

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Localisation des premières réflexions dans une salle par chrono-goniométrie acoustique

Romain Boulandet¹, Xavier Falourd¹, Mario Rossi¹, Hervé Lissek¹

¹ LÉMA, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, romain.boulandet@epfl.ch

14 avril 2010

De plus en plus souvent, les espaces d'écoute sont amenés à accueillir des spectacles autres que ceux pour lesquels ils ont été conçus et dimensionnés. C'est le cas d'un auditorium classique devenant le temps d'un festival une salle de concert pour musique amplifiée, ou d'une cathédrale se prêtant occasionnellement à des concerts de musique chorale. En pareille situation, l'acousticien n'a d'autres alternatives que d'utiliser des abat-sons ou une assistance électroacoustique pour améliorer le confort d'écoute. En créant des réflexions précoces naturelles ou artificielles, ces dispositifs permettent de renforcer le son direct et ainsi de satisfaire auditoire et musiciens. Toutefois, si les outils actuels savent très bien estimer les dispersions temporelles de ces réflexions, il n'existe pas de méthode globale pour veiller à leur répartition homogène dans la salle. Ce contexte particulier a motivé le développement d'un outil de qualification spatio-temporelle des réflexions précoces dans une salle. L'idée générale de l'approche proposée est de combiner l'information temporelle issue de la mesure d'échogrammes spatialement distribués avec un module de localisation angulaire par goniométrie. Ce dernier est basé sur l'analyse des différences de temps de propagation qui existent au sein d'un arrangement de capteurs de géométrie connue en présence d'une source située en champ lointain. Par extension, on définit la chrono-goniométrie acoustique comme une méthode de localisation active basée sur l'estimation conjointe des directions et des instants d'arrivée. Après avoir introduit le contexte de l'étude, nous formulerons le problème de localisation dans une salle tout en précisant les hypothèses de travail. Puis, un aperçu réaliste des performances in situ du chrono-goniomètre pour localiser simultanément plusieurs réflexions sera présenté.

1 Introduction

L'étude de l'acoustique des espaces vise à obtenir des propriétés acoustiques optimales, tant au point de vue du confort d'écoute qu'à celui des conditions de production, c'est-à-dire d'exécution de musique ou de parole. On conçoit aisément que les propriétés requises soient très différentes pour un auditorium, un théâtre, une salle de concert de musique amplifiée, voire un lieu de culte. Chaque type d'utilisation a sa spécificité et pose un certain nombre d'exigences acoustiques. Pourtant, de tels espaces d'écoute peuvent être amenés à accueillir des représentations autres que celles pour lesquelles ils ont été conçus et dimensionnés. Cette polyvalence imposée nécessite des aménagements amovibles afin de contrôler l'acoustique du lieu, en veillant notamment à une bonne répartition spatio-temporelle du son. Si les outils actuels savent très bien estimer les dispersions temporelles des premières réflexions, la connaissance de leur répartition spatiale reste plus délicate à obtenir. Pourtant, nombre d'études s'accordent à dire que la distribution des réflexions précoces dans une salle est primordiale quant à la qualité d'écoute dans un espace [1, 2]. Dans les cas simples, l'acoustique géométrique s'applique par tracé manuel des rayons sonores sur les plans et élévations de la salle étudiée, avec les limitations d'un tracé en plan. Pour un avant-projet plus ambitieux, un modèle numérique permet le tracé en trois dimensions des rayons so-

nores et donc d'évaluer la distribution des diverses réflexions partout dans la salle à bâtir. L'obtention d'un modèle tridimensionnel peut toutefois s'avérer coûteux ou bien n'est pas toujours possible. Lorsque la salle est déjà existante, il n'existe pas de méthode permettant de localiser simultanément plusieurs réflexions. Ce contexte particulier a motivé le développement d'un outil de qualification spatio-temporelle des premières réflexions dans une salle.

