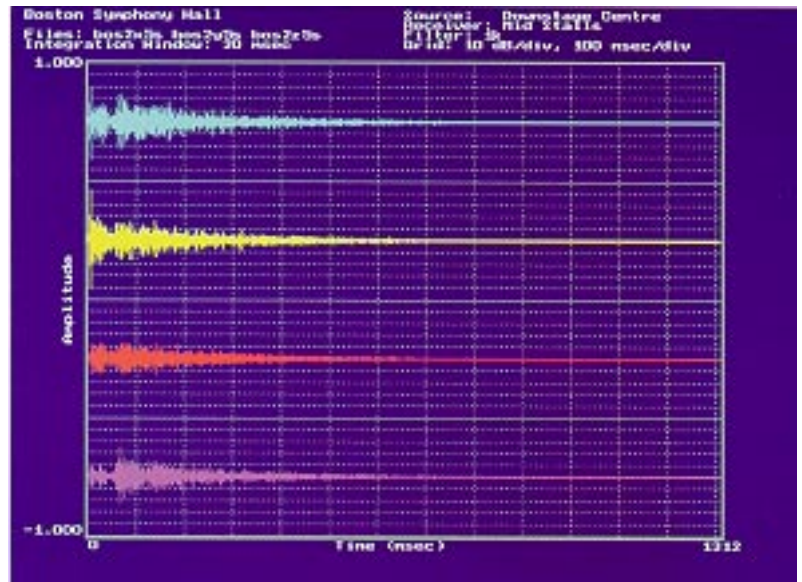


Figure 1
Sortie pression (quatre voies) en format B d'un microphone Soundfield. Mesure d'une impulsion (explosion d'un ballon), Boston Symphony Hall (vide), une salle étroite tout en hauteur et réverbérante. Numérisé sur 16 bits à 22.050 Hz. Les tracés sont : omni (W), x, y et z respectivement. La gamme verticale s'étend de -1 à +1.

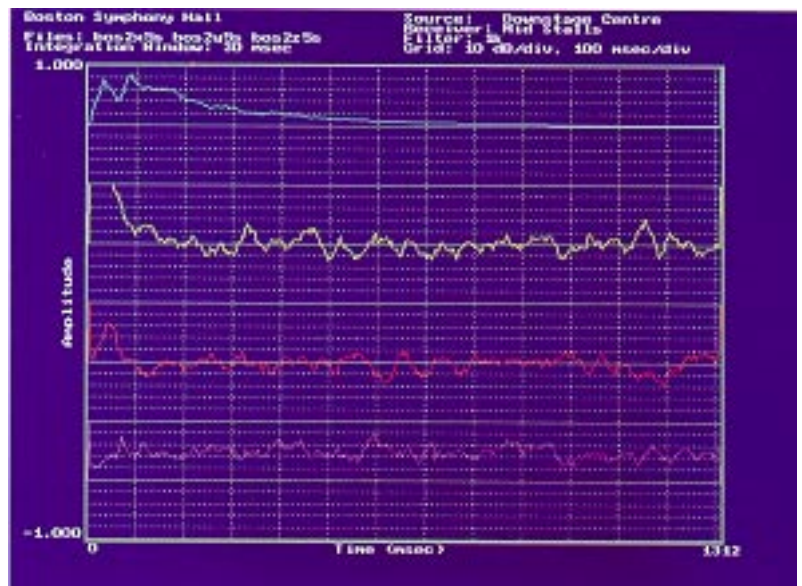


Figure 2
Fractions directionnelles lissées de la réponse quatre voies. Tracés (de haut en bas) : réponse en pression omni (W) lissée, rapports des diagrammes doublet au canal omni (F_x , F_y et F_z). Cette façon de faire conserve la polarité du signal de pression en sorte que F_x est la composante avant-arrière, F_y la gauche-droite et F_z la haut-bas. Pour tous les tracés la gamme verticale s'étend de -1 à +1.

