

Caractérisation acoustique spatiale de salles : étude des premières réflexions

Lukas Rohr¹, Xavier Falourd¹, Mario Rossi, Hervé Lissek¹

¹LEMA, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne

Toute production de musique ou de parole dans un espace clos fait intervenir en amont des questionnements d'acoustique. Pour offrir à l'auditeur des conditions d'écoute optimales, l'acousticien utilise des descripteurs caractérisant le champ sonore. 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.). Ces indices ne suffisent toutefois pas pour des salles à géométrie complexe, particulièrement lorsque les densités et distributions temporelles des rayons d'un 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 des mesures et des simulations. Nous avons simplifié ce problème par la mesure d'échogrammes spatialement distribués : un arrangement de microphones omnidirectionnels, couplé à un modèle source image restreint, permet de tirer profit des informations temporelles et spatiales des rayons détectés. En effet, la discrimination spatio-temporelle ou chrono-goniométrie des rayons détectés permet la reconstruction inverse de leur trajet acoustique. Elle délivre une information globale sur le trajet entre la source et l'arrangement de microphones, et locale, pour les surfaces de réflexion identifiées. Ce principe a été validé par simulation puis par traitement de cas réels : d'abord dans une salle-test rectangulaire avec ou sans traitement absorbant de ses parois, puis dans les salles d'audition d'un Conservatoire de musique et enfin, dans un espace commercial en vue de la production d'un concert classique. Les résultats obtenus valident le procédé et mettent en évidence ses apports, mais aussi les difficultés de mise en œuvre. Enfin, ce principe a été appliqué à la consolidation des valeurs optimales des temps de dispersion des premières réflexions.

1 Introduction

Pour offrir à l'auditeur des conditions d'écoute optimales, l'acousticien utilise des descripteurs caractérisant le champ sonore. 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]. Ces normes précisent selon les salles étudiées différents points de mesures moyennées. Cependant les indices tels que 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.

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 (Figure 1). Pourtant, elle est un atout majeur pour l'acousticien dans la qualification de salles ou de mesures architecturales visant une amélioration de la qualité d'écoute.

2 Localisation de réflexions précoces

Les travaux précédents ont permis de démontrer la possibilité de localisation simultanée de plusieurs réflexions précoces par chrono-goniométrie [3]. La stratégie adoptée quant à la discrimination temporelle et angulaire des

réflexions précoces réside dans la capacité à mesurer les temps de propagation des fronts d'onde sur un arrangement géométrique particulier de microphones. Le procédé algorithmique repose sur la maîtrise de la chaîne électro-acoustique et des calculateurs pour le traitement du signal. Sous l'hypothèse d'une propagation en ondes planes, l'analyse des échogrammes et de leurs combinaisons permet de localiser en azimut et élévation toutes les réflexions du son sur les parois de la salle. L'étude préliminaire sur les réflexions précoces a été menée dans deux espaces de grandes dimensions : la Cathