

Analyse spatio-temporelle des premières réflexions dans divers lieux d'écoute : de la cabine radiophonique à la cathédrale de Lausanne (Suisse)

Xavier Falourd, Lukas Rohr,
Romain Boulandet, Hervé Lissek
LEMA
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
CH-1015 Lausanne
E-mail : xavier.falourd@epfl.ch

Mario Rossi
AER sàrl
rue de l'Ale 25
CH-1003 Lausanne

Résumé

Toute production de musique, ou de parole, dans une salle destinée à l'écoute, impose en amont des questionnements sur l'acoustique du lieu. Pour offrir à l'auditeur des conditions d'écoute optimales, l'acousticien utilise habituellement des descripteurs caractérisant le champ sonore. Les méthodes usuelles basées sur la réponse impulsionnelle ou l'échogramme, selon des principes d'acoustique géométrique, permettent de calculer des indices visant la qualification de la salle (temps de réverbération, clarté, rapport S/N, dispersion des réflexions précoces, etc.). Ces indices ne suffisent toutefois pas pour des salles à géométrie complexe, particulièrement lorsque les distributions temporelles et spatiales des contributions acoustiques constituant l'échogramme sont telles que l'interprétation de ce dernier est trop difficile, voire impossible. Dans ce cas, l'expertise acoustique ne peut être menée à bien qu'à l'aide de modélisations numériques puis par comparaison directe entre les mesures et les simulations. Pour le diagnostic expérimental, nous avons simplifié ce problème par la mesure d'échogrammes multiples avec un réseau de microphones spatialement distribués. Un arrangement de microphones omnidirectionnels, de géométrie spécifique, permet de tirer profit des informations temporelles et spatiales des contributions acoustiques détectées. Cette discrimination spatio-temporelle, obtenue par « chrono-goniométrie », des réflexions acoustiques facilite leur interprétation par reconstruction inverse du parcours du son dans la salle à l'aide d'un modèle géométrique simple. Sur ce principe, l'instrument permet d'obtenir une information globale des caractéristiques de propagation du son sur le trajet entre la source et l'arrangement de microphones ainsi qu'une information locale pour les surfaces de réflexion identifiées. Nous présentons une première validation du principe pour différentes configurations de salle : une salle-test rectangulaire avec ou sans traitement absorbant de ses parois, puis dans plusieurs lieux d'écoute musicale à savoir l'auditorium du conservatoire de musique de Vevey, l'auditorium Stravinski de Montreux ainsi que la cathédrale de Lausanne en Suisse. Les résultats obtenus valident le procédé et mettent en évidence ses apports mais aussi les difficultés de mise en œuvre.

De plus en plus souvent, les espaces d'écoute sont amenés à accueillir des spectacles autres que ceux pour lesquels ils ont été conçus. 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, susceptible de satisfaire auditoire et musiciens.

Les méthodes usuelles basées sur la réponse impulsionnelle ou l'échogramme, selon le principe d'acoustique géométrique, permettent de calculer des indices pour la qualification de la salle (temps de réverbération,

clarté, rapport S/N, dispersion des réflexions précoces, etc.). Afin de permettre une comparaison entre salles et de définir une façon de procéder bien précise, ces indices ont été standardisés et sont énoncés par les normes ISO 3382-1[1] et 3382-2[2]. Cependant les indices comme l'EDT (Early Decay Time) ou clarté dépendent fortement des réflexions précoces généralement contenues dans les cinquante premières millisecondes suivant le premier front d'onde entre la source et le microphone [6].

Toutefois, 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. Ce contexte particulier a motivé le développement d'un outil de qualification spatio-temporelle des réflexions précoces dans une salle.

Modèle de propagation

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 relatives 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 assez loin des sources.

Selon ces hypothèses, les trajectoires des ondes acoustiques entre une source et un point d'observation peuvent être assimilées à des trajets rectilignes (Figure 1). Au contact d'une surface réfléchissante plane, le front d'onde acoustique subit une réflexion spéculaire dont l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence [7]. Le son capté par un microphone dans une salle peut ainsi être modélisé comme la somme des contributions provenant d'une source principale et de ses copies («sources-images») atténuées et retardées dont l'amplitude dépend du trajet acoustique suivi.

Le modèle des sources-images, proposé par Allen & Berkley en 1979 [4], suppose que toutes les réflexions sont spéculaires, ce qui sous-tend que la bande de fréquences considérée se restreint au domaine de validité de l'acoustique géométrique. Pour l'analyse spatio-temporelle des réflexions précoces, nous supposons dans le reste de l'étude que la majorité des réflexions sont spéculaires et assimilables aux réflexions prédites par simulation des sources-images.