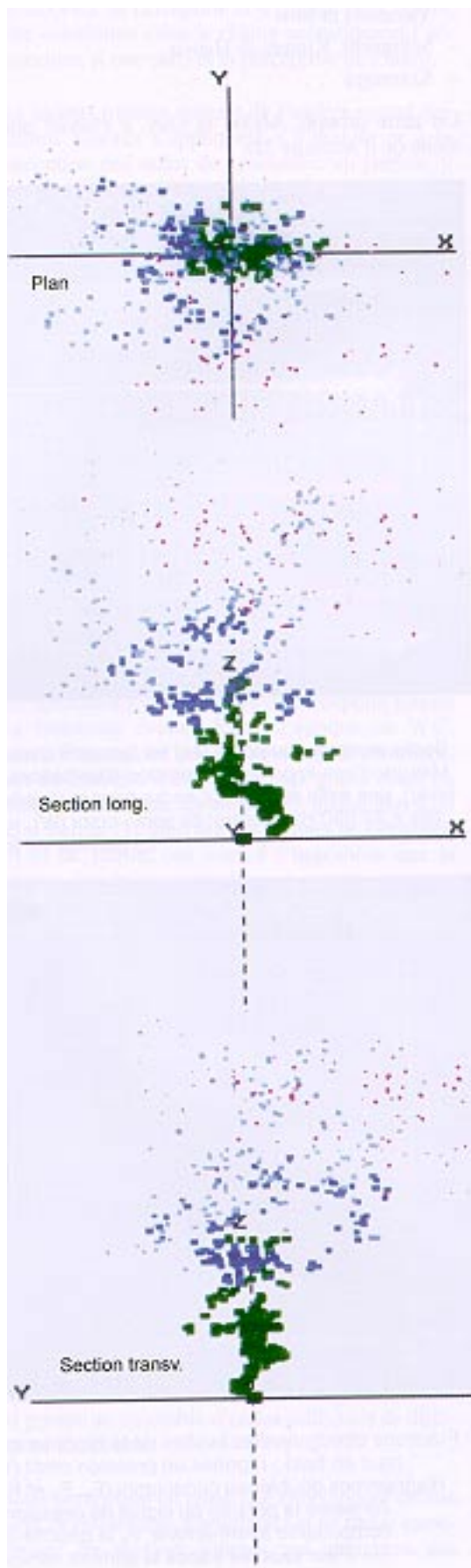


Figure 3
Distribution 3DIR
déduite des fractions
directionnelles.
Chacun des 512
points de l'un des
tracés de fraction est
relatif à une direction
dans un système de
coordonnées
cartésien 3D. La
distance par rapport
à l'axe correspond au
délai (total 1300 ms).
Une animation facilite
l'interprétation des
tracés.

Une méthode développée par l'auteur, utilisant le microphone Soundfield, a été lancée par Michael Gerzon et Duane Cooper dans les années 70. Ce dispositif est composé d'un tétraèdre resserré de quatre micros cardioïdes alignés dans le temps pour mesurer le son au centre du tétraèdre. Les quatre signaux sont combinés de façon à donner une réponse en gradient de pression (doublet, ou directivité « en huit ») en x, y, z et la réponse en pression omnidirectionnelle, W. Cette configuration de sortie a été baptisée *format B*.

L'auteur a utilisé une paire de microphones omni/doublets pour mesurer la fraction d'énergie latérale, puis a mis au point un mécanisme pour mettre en évidence la fraction latérale instantanée. En dirigeant le microphone doublet dans la direction x, y, z, il est possible de recueillir l'énergie fractionnelle dans les six quadrants. Comme les sorties format B du microphone Soundfield équivalent au microphone à gradient de pression à directivité cosinusoidale, on peut utiliser la même formule pour dériver les fractions de chaque direction x, y, z pour la réponse en pression commune W (*figure 1*).

Ce processus est un produit borné des canaux pression et gradient, normalisé par une moyenne glissante du canal de pression élevée au carré pour une courte fenêtre temporelle (δ), qui idéalement devrait être choisie en fonction de son importance pour la perception.

Les fractions directionnelles dans la direction x (avant-arrière) sont données par l'équation :

$$F_x(t) = \frac{\sum_{\tau=t-\frac{\delta}{2}}^{\tau=t+\frac{\delta}{2}} X(\tau) W(\tau)}{\sum_{\tau=t-\frac{\delta}{2}}^{\tau=t+\frac{\delta}{2}} W(\tau) W(\tau)}$$

où W(τ) représente la réponse en pression
x (τ) représente la réponse en gradient de
pression (directivité cosinusoidale).

Les fractions directionnelles lissées correspondant aux mêmes données apparaissent *figure 2*.

Les fractions x, y, z constituent l'occultation d'amplitude dans chaque direction en fonction de la pondération cosinusoidale du micro. Il est donc possible de considérer les trois fractions directionnelles comme des « cosinus directionnels » pour déterminer la direction générale d'un son qui en découle à un moment précis par rapport au récepteur (l'auditeur). Les résultats peuvent être reportés sur un axe 3D sous la forme d'un « nuage » d'énergie évoluant dans le temps (*figure 3*), ou d'une projection « Mercator » (*figure 4*).

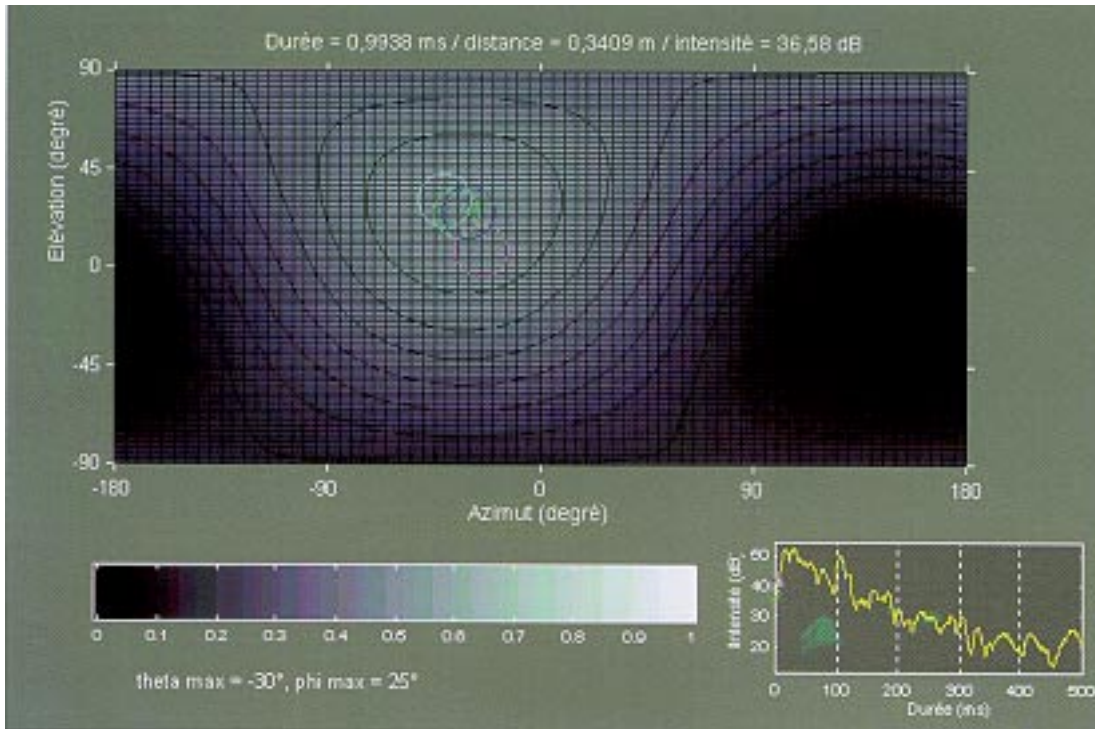


Figure 4
Visualisation de la distribution des amplitudes en fonction de la direction et du retard à l'intérieur d'une sphère en expansion par corrélation entre les fractions directionnelles et la matrice de directivité du microphone Soundfield trame par trame. Le tracé, une trame temporelle d'une telle corrélation (projection de Mercator), est réalisé avec une routine Matlab développée par Pierre-Antoine Grison. Les cercles représentent la dispersion de différentes valeurs incluses dans la fenêtre de lissage temporel. (Les données correspondent à la réponse impulsionnelle 3D d'un théâtre de taille modeste.)

4. Modélisation et perception auditive (rendu du son)

La modélisation acoustique et les techniques de synthèse de rendu ont permis de mieux comprendre les aspects spatiaux du son grâce à la visualisation 3D des trajets du son dans le modèle et à l'écoute du phénomène modélisé. Elles nous ont obligés à réfléchir à certains des aspects les plus pointus de l'architecture des salles et de l'environnement des sources, ainsi que de notre perception.

Le modèle acoustique habituellement utilisé lors de la conception architecturale d'un projet s'inspire des grands principes de l'acoustique géométrique, avec des aménagements ad hoc pour des phénomènes d'une certaine importance tels la diffraction sur les arrêtes, la diffusion et les coefficients d'absorption dans les angles obliques (figure 5).