2 Formulation du problème

2.1 Stratégies de localisation

La problématique est de localiser simultanément dans une salle plusieurs contributions issues d'une même source. Par relevé directif d'échogrammes, il est possible de vérifier la provenance de réflexions [3]. Pour introduire l'information spatiale, le relevé d'échogramme est orienté suivant une direction privilégiée en pointant source et microphone sur la surface de réflexion estimée. L'inconvénient majeur de la méthode est qu'elle contraint l'opérateur à réaliser le pointage manuel pour toutes les surfaces réfléchissantes d'intérêt. L'approche par goniométrie, basée sur l'utilisation d'un réseau compact de microphones, permet de détecter et localiser une source sonore sans connaissance a priori sur sa position

[4]. Selon ce principe de détection passive, les directions d'arrivée des ondes sonores sont évaluées par estimation des retards entre microphones dans le repère géométrique relatif au réseau microphonique. En revanche, cette technique est peu performante pour détecter les sources d'amplitudes faibles au regard d'autres beaucoup plus énergétiques, situation qui se présente avec le son direct généralement plus énergétique que les sons réfléchis [5]. En s'inspirant des techniques évoquées, et pour contourner les limites de chacune face à la situation envisagée, la stratégie proposée vise à combiner l'information temporelle issue de la mesure d'échogramme sur le réseau de microphones avec l'information spatiale calculée par principe goniométrique.

2.2 Modèle de propagation

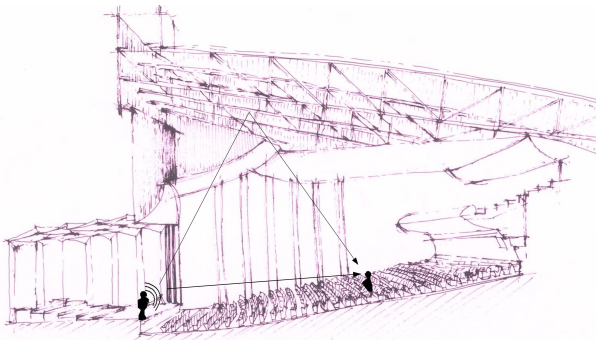


FIGURE 1 – Différentes contributions sonores dans un grand espace. *Dessin Anne Faure.*

Pour les salles de dimensions bien supérieures à la longueur d'onde, il est souvent plus commode de s'adresser à une description géométrique, analogue à l'optique. L'approche géométrique est d'autant plus justifiée dans le contexte de cette étude pour les raisons suivantes :

- les dimensions des surfaces réfléchissantes à identifier sont supérieures à la longueur d'onde,
- les irrégularités de surface sont beaucoup plus petites que la longueur d'onde,
- les variations des propriétés du milieu sont faibles par rapport à l'unité pour des distances égales à la longueur d'onde,
- les points d'observation sont situés loin des sources.

A partir de ces hypothèses, les trajectoires des ondes acoustiques entre une source et un point d'observation peuvent être assimilées à des trajets rectilignes qui au contact d'une surface réfléchissante, présentent une réflexion spéculaire dont l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence [2] (Fig. 1). Le son capté par un microphone $p(t)$ dans une salle peut ainsi être modélisé comme la somme des contributions provenant d'une source principale $s(t)$ et de ses copies atténuées et retardées [6] :

$$p(t) = \sum_{n=1}^N \alpha_n s(t - \tau_n) + b(t) \quad (1)$$

où N est le nombre total de réflexions, τ_n le temps de propagation de la n^{ieme} contribution, α_n l'amplitude faisant intervenir les amortissements géométriques et les

facteurs d'absorption des parois réfléchissantes et $b(t)$ un bruit additionnel non corrélé.

2.3 Mesure de la réponse impulsionnelle

La caractérisation expérimentale d'une salle se base sur le relevé de sa réponse impulsionnelle [3, 7]. Si cette réponse identifie la structure temporelle du son (direct, réflexions premières et tardives, échos) pour des positions données de la source et du point d'observation, elle ne précise pas de manière explicite la direction d'incidence de ces diverses contributions.