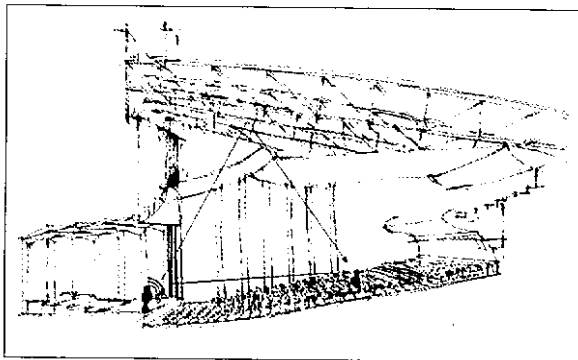


Fig. 1 : Différentes contributions sonores dans un auditorium. Dessin Anne Faure

Relevé d'échogramme

La caractérisation expérimentale d'une salle se base sur le relevé de sa réponse impulsionnelle [9,10]. Si cette réponse identifie la structure temporelle du son (direct, réflexions précoces 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. 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 de la source au point d'observation. Ces pics possèdent des instants d'arrivée et des amplitudes propres au parcours du front d'onde acoustique. Par la suite, toute contribution ainsi détectée dans l'échogramme sera nommée rayon.

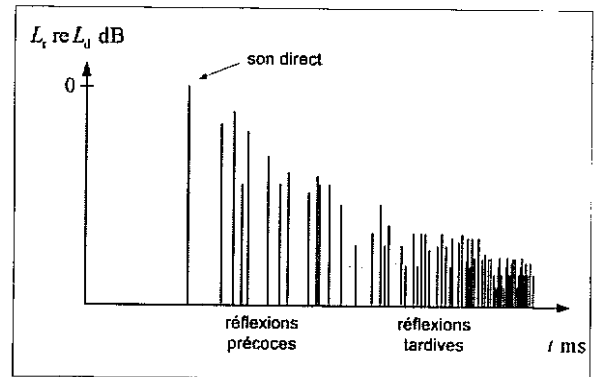


Fig. 2 : Les différentes composantes d'un échogramme

Localisation de réflexions précoces

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 des réflexions [9]. 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 parois et surfaces d'intérêt.

L'approche proposée ici est de combiner l'information temporelle issue de la mesure d'échogrammes spatialement distribués avec un module de localisation angulaire par «goniométrie» [8,6]. Basée sur l'utilisation d'un réseau compact de microphones, elle permet de détecter et localiser une source sonore sans connaissance a priori sur sa position. Le module de localisation repose sur l'analyse des différences de temps de propagation qui existent au sein d'un arrangement compact de géométrie connue.

Par extension, on définit alors la chrono-goniométrie acoustique comme une méthode de localisation active basée sur l'estimation conjointe des directions et des instants d'arrivée du son composé du rayon direct, c'est-à-dire entre la source et le microphone (sans obstacle), suivi de rayons indirects. Dès lors l'analyse des échogrammes et de leurs combinaisons permet de localiser en azimut et élévation toutes les réflexions du son sur les parois et surfaces réfléchissantes de la salle.

Cette proposition de méthode de mesure doit non seulement être applicable à de grands espaces, mais aussi être étendue à des auditoriums et des salles plus petites présentant une forte densité de réflexions dans les premières cinquante millisecondes. Un tel traitement ouvre donc des perspectives supplémentaires pour les mesures in situ.

Validation expérimentale du modèle source image

Sondage spatial des réponses impulsionnelles

Pour valider les calculs basés sur le modèle des sources images, la réponse impulsionnelle d'une salle parallélépipédique a été mesurée le long d'un réseau linéaire uniforme de microphones sur une ligne transversale correspondant à la largeur de la salle. Par corrélation entre le bruit émis par la source et le son capté sur chaque microphone, les réponses impulsionnelles calculées sont assemblées formant ainsi la réponse impulsionnelle multi-trace (r.i.m.) de la salle pour une position de source donnée [5]. Ainsi il est possible de visualiser les fronts d'onde incidents pour une comparaison directe avec le modèle.

L'expérience est menée dans une petite salle construite en panneaux de bois, semblable en dimensions à une régieson de radiodiffusion (3,40 x 2,15 x 2,10 m voir figure 3). L'homogénéité des parois permet de considérer un facteur d'absorption moyen, facilitant l'analyse globale de la salle. De plus, les petites dimensions de la salle assurent une forte densité temporelle des réflexions.

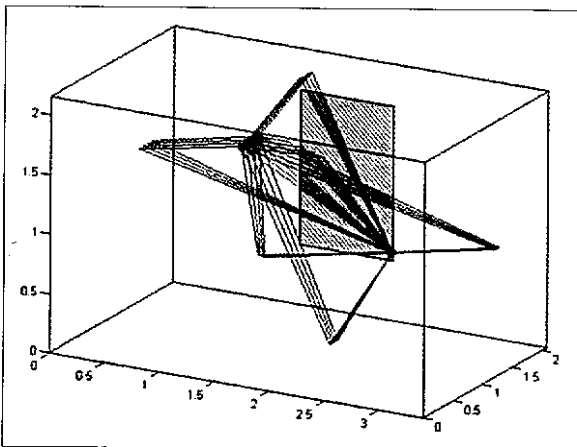


Fig. 3 : Synopsis des trajets acoustiques (ordre de réflexion 1) entre la source et les microphones situés dans la salle rectangulaire. Le panneau de laine de verre, illustré en jaune, est plaqué sur la paroi interne

Analyse temporelle des premiers fronts d'onde mesurés par le réseau linéaire uniforme

Sous les conditions d'homogénéité des surfaces de chaque paroi de la salle, on s'intéresse en premier lieu aux caractéristiques temporelles de l'ensemble des fronts d'onde mesurés. La figure 4 représente la r.i.m. obtenue par une représentation spatio-temporelle : en abscisse sont données les positions des microphones du réseau linéaire, en ordonnée les temps d'arrivée en millisecondes des fronts d'ondes directs et indirects. Le rayon direct est facilement identifiable par son temps d'arrivée et son énergie. Les fronts d'onde correspondant à un petit nombre de réflexions sont également identifiables, en raison de leur courbure et de leur distribution spatio-temporelle. On identifie alors aisément par comparaison des temps d'arrivée simulés et mesurés les réflexions sur les murs ainsi qu'au plafond et au sol de la salle. La comparaison graphique directe entre la r.i.m. issue du modèle et celle mesurée

illustre leur très bonne cohérence pour les premiers fronts d'onde. Par contre pour les ordres de réflexions élevés, elle illustre la nécessité d'un ajustement des paramètres géométriques et physiques.

Effet des parois absorbantes sur les fronts d'onde

L'intérêt est porté sur la mesure des amplitudes des premières réflexions entre la source et chaque microphone. Un traitement local à l'aide d'un panneau de laine minérale posé sur une paroi de la salle sous des conditions de mesure identiques à l'expérience précédente doit permettre d'évaluer son impact sur les réflexions précoces (Figure 3). Ce panneau large de quelques dizaines de centimètres ne recouvrant pas toute la paroi latérale droite entre la source et le réseau de microphones n'a donc pas un impact sur l'ensemble des réflexions de cette paroi. Une nouvelle mesure de la r.i.m. est effectuée afin d'illustrer la bonne concordance entre les simulations et les mesures quant à l'impact d'une surface absorbante sur les réflexions précoces (Figure 5). La comparaison des figures 4 et 5 permet de visualiser facilement quels sont les fronts d'ondes en grande partie absorbés par le panneau de laine minérale.

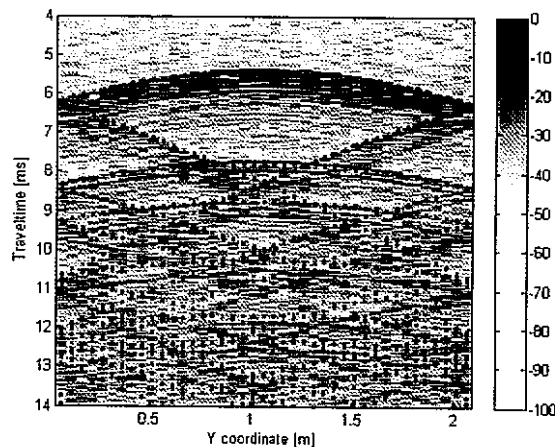


Fig. 4 : Réponse impulsionnelle multi-trace de la salle test. (Echelle : dB rel. max, en abscisse les positions de sondage, en ordonnée les temps de propagation). Les points rouges sont les résultats issus des simulations

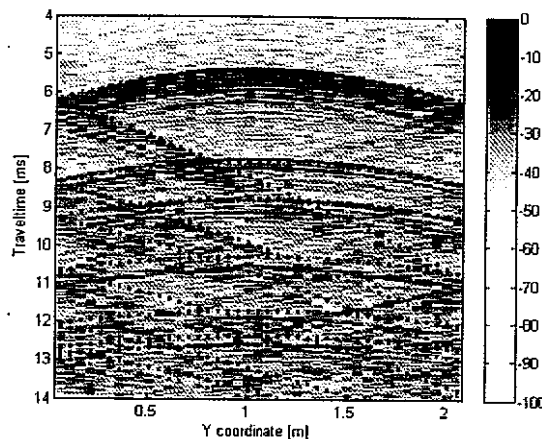


Fig. 5 : Réponse impulsionnelle multi-trace de la salle test avec le panneau de laine de verre sur l'un des côtés intérieurs. (Echelle : dB rel. max, en abscisse les positions de sondage, en ordonnée les temps de propagation). Les points rouges sont les résultats issus des simulations

Commentaires

Ces deux expériences ont permis de mettre en évidence plusieurs points d'importance en vue de l'amélioration de l'algorithme de caractérisation des réflexions précoces dans une salle. Par exemple lorsqu'une source est située à mi-largeur d'une salle rectangulaire, les r.i.m. révèlent une symétrie remarquable indiquant que la mesure des réflexions précoces doit se faire en des lieux de sondage propres à la géométrie de la salle lorsque celle-ci est connue. D'autre part, l'analyse de la r.i.m. assimilable à une mesure du champ sonore des fronts d'onde impose le développement ou l'utilisation :

- d'un module de localisation des réflexions précoces pour une meilleure identification des rayons lorsque leur distribution temporelle est très dense ;
- d'une qualification complète de la chaîne électroacoustique et de ses traitements numériques associés pour la quantification des énergies de chaque contribution acoustique relevée dans les échogrammes ;
- d'un modèle de propagation acoustique ad hoc pour qualifier les performances et les limitations de ce principe de mesure.

En effet, la discrimination spatio-temporelle des fronts d'onde détectés ainsi que leur qualification doit permettre, par reconstruction inverse de leur trajet acoustique, de donner les caractéristiques globales voire locales des surfaces de réflexion identifiées.

Le chrono-goniomètre cubique

L'instrument

Le LEMA a développé et réalisé une antenne cubique composée de huit microphones omnidirectionnels dont les dimensions furent choisies d'une part pour recouvrir la bande de fréquence 400 Hz – 4 kHz, bande utile en acoustique des salles, et d'autre part d'offrir une manipulation aisée in situ (Figure 6). Les microphones sont alimentés par une carte de génération et d'acquisition de type MOTU 896 Mk3. Associée à une source omnidirectionnelle, cette antenne facilement transportable permet une expertise in situ sans contrainte de mise en œuvre supplémentaire au regard des mesures d'échogrammes usuels.

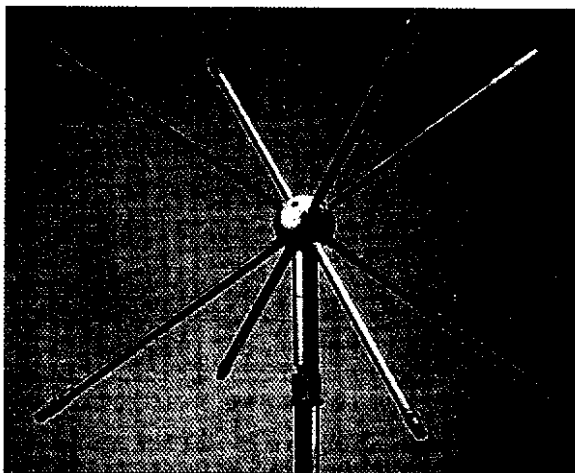


Fig. 6 : Arrangement cubique de microphones et son système de référence

Associé à un algorithme de localisation, cet arrangement cubique permet de mesurer l'incidence d'un front d'onde avec une résolution angulaire inférieure à cinq degrés [3, 8,6]. L'algorithme de pilotage de l'instrument basé sur l'émission, la détection et la localisation nécessite certains paramètres de réglage comme le seuil de détection et la tolérance géométrique. L'ajustement de ces paramètres ainsi que la visualisation des résultats est effectuée dans une même interface qui calcule et délivre :

- les échogrammes associés aux huit microphones ;
- les azimuts et élévations des fronts d'onde localisés ;
- la représentation chrono-goniométrique des résultats ;
- certains indices d'acoustique des salles.