La *synthèse de rendu*, entreprise terriblement complexe, est la réalisation des phénomènes modélisés. Une source sonore anéchoïde est filtrée par la réponse impulsionnelle de l'espace (calculée ou mesurée) et les effets de l'oreille, de la tête et des épaules (HRTF) dûment modélisés. Le son obtenu est reproduit par un casque ou un système de lecture à son ambiant de type Ambisonics. La synthèse de rendu permet d'entendre le phénomène dont l'évaluation résultait jusqu'à présent de comparaisons chiffrées ou de graphiques.

La directivité des instruments et de la voix influence sur la perception du timbre et du volume des instru-

ments (donc de l'équilibre des sons dans l'orchestre). Le « rayonnement » sonore d'un instrument répond à des règles fort complexes : la qualité du son varie suivant les directions. *Combien de directions faut-il pour réaliser un modèle ?* Les fabricants de haut-parleurs chiffrent à 10° la directivité des cornets qu'ils fabriquent, mais cela pourrait être assez excessif. La synthèse de rendu nous permettra d'évaluer la finesse de détail appropriée.

5. Evolution des salles

La conception des salles de concert s'est plus ou moins adaptée à l'état des connaissances en matière d'acoustique architecturale. Des formes de base se sont progressivement imposées pour chaque type de spectacle. Cette évolution n'était pas motivée par la connaissance d'un rapport liant la forme de la salle et le son, mais plutôt par la façon dont les individus se disposent naturellement (pour être proches et en ligne directe avec la source sonore), pour des raisons de capacité structurelle et enfin pour des raisons sociales.

Premiers facteurs considérés : la distance, le placement en ligne directe et la protection contre le bruit. La forme plane et la forte inclinaison des amphithéâtres grecs et romains à ciel ouvert rapprochaient le plus possible les spectateurs des artistes et la pente prononcée permettait de faire bénéficier les spectateurs d'une réflexion de premier ordre émanant du plancher et d'un écran pour les bruits de la rue. Ces structures dépourvues de toit étaient essentiellement des espaces bidimensionnels à deux paramètres : *la distance et l'angle d'inclinaison des gradins*. Les Grecs et les Romains cons-