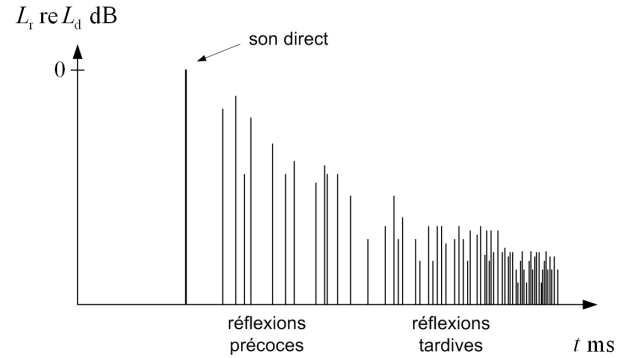


FIGURE 2 – Les différentes composantes d'un échogramme.

L'échogramme illustré schématiquement par la figure 2 s'obtient en prenant le module carré de la réponse impulsionnelle. Les pics présents sur l'échogramme témoignent par leur émergence de l'existence de différentes contributions dans le signal au point d'observation. Ces pics possèdent des instants d'arrivée et amplitudes propres comme décrit dans la relation (1). Par la suite, toute contribution ainsi détectée sera nommée rayon.

2.4 Principe de goniométrie

Soit la situation décrite par la figure 3 où deux microphones sont soumis à une onde plane progressive sous un angle d'incidence tel que le front d'onde atteint d'abord le microphone i , puis le microphone j après un temps de propagation τ_{ij} . En situation de champ lointain, ce retard se déduit de la position relative $\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i$ des microphones et de l'incidence $\mathbf{n}$ de la source [4] :

$$\tau_{ij} = \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_{ij} \quad (2)$$

Dans le plan (yOz) , la relation (2) s'écrit simplement en fonction de l'angle d'incidence α_{ij} et de la distance inter-capteur $d = \|\mathbf{x}_{ij}\|$:

$$\tau_{ij} = \frac{d}{c} \cos \alpha_{ij} \quad (3)$$

Le lieu géométrique pour lequel on observe un retard de propagation constant entre $\mathbf{x}_i$ et $\mathbf{x}_j$ est un hyperboloïde. Pour une source suffisamment éloignée, telle que $|\mathbf{x}_s| \gg d$, cette surface du second degré tend vers un cône de révolution d'axe porté par l'alignement des microphones et centré sur leur point médian [8, 9]. Pour la situation décrite en figure 3, l'équation du cône s'écrit :

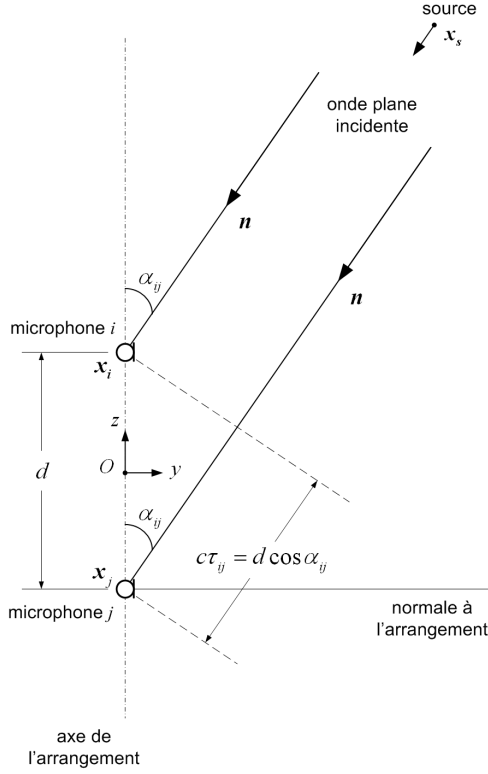


FIGURE 3 – Illustration géométrique d'un front d'onde plan arrivant sur une paire de capteurs