Evaluation dans la salle test

Pour évaluer le chrono-goniomètre, quelques mesures furent effectuées dans la salle test (Figure 3). Selon la géométrie de salle, la source et le chrono-goniomètre ont été placés hors de tout plan de symétrie pour obtenir une dispersion temporelle maximale des réflexions. Un exemple de rayons mesurés et détectés dans l'échogramme est illustré sur les figures 7 et 8.

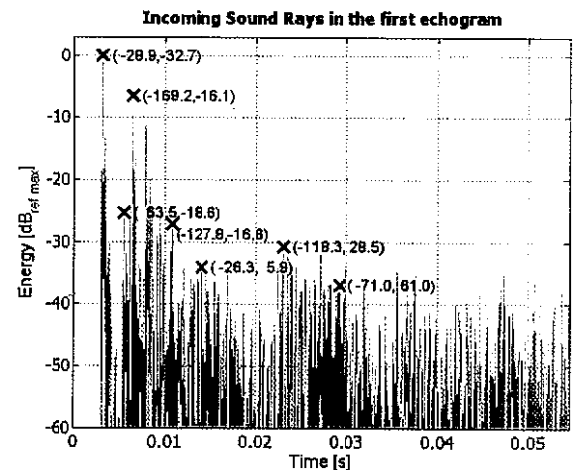


Fig. 7 : Échogramme de la salle test (rouge : le son direct, bleu : réflexions)

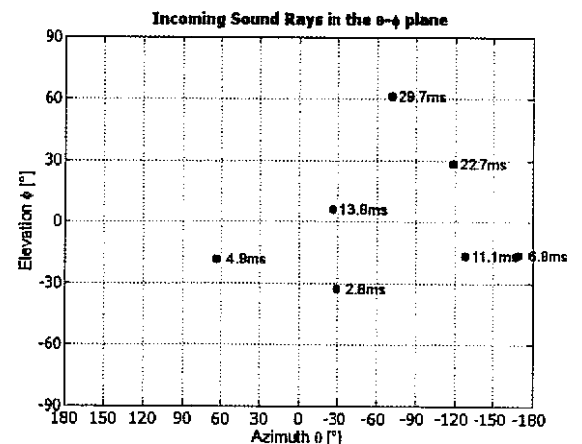


Fig. 8 : Représentation chrono-goniométrique. Azimuts et élévations des échos identifiés dans la salle test (rouge : le son direct, bleu : réflexions)

De ces résultats, on observe que l'instrument détecte et localise sept rayons dont le direct entre la source et l'antenne. La forte densité de rayons dans les cinquante premières millisecondes associée à des émergences relatives faibles entre chaque contribution rend difficile l'extraction et la bonne localisation de l'ensemble des rayons présents dans l'échogramme. Cependant cet exemple met clairement en évidence la possibilité de mesurer simultanément différents rayons acoustiques provenant de réflexions sur toutes les parois de la salle. Dès lors il s'agit par la suite d'améliorer l'algorithme de traitement pour extraire plus d'informations lorsque les échogrammes présentent de fortes densités spatio-temporelles dans une fenêtre de temps courte.

Mesures in situ

L'étude sur les réflexions précoces fut l'occasion d'évaluer son intérêt dans deux espaces de grandes dimensions : l'auditorium Stravinsky de Montreux et la cathédrale de Lausanne. Ces deux espaces ont pour avantage de présenter des échogrammes dont la distribution temporelle des fronts d'onde facilite leur discrimination. Deux résultats succincts sont décrits pour figurer le potentiel de ce principe de mesure in situ.

Détection et localisation de réflexions précoces dans l'auditorium Stravinski

Lors de la conception de l'auditorium Stravinski à Montreux (salle de concert de 1 800 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.

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 sonore pointant vers le chrono-goniomètre cubique.

De par la bonne répartition spatio-temporelle des réflexions mesurées sur la scène entre la source et le réseau de microphones, il est aisé de qualifier la contribution de chaque élément acoustique dans le renfort par réflexions précoces du son direct. La mesure dont les résultats sont illustrés par la figure 10 met en évidence la possibilité 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 réfléchi sur une vague du fond de scène. Ainsi sur ce principe d'analyse spatio-temporelle, la qualification d'un lieu d'écoute (scène, siège, balcon) facilite l'interprétation de l'apport des éléments constituant l'« acoustique » de la salle [6].