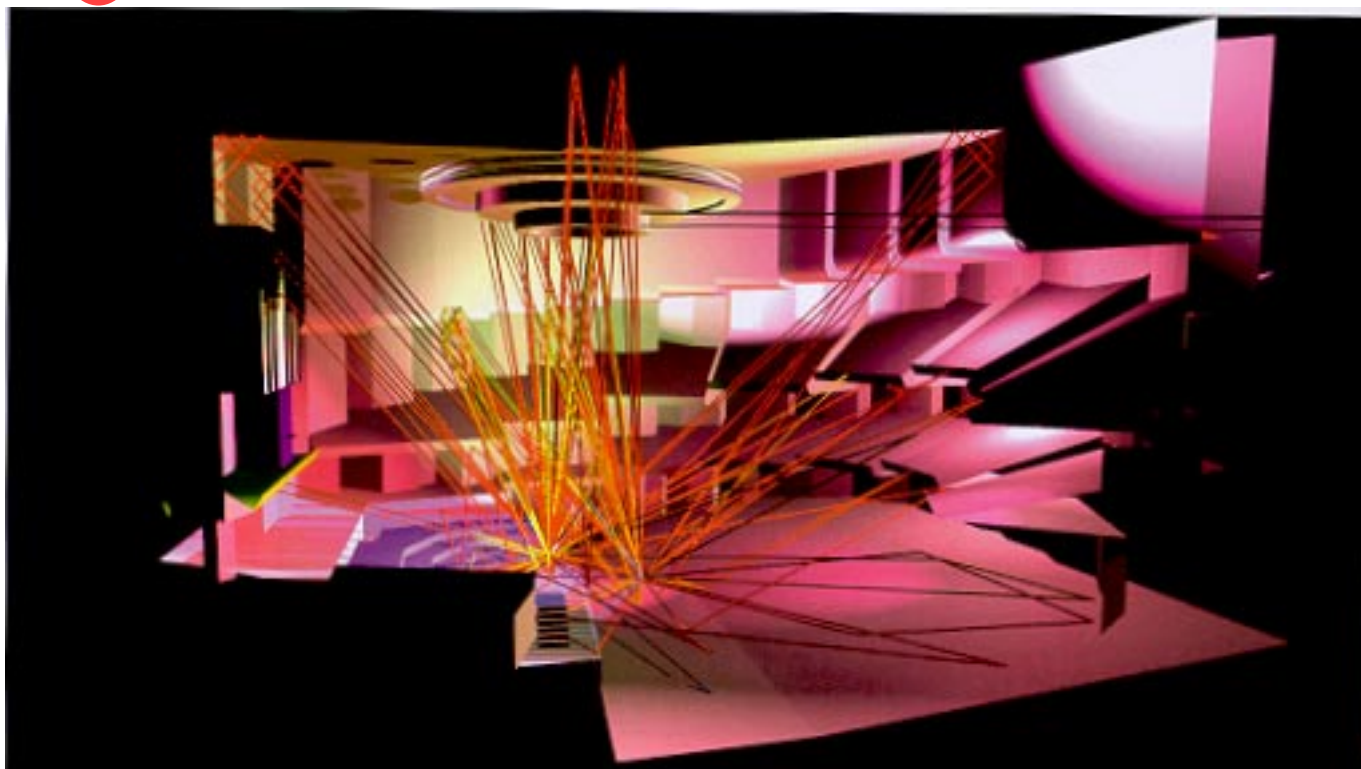


Figure 5
Un modèle informatique de salle de concert (vue éclatée) indique les trajets des réflexions primaires entre un exécutant sur scène et un spectateur assis face à la scène. Les traits de couleur correspondent à des réflexions jusqu'au 3^e ordre présentant un retard sur le son direct de 0 à 80 ms (cyan), 80 à 120 ms (jaune) et 120 à 240 ms (rouge).

truisaient aussi des théâtres couverts présentant les caractéristiques d'espaces tridimensionnels fermés. Difficile de dire si les anciens, y compris Vitruvius, connaissaient l'origine des différences acoustiques entre espaces couverts et ouverts. *Le volume sonore et la réverbération supérieurs rencontrés dans une salle couverte influent-ils sur la composition ou l'exécution des odes et des oratoires de l'époque ?*

Pendant une grande partie du Moyen Âge et de la Renaissance, les églises et les cathédrales ont pris de la hauteur et ce faisant ont présenté un plus grande réverbération. Dans ces bâtiments l'absorption du son se concentre au niveau du sol : les parties supérieures sont en majorité verticales, dures et rectilignes (excepté dans les dômes). Dans la partie élevée et dure, la réverbération est plus intense et prolongée que dans la partie inférieure, proche du public. Il s'agit de ce qu'on appelle un espace volumique à *faible couplage*. Dans les grandes églises, la réverbération donne le sentiment de monter progressivement.

La largeur des salles de musique et des salles de concert des XVIII^e et XIX^e siècles était encore limitée par la portée maximale des poutres treillis. Jusqu'au XIX^e siècle, la configuration était assez empirique et la forme en « boîte à chaussures » très répandue. La musique de l'époque était composée pour ce type de salles caractérisées par une forte réverbération, principalement latérale.

L'opéra s'est développé sur un terrain plus « sec » sur le plan acoustique. Le public était entassé à la verticale le long des murs, jusqu'au plafond. Toutefois, l'absence totale de réflexion n'était ni le but recherché, ni le but désiré. Pour le public comme pour les artistes, la beauté de la sonorité et une certaine perception du son renvoyé par la salle sont importants.

L'opéra chinois, caractéristique de tant d'arts orientaux du spectacle, est né en extérieur. Le volume interne de l'espace n'entre pas en ligne de compte et les surfaces réfléchissantes sont rares, d'où les techniques vocales perçantes, les orchestrations à base de percussions et le petit nombre de spectateurs.

■ 5.1. Le XX^e siècle

Au début du siècle, Sabine a découvert qu'il existait une relation simple entre volume, surface et durée de décroissance du son (aujourd'hui dénommé *temps de réverbération*, RT ou T60). Il s'agit d'un paramètre unidimensionnel fonction du volume et de la surface.

Après l'étude du volume et de la surface, les réflexions particulières doivent être examinées. Certaines réflexions de premier ordre atteignent l'auditeur par en haut. Un plafond bas aura tendance à favoriser une réverbération faible, un manque de présence et une augmentation inconfortable du volume (puisqu'il dirige le son vers le public qui l'absorbe).



Au début des années 60, Leo Beranek a pressenti l'importance du *retard initial*, ce qui a débouché sur l'installation fréquente de réseaux de petits réflecteurs placés en dessous du plafond. Ils permettaient d'augmenter le volume du plafond, donc d'améliorer la réverbération. Cette dernière restait cependant toujours considérée comme :

- simplement fonction du volume et de la surface, ou du nombre de sièges ;
- respectant une double hypothèse, selon laquelle la perception d'un champ diffus était souhaitable et le champ sonore retardé d'une salle *perçue comme réverbérante* était diffus.

Plusieurs salles ovales ou très en éventail équipées de réflecteurs suspendus au plafond résultèrent de cette opinion. Les salles du début des années 80 à Toronto (*figure 6*) et San Francisco ne rencontrèrent pas le succès escompté. L'analyse de leurs carences nous a amené à réfléchir à l'importance de la *réverbération en continu* et de la puissance de la réverbération, et à prendre davantage au sérieux l'idée que la présence dépend du *niveau* du son latéral, qu'il soit anticipé ou retardé.

Barron et Marshall ont mis en relief l'importance des réflexions latérales. Cette position a tout d'abord donné lieu à des « conceptions de premier ordre », comportant des éléments muraux ou des panneaux muraux inclinés vers le bas et vers l'intérieur pour diriger les fortes réflexions de premier ordre vers le centre du public. Les salles de Christchurch (*figure 7*), Wellington (Nouvelle-Zélande), Nottingham (Angleterre), Colorado Springs (Etats-Unis) et Glasgow (Ecosse) en constituent de bons exemples. L'une des caractéristiques de ce type de salles est un temps de décroissance inférieur et une clarté supérieure, en raison des réflecteurs inclinés, qui renvoient le son au public. Cet avantage a été repris dans des salles polyvalentes telles que celle de Colorado Springs et de Basingstoke (Angleterre), entre autres. Ici, la réverbération se développe de façon accentuée et latérale, mais elle disparaît assez vite, ce qui constitue un avantage pour l'opéra et les comédies musicales, qui exigent une bonne intelligibilité.

Lorsque l'importance du *niveau* de réverbération est devenue évidente, il a fallu trouver des solutions pour assurer une forte latéralisation du son et un niveau élevé de réverbération, autrement dit une utilisation efficace de la réverbération. Il a ensuite fallu tenir compte des réflexions latérales de premier et de second ordre. Les anciennes salles rectangulaires démontrent que dans les espaces hauts et étroits en « boîte à chaussures », les parois et le plafond dégagent des réflexions de premier ordre : la réverbération sonore est horizontale au-dessus du public. Le son résultant peut être confus si l'énergie de départ est insuffisante.

L'ajout d'un second balcon latéral, voire d'un troisième, renvoie immédiatement aux niveaux inférieurs une plus grande quantité d'énergie. Pour autant que les dimensions soient bien adaptées, une telle géométrie génère de fortes réflexions latérales de second ordre améliorant la clarté, la présence et la puissance du son tout en conservant des surfaces verticales opposées susceptibles d'entretenir la réverbération. On appelle cela *l'efficacité de la*



Figure 6
Roy Thomson Hall, Toronto (inauguré en 1982, 2812 places).
Des réflecteurs en plastique au-dessus de la scène assurent des réflexions précoces de nature à compenser la distance importante entre la plupart des spectateurs et les murs de côté. Le son est d'une grande clarté (pour certain, trop) mais manque de présence, de force et d'éclat.



Figure 7
Christchurch Town Hall, Nouvelle-Zélande (inauguré en 1972, 2662 places).
Des surfaces réfléchissantes sont suspendues sur les côtés pour générer des réflexions latérales vers de nombreux spectateurs. Avec ses nombreux sons dirigés d'abord directement vers le public, cette salle ne sonne pas avec la même vigueur qu'une salle avec des murs verticaux parallèles.



Figure 8
Bridgewater Hall,
Manchester
(inauguré en 1996,
2400 places). Une
conception hybride
avec des balcons
latéraux occupés par
un public clairsemé
dont les structures
assurent avec les
murs latéraux les
réflexions latérales
de 2^e ordre.

réverbération. Dans quelques salles assez anciennes, par exemple le Carnegie Hall (New York), le public est entassé à l'arrière et très peu sur les côtés. L'énergie latérale est donc valorisée au détriment du flux avant-arrière. Dans les salles où à partir d'une certaine hauteur le nombre de places sur les côtés ou à l'arrière est limité, la réverbération se développe entre les parois latérales et entre les murs avant et arrière. La constante temporelle ou le temps de groupe diffère de l'un à l'autre. Cette particularité a été parfaitement exploitée dans la conception des salles « rectangulaires hybrides » contemporaines que sont les salles de Birmingham et de Manchester (*figure 8*).