$$x^2 + y^2 = z^2 \tan^2 \alpha_{ij} \quad (4)$$

où $\tan^2 \alpha_{ij} = (d/c\tau_{ij})^2 - 1$. L'angle d'ouverture du cône, α_{ij} , dépend ainsi du retard τ_{ij} , et chacune de ses génératrices constitue une direction d'incidence potentielle d'une source dont les fronts d'onde atteindraient d'abord le microphone au point $\mathbf{x}_i$, puis le microphone en $\mathbf{x}_j$ après un temps de propagation τ_{ij} .

La méthode classique pour estimer le retard τ_{ij} consiste à calculer la fonction d'intercorrélation entre les signaux captés par les deux microphones [6]. Toutefois, τ_{ij} peut aussi s'exprimer en fonction des instants d'arrivée τ_i et τ_j :

$$\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j \quad (5)$$

lesquels peuvent être estimés directement par détection des pics sur les échogrammes mesurés aux points d'observation $\mathbf{x}_i$ et $\mathbf{x}_j$. Ainsi, par simple mesure de retard sur une paire de microphones, seul un ensemble de directions d'arrivée potentielles est identifiable.

2.5 Principe de multilatération

En associant judicieusement dans l'espace des microphones par paires, selon un arrangement bien défini, il est possible de localiser en azimut et élévation une ou plusieurs sources. Il faut alors s'attendre à devoir intercepter au minimum trois surfaces coniques pour trouver la solution, ce qui n'est pas sans difficulté numérique du fait de devoir résoudre un système impliquant des équations hyperboliques [8, 9]. Cependant, la mesure du temps de propagation du trajet direct permet de définir la distance R entre la source et les microphones. Alors, sans connaissance a priori de la provenance de la

source, l'ensemble des directions d'arrivée possibles est porté par une sphère de rayon R :

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (6)$$

et l'ensemble des directions d'arrivée potentielles devient, par intersection du cône (5) et de la sphère (6), un cercle d'équation :

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \sin^2 \alpha_{ij} \\ z = R \cos \alpha_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

Appliqué à un triplet de paires de microphones non colinéaires, le système initial se résume donc à intercepter trois cercles non coplanaires, ce qui est plus simple à résoudre numériquement. Ainsi, en associant l'information temporelle contenue dans les échogrammes spatialement distribués à la localisation angulaire par multilatération, la distance exacte d'une source et son incidence sur un arrangement bien défini détermine sa position. Ce principe peut être appliqué pour tout rayon détecté sur les mesures d'échogrammes.

2.6 Cas d'un arrangement cubique de microphones

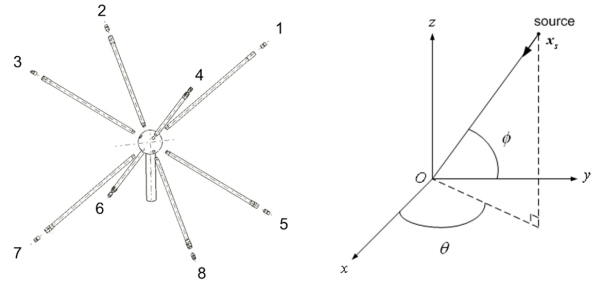


FIGURE 4 – Arrangement cubique de microphones.