Fig. 9 : Auditorium Stravinski, Montreux

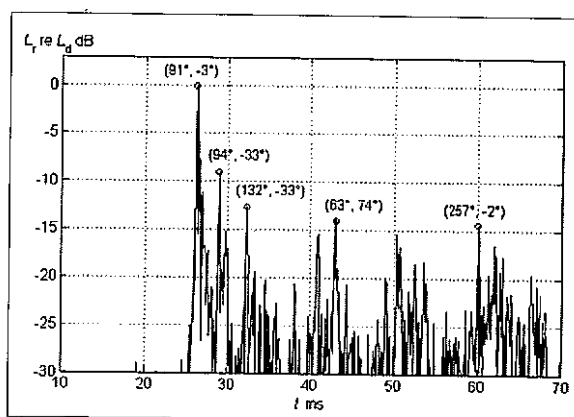


Fig. 10 : Echogramme spatial relevé sur la scène de l'auditorium. Le couple (azimut, élévation) de chaque contribution acoustique identifiée est indiqué

Localisation de pseudo-réflexions dans la cathédrale de Lausanne

Certains problèmes d'acoustique des espaces ne peuvent trouver de solution satisfaisante qu'en recourant à l'installation d'une assistance électroacoustique [6]. 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 une assistance électroacoustique destinée à améliorer le confort d'écoute lors de concerts de musique chorale par la création de contributions artificielles, pseudo-réflexions similaires à des réflexions précoces diffusées via des colonnes de haut-parleurs. Des retards électroniques permettent de faire intervenir ces pseudo-réflexions discrètes en temps utiles pour le public.

Le protocole expérimental repose sur une source de sons 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 une vingtaine de mètres de celle-ci. Les colonnes de haut-parleurs sont, quant à elles, disposées symétriquement sur les piliers délimitant la nef principale.

Les résultats présentés ont été obtenus lorsque seulement l'assistance électroacoustique des cinquièmes colonnes en partant de la scène était active. Sur le relevé spatio-temporel de la figure 12, 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 amplitudes, les instants et directions d'arrivée des réflexions précoces, le chrono-goniomètre permet d'ajuster les paramètres retard et gain à appliquer à l'assistance électroacoustique pour améliorer le confort d'écoute tout en respectant l'image sonore d'origine.

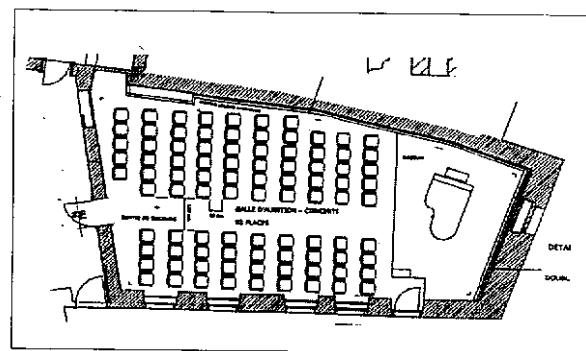


Fig. 13 : Représentation schématique de l'auditoire du conservatoire de musique de la maison Visinand