■ 5.2. Absorption variable

Lorsqu'un auditeur savoure une symphonie, un concert d'orgue ou un chœur, il souhaite avoir la sensation de baigner dans la réverbération mais en disposant d'une bonne fidélité directionnelle. Pour les spectacles amplifiés, ce sont la clarté, l'intelligi-

bilité et la fidélité directionnelle qui sont considérées comme primordiales.

Les systèmes d'absorption sonore variable influent sur les caractéristiques spatiales ainsi que sur la réponse temporelle. Le contrôle de l'énergie latérale peut permettre de moduler la définition spatiale. Lorsque le système d'absorption couvre les surfaces réfléchissantes latérales, la largeur apparente de la source et la présence s'en trouvent réduits, ce qui diminue le volume sonore et la clarté plus encore que si le plafond était couvert.

De même, il est possible de moduler la réverbération en couvrant les surfaces les plus réverbérantes : dans le cas de la « boîte à chaussures », la partie supérieure des murs de côté.

■ 5.3. Configuration variable du volume

La réverbération a été amplifiée au moyen de volumes couplés. Dans les salles polyvalentes, ces espaces couplés ont été « récupérés », par exemple en utilisant les cintres, avec des effets variables. Dans les salles de concert, les volumes couplés entourent la partie supérieure de la salle (*figure 9*). Dans les nouveaux espaces, ils seront situés plus bas, pour envelopper les artistes et le public.

Cette évolution amène à évoquer la question des dimensions variables. Un certain nombre de nouvelles structures ont été équipées de plafonds mobiles, qui visent à modifier la hauteur. La conception est souvent déterminée par la variation de volume qui en découle. La variabilité de la largeur des salles est aussi à l'étude.

■ 5.4. Maîtrise électronique du volume

L'évolution évoquée au § 5 nous met progressivement en condition de pouvoir moduler l'espace acoustique d'une salle, comme nous modulons déjà le temps de décroissance. Tout comme notre mode de maîtrise de la réponse temporelle est passé du domaine architectural à celui de l'électronique,



M. Robert Essert est un acousticien spécialiste de la conception des salles de concert et des théâtres, de la modélisation et des techniques de mesure. Il est titulaire d'un BS en ingénierie et en musicologie de l'université Yale (Etats-Unis) et d'un MSc en mécanique de l'université du Texas à Austin. Employé chez Artech Consulting de 1980 à 1996, il s'est attaché en particulier aux questions pratiques et théoriques en matière d'acoustique de salle de concert et de théâtre. Il a entre autres projets travaillé sur l'acoustique du Ford Performing Arts Centre de North York, Ontario, du Chan Shun Concert Hall de l'UBC de Vancouver, du R.F. Kravis Center de West Palm Beach, et à la modélisation d'une chambre de mesure 3D ainsi qu'au développement de systèmes et de logiciels de mesure.

Il a rejoint en 1997 Arup Acoustics à Londres où il travaille notamment sur une nouvelle salle de concert à Gateshead, Royaume-Uni, un nouvel opéra à Cardiff, Pays-de-Galles et à la rénovation de l'Hackney Empire Theatre à Londres. Sur ses conseils, Arup Acoustics développe un studio de « perceptivité sonore 3D » pour compléter le travail de consultance acoustique du groupe.

M. Essert est membre de l'Institute of Acoustics, de l'Acoustical Society of America, de l'Audio Engineering Society et de l'International Society for the Performing Arts. Il est membre fondateur du Concert Hall Research Group.



notre emprise sur les aspects spatiaux évolue de systèmes de commande mécaniques et architecturaux pour se transformer en synthèse électronique de solutions architecturales. La commande électronique commence à s'imposer dans des domaines qui échappent au monde de l'architecture, par exemple :

- effets de son ambiant ;
- cinéma à son ambiant ;
- théâtre à domicile ;
- environnements virtuels ;
- espaces variables ;
- commande directe en temps réel de l'exécutant (par ex. MIT, les « Hyperinstruments » de Medialab).