Soit le goniomètre expérimental illustré par la figure 4. Les microphones répartis sur les diagonales sont associés par paires, $p_{17} = (1, 7)$, $p_{28} = (2, 8)$, $p_{35} = (3, 5)$, $p_{46} = (4, 6)$ et sont distants deux à deux de $d = a\sqrt{3}$, où a est l'arête du cube. A partir de (7) et en utilisant les matrices de rotation appropriées pour se placer dans un même repère de référence $\mathcal{R}(O, x, y, z)$, la direction estimée de la source est alors identifiable en résolvant un système composé de 3 équations à 3 inconnues :

$$\begin{cases} \sqrt{2}y + z = \sqrt{3}R \cos \alpha_{17} \\ \sqrt{2}x + z = \sqrt{3}R \cos \alpha_{28} \\ -\sqrt{2}y + z = -\sqrt{3}R \cos \alpha_{35} \end{cases} \quad (8)$$

En combinant (8) et (3), les coordonnées x, y, z de la source s'expriment en fonction des retards τ_{17} , τ_{28} , et τ_{35} selon :

$$\begin{cases} x = \frac{Rc}{2\sqrt{2}a}(-\tau_{17} + 2\tau_{28} + \tau_{35}) \\ y = \frac{Rc}{2\sqrt{2}a}(\tau_{17} + \tau_{35}) \\ z = -\frac{Rc}{2\sqrt{2}a}(\sqrt{2}\tau_{17} - \sqrt{2}\tau_{35}) \end{cases} \quad (9)$$

Finalement, la direction d'incidence estimée de la source s'exprime en coordonnées sphériques selon :

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \hat{\phi} &= \arctan \frac{y}{x} \end{aligned} \quad (10)$$

3 Réalisation du chronogoniomètre

3.1 Traitement algorithmique

Le traitement algorithmique repose sur un processus en quatre étapes. La première étape consiste à établir, par paire de microphones, un modèle prévisionnel d'après (2) qui associe à chaque direction d'arrivée un retard. La seconde consiste à relever dans chaque échogramme les instants d'arrivée des contributions les plus intenses. La troisième repose sur le calcul combinatoire des différences de temps d'arrivée par paires de microphones. La dernière enfin consiste à regrouper les différences de temps d'arrivée issues d'un même rayon par multilatération. La localisation des rayons captés par le réseau de microphones est donc soumise à deux critères conditionnant la validité des mesures.

3.2 Critère de distance

La distance inter-capteur d constitue une limite physique permettant de borner les différences de temps d'arrivée qu'il est possible d'observer entre deux microphones :

$$|\tau_{ij}| \leq d/c \quad (11)$$

Seules les combinaisons de retards respectant (11) sont prises en compte dans l'algorithme.

3.3 Critère de consistance des retards

En appliquant (9) pour différents triplets, une condition de validité des combinaisons de différences de temps d'arrivée peut être établie. Pour les paires diagonales de l'arrangement cubique, les retards estimés doivent avoir la consistance suivante :

$$\begin{aligned} 2\tau_{28} + \tau_{35} - \tau_{17} &= \tau_{17} - \tau_{35} + 2\tau_{46} = \tau_{28} + \tau_{46} \\ \tau_{17} + \tau_{35} &= 2\tau_{17} - \tau_{28} + \tau_{46} = \tau_{28} + 2\tau_{35} - \tau_{46} \quad (12) \\ \tau_{17} - \tau_{35} &= \tau_{28} - \tau_{46} \end{aligned}$$

Les combinaisons valides sont celles qui vérifient les égalités de (12).

3.4 Modèle prévisionnel

Sous forme matricielle, il est possible d'exprimer par paires de microphones selon (2), les temps de propagation relatifs correspondant à toutes les directions d'arrivée possibles. La figure 5 représente graphiquement cette matrice pour la paire (1, 7). La taille des matrices des délais associés à chaque paire dépend de la résolution angulaire désirée ou contrainte par la chaîne de traitement (réponse impulsionnelle de la source, échantillonnage,...). Ainsi, selon le critère de consistance des retards, l'intersection d'au moins trois matrices solutions conduit à une solution unique pour une combinaison valide de retards, ou à un ensemble vide le cas échéant.