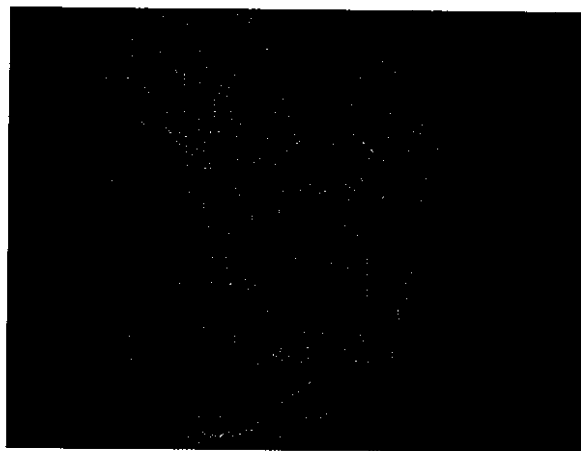


Fig. 11 : La cathédrale de Lausanne

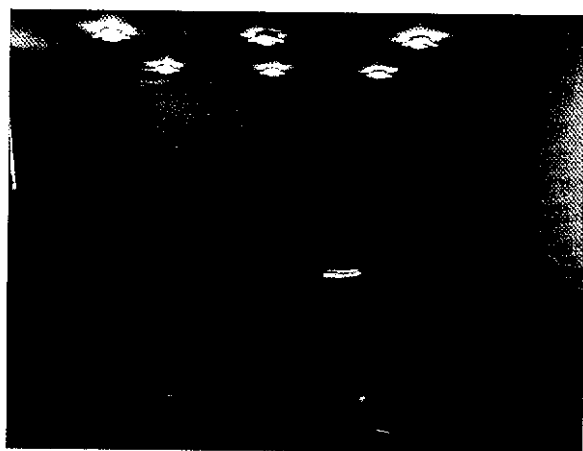


Fig. 14 : Vue de l'auditoire depuis la scène

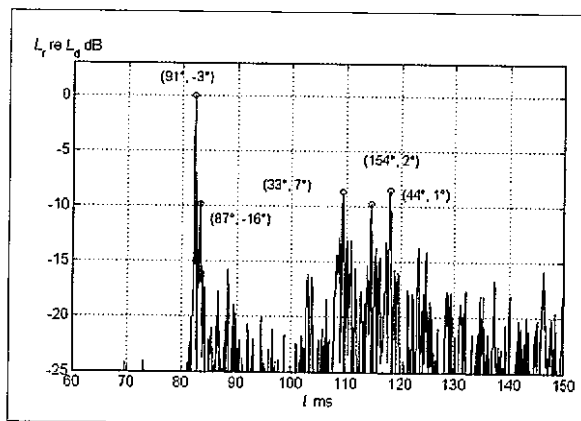


Fig. 12 : Relevé d'échogramme spatial dans la cathédrale avec l'assistance électroacoustique enclenchée

Mesure de la salle d'audition du Conservatoire de Musique de Vevey-Montreux – Maison Visinand

Malgré une géométrie de salle complexe du point de vue de la modélisation, la Maison Visinand à Vevey fut le lieu de mesure permettant d'évaluer l'impact acoustique sur les premières réflexions de rideaux situés côté jardin et au fond de la salle (Figures 13 et 14). La source acoustique est placée sur la scène et le sondage acoustique est effectué en différentes places de l'auditoire.

Les figures 15 et 16 illustrent les échogrammes mesurés sans déploiement des rideaux puis avec les rideaux déployés pour une même place située au milieu de la travée centrale. Tout comme au cours de l'expérience utilisant le réseau linéaire de microphones dans la salle de test, la contribution de rideaux absorbants sur la composition des échogrammes est à nouveau identifiable par la comparaison des mesures avec et sans le déploiement de ces rideaux. Les résultats mettent en évidence une influence attendue des rideaux sur le temps de réverbération.

Dès lors, le calcul de la différence des échogrammes doit permettre d'isoler la contribution des rideaux. Ainsi, par l'analyse de cette différence de niveaux couplée à l'information spatiale issue du chrono-goniomètre, la qualification locale d'une surface absorbante ou d'un ensemble d'éléments absorbants est rendue possible.

Cette hypothèse est validée in situ comme illustré sur la figure 17. Le résidu des échogrammes avec et sans rideaux est principalement constitué des réflexions localisées dont les directions d'incidences correspondent à des réflexions sur le mur et le fond de salle. Dès lors, l'influence de ces rideaux dans le calcul des indices acoustiques peut être estimée pour chaque position d'écoute.

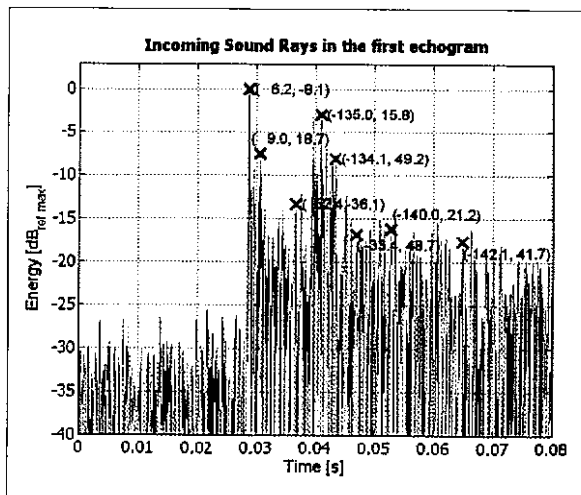


Fig. 15 : Echogramme de l'auditoire de la Maison Visinand sans rideaux - côté jardin