6. Conclusions

On a examiné plusieurs aspects de l'acoustique spatiale, des mesures spatiales, de la modélisation et du rendu acoustique. On a aussi évoqué l'évolution de la conception des salles au fur et à mesure de l'amélioration des connaissances en acoustique architecturale. Les liens entre architecture et acoustique sont aujourd'hui mieux compris. On peut donc mieux exploiter nos connaissances acoustiques lors de la construction de salles. Comme les autres concepteurs les acousticiens deviennent maintenant plus actifs : lors de sa conception, l'acoustique de la forme d'une salle joue désormais un rôle bien plus déterminant qu'avant.

Bibliographie

- [1] W.C. Sabine : **Reverberation**
The American Architect, 1900. (repris dans **Collected papers on Acoustics**, Dover Publications, 1964).
- [2] A.H. Marshall : **A note on the importance of room cross section in concert halls**
J. Sound, Vib. 5, pp. 100 –112, 1967.
- [3] M. Barron : **The subjective effects of first reflections in concert halls – the need for lateral reflections**
J. Sound, Vib. 15, pp. 475 – 494, 1971.
- [4] M. Schroeder, D. Gottlob et K. Siebrasse : **Comparative study of European concert halls: Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters**
J. Acoust. Soc. Am., vol. 56, n° 1195, 1974.
- [5] J. Blauert : **Spatial Hearing**
MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- [6] D. Griesinger : **Quantifying musical acoustics through audibility**
J. Acoust. Soc. Am., vol. 94, n° 1891, 1993.
- [7] W. de V. Keet : **The influence of early lateral reflections on spatial impression**
Actes du 6e Congrès international d'Acoustique, Tokyo, 1968.
- [8] J.S. Bradley : **Contemporary approaches to evaluating auditorium acoustics**
Actes de la Conférence internationale de l'AES, 3 – 6 mai, 1990.
- [9] L. Beranek : **How They Sound – Concert and Opera Halls**
Acoustical Society of America, Woodbury, New York, 1996.
- [10] M. Gerzon : **General Metatheory of Auditory Localisation**
Préprint 3306 de la 92e Convention de l'AES, Vienne, mars 1992.

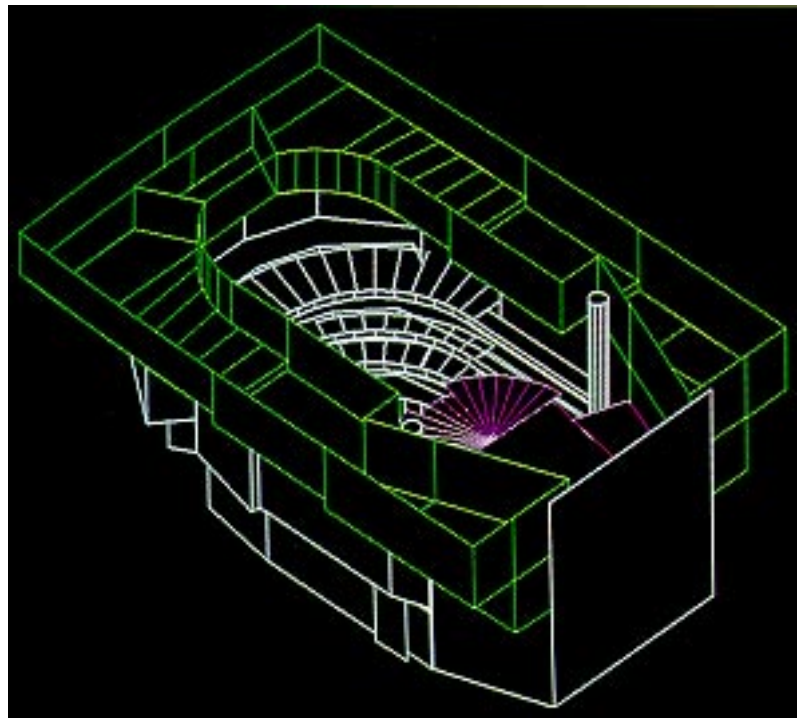


Figure 9
Vue de dessus du Meyerson Symphony Center de Dallas (inauguré en 1989, 2065 places). Une chambre de réverbération recouverte partiellement (en vert) habille la partie supérieure de la salle. Le flux d'énergie sonore entre les deux volumes (la salle et la chambre) est contrôlé par un ensemble de grandes portes en béton. Cette technique permet de faire varier indépendamment la clarté et la réverbération. On a choisi pour le Symphony Hall de Birmingham une technique similaire.