Cette approche par modèle prévisionnel peut aussi servir de masque spatial qui, une fois intégré dans l'algorithme, permet de filtrer spatialement les échogrammes pour focaliser la détection sur une zone angulaire prédéfinie par l'utilisateur.

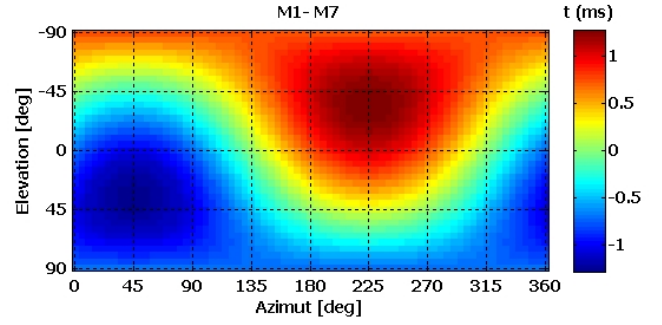


FIGURE 5 – Matrice des délais pour la paire (1, 7).

3.5 Incertitudes de mesure

Une incertitude due à la discrétisation lors de l'étape échantillonnage des signaux a un impact sur la détection des pics (cf. §2.3). Pour en tenir compte, il convient de considérer les instants d'arrivée mesurés avec une certaine incertitude :

$$\hat{\tau}_{ij} - \varepsilon \leq \tau \leq \hat{\tau}_{ij} + \varepsilon \quad (13)$$

où ε représente l'incertitude en nombre d'échantillons.

La position relative des microphones constituant l'arrangement joue également un rôle dans la précision de la localisation. Dans le cas du prototype expérimental, ces derniers sont répartis aux sommets du cube dont le barycentre constitue l'origine du repère $\mathcal{R}$ de référence. L'intérêt d'opter pour une géométrie ayant une symétrie de révolution est qu'elle permet de compenser l'erreur d'estimation des directions d'arrivée tout en ne privilégiant pas de directions particulières. Ainsi, pour le prototype cubique développé par le LEMA l'erreur angulaire maximale est inférieure à cinq degrés. Hormis le cube, les autres polyèdres uniformes réguliers convexes possèdent des propriétés similaires.

4 Validation expérimentale

4.1 Localisation de pseudo-reflections dans une cathédrale

Certains problèmes d'acoustique des espaces ne peuvent trouver de solution satisfaisante qu'en recourant à l'installation d'une assistance audio. C'est le cas de la cathédrale de Lausanne où la réverbération élevée conduit à un rapport champ direct/champ réverbéré trop faible pour l'auditoire, d'autant que les piliers séparant la nef principale des parois latérales ne permettent pas de fortes réflexions précoces susceptibles de renforcer le son direct. Aussi, le LEMA a développé avec succès une assistance électroacoustique destinée à améliorer le confort d'écoute lors de concerts de musique chorale. Le but de cette assistance est de créer des contributions artificielles similaires à des réflexions précoces qui diffusent, via des colonnes de haut-parleurs, le son direct capté par un dispositif de prise de son. Par ailleurs, des retards électroniques permettent de faire intervenir ces pseudo réflexions en temps utiles pour le public. La connaissance a priori de l'incidence des réflexions, la possibilité de jouer sur la mise en/hors marche de

l'assistance audio pour valider les contributions détectées, et l'occasion d'évaluer les performances du chrono-goniomètre dans un environnement particulièrement réverbérant ont motivé cette expérimentation *in situ*.



FIGURE 6 – Nef de la cathédrale of Lausanne.

La situation est la suivante : une source est placée sur l'estrade du chœur dans le champ du dispositif de prise de son et le chrono-goniomètre à une place de l'auditoire située à vingtaine de mètre de celle-ci. Les colonnes de haut-parleurs sont quant à elles disposées symétriquement sur les piliers délimitant la nef principale (hauteur au centre de 1,8 m). Les résultats présentés ont été obtenus lorsque seules les colonnes des cinquièmes colonnes en partant de la scène étaient actives.