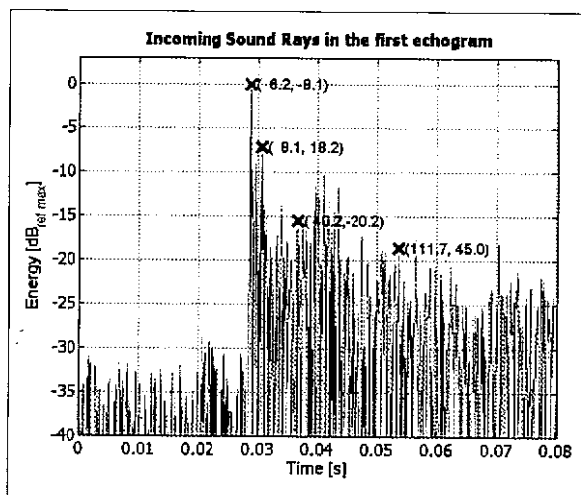


Fig. 16 : Echogramme de l'auditoire de la Maison Visinand avec rideaux - côté jardin

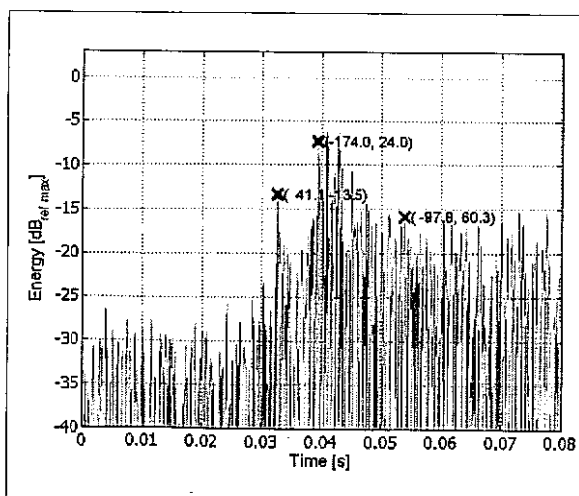


Fig. 17 : Echogramme de la différence entre les échogrammes avec et sans rideaux - côté jardin

Conclusion

La caractérisation acoustique spatio-temporelle des salles, basée sur l'exploitation d'échogrammes multiples mesurés sur un arrangement compact de microphones, présente aujourd'hui un certain nombre d'avantages pour la caractérisation acoustique sur site, d'autant qu'elle ne nécessite pas un équipement complexe comparé à l'instrumentation standard. Cette technique permettrait, entre autres, une identification quasi-instantanée des éléments de la salle contribuant (ou faisant défaut) à une bonne répartition de l'énergie précoce dans la salle, et en faciliterait la correction sur site. Ce principe de mesure a été validé par simulation, puis par expérimentation sur des cas réels : d'abord dans une salle test rectangulaire avec ou sans traitement absorbant de ses parois, puis dans plusieurs salles destinées à l'écoute. Les résultats obtenus ont validé le procédé et ont mis en évidence ses nombreux apports, ainsi que certaines limitations.

Le prototype de chrono-goniomètre réalisé initialement au LEMA pour des applications de localisation passive, et en temps réel, de sources sonores, s'est donc montré capable, en mode actif, de fournir une localisation spatiale des réflexions précoces dans les salles, permettant d'en légitimer l'utilisation pour l'expertise acoustique. Couplée à une interface développée spécifiquement pour l'analyse des échogrammes multiples et l'extraction des angles d'arrivée associés, ce prototype pourrait servir de base au développement d'une nouvelle génération d'instruments de mesure pour l'acoustique des salles.

Références bibliographiques

- [1] ISO 3382-1:2009 «Acoustique – Mesurage des paramètres acoustiques des salles – Partie 1: Salles de spectacles»
- [2] ISO 3382-1:2008 «Acoustique – Mesurage des paramètres acoustiques des salles – Partie 2: Durée de réverbération des salles ordinaires»
- [3] Boulandet, R., «Localisation des premières réflexions dans une salle par chrono-goniométrie acoustique», in 10ème Congrès Français d'Acoustique. (2010): Lyon, France
- [4] Allen, J.B. and Berkley, D.A., «Image method for efficiently simulating small-room acoustics». The Journal of the Acoustical Society of America, 65 (4), p. 943-950, (1979)
- [5] deVries, D. and Hulsebos, E.M., «Auralization of room acoustics by wave field synthesis based on array measurements of impulse responses», in EUSIPCO 2004 XII. European Signal Processing Conference, W. Technische Universität, (2004), Vienna. p. 1377 - 1380
- [6] Rossi, M., «Audio», PPUR, Lausanne, 2007
- [7] Kuttruff H., «Room acoustics», Elsevier Applied Sciences, 3rd Ed. (1991)
- [8] Van Lancker E., «Acoustic goniometry: a spatio temporal approach», PhD Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, (2002)
- [9] Gunel B., «Room shape and size estimation using directional impulse response measurements», in Proc. Forum Acusticum Sevilla, (2002)
- [10] 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).