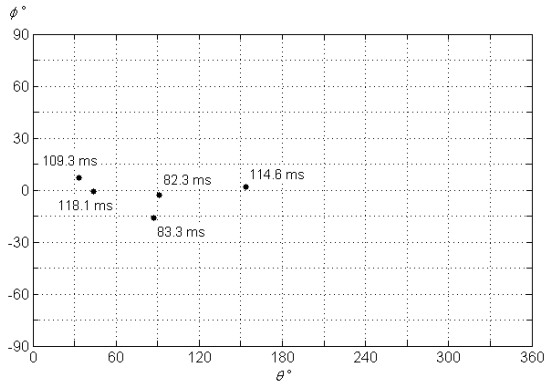


FIGURE 7 – Directions d'arrivée, azimuth θ , élévation ϕ , et instants d'arrivée du son direct et des 4 premières réflexions les plus intenses.

Sur le relevé spatio-temporel des figures (7) et (8), les cinq contributions les plus intenses sont localisées : le son direct, la réflexion au sol, une réflexion latérale, ainsi que les deux contributions artificielles des cinquièmes colonnes côté cour et côté jardin. En identifiant ainsi les instants et directions d'arrivée simultanément, le chrono-goniomètre permet d'ajuster les paramètres retard et gain à appliquer à l'assistance acoustique pour améliorer le confort d'écoute.

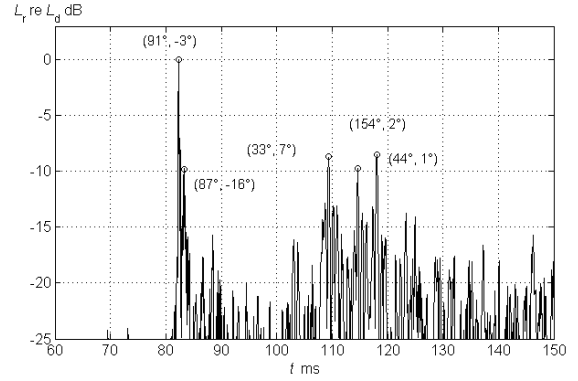


FIGURE 8 – Echogramme spatial : l'azimut θ et l'élévation ϕ de chaque contribution identifiée sont spécifiés.

4.2 Localisation de réflexions précoces dans un auditorium polyvalent

Lors de la conception de l'auditorium Stravinski à Montreux (salle de concert de 1800 places, 18 000 m³) et en raison du plan peu favorable imposé par différentes contingences (grande largeur et parterre plat), des abat-sons avaient été disposés au dessus de la scène et au dessus du public en vue d'améliorer la "clarté" et la "perspective". Ces dispositions s'étaient révélées très efficaces en créant des réflexions intenses avec une faible dispersion, de l'ordre de 20 à 30 ms, et en permettant à l'auditorium de présenter une bonne réverbération (2,8 s sans public et 2,2 s avec). Comme l'illustre la figure 9, les parois latérales et de fond de scène sont des panneaux de bois incurvés en forme de vague, dont les profils permettent de créer de fortes réflexions précoces pour les spectateurs proches et un bon mélange diffus de réflexions pour ceux plus éloignés. La présence de premières réflexions facilement identifiables a motivé l'expérimentation du chrono-goniomètre dans cet auditorium.



FIGURE 9 – Auditorium Stravinski à Montreux.
Architectes : J-M. Jenny et P. Steiner, Acousticiens : B. Gandet et M. Rossi.

La situation d'étude est la suivante : la source et le goniomètre sont disposés sur scène de manière à localiser la réflexion sur l'abat-son destiné aux musiciens et aux choristes, la source pointant vers le barycentre de l'arrangement.

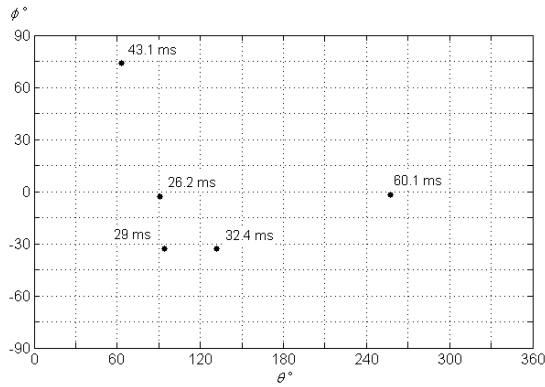


FIGURE 10 – Directions d'arrivée, azimuth θ , élévation ϕ , et instants d'arrivée du son direct et des 4 premières réflexions les plus intenses

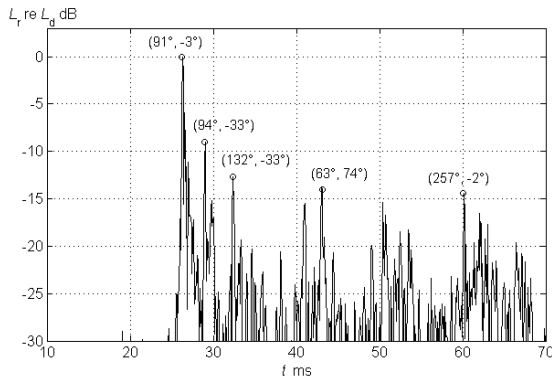


FIGURE 11 – Echogramme spatial : l'azimut θ et l'élévation ϕ de chaque contribution identifiée sont spécifiés

Comme illustré par les figures 10 et 11, le chrono-goniomètre permet de localiser, en une seule mesure, cinq rayons distincts : le son direct, la réflexion au sol, les réflexions provenant de l'abat-son et du gradin à proximité, ainsi qu'une contribution s'étant réfléchiée sur une vague du fond de scène.

5 Conclusion

Le chrono-goniomètre présente un réel intérêt pour qualifier plus complètement que ne le font les outils actuels le champ acoustique de grandes salles. En révélant l'information spatiale contenue dans des échogrammes relevés sur un réseau compact de microphones, la méthode permet d'identifier le son direct et les premières réflexions dans une salle. Les tests de validation expérimentale réalisés dans une cathédrale et un auditorium se sont montrés très concluants pour localiser les premières réflexions naturelles, comme les pseudo réflexions latérales créées artificiellement pour améliorer le confort d'écoute. Le prototype présenté, basé sur un arrangement cubique de microphones, est actuellement en cours d'amélioration afin de qualifier le champ sonore et d'obtenir les caractéristiques globales de parois pour des espaces de plus petites dimensions, tels que des salles de classe et des pièces d'habitation.

Références

- [1] Beranek L., "How they sound, concert and opera halls", *Woodbury*, ASA, (1996).
- [2] Kuttruff H., "Room acoustics", *Elsevier Applied Sciences*, 3rd Ed. (1991).
- [3] Gunel B., "Room shape and size estimation using directional impulse response measurements", in *Proc. Forum Acusticum Sevilla*, (2002).
- [4] Van Lancker E., "Acoustic goniometry : a spatio temporal approach", *PhD Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, (2002).
- [5] Boulandet R., "Localisation des premières réflexions dans une salle par chrono-goniométrie", *Master thesis, Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris*, (2005).
- [6] Knapp C., Carter G., "The generalized correlation method for estimation of time delay", *Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE Trans., vol. 24, (1976).
- [7] Borish J., Angell J. B., "An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise", *Journal of Audio Engineering Society*, vol. 31, issue 7/8, (1983).
- [8] Schau H. C., Robinson A. Z., "Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences", *Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE Trans., vol. 35, no. 8 (1987).
- [9] Brandstein M., Ward D., "Microphone arrays - Signal processing techniques and applications", *Springer*, (2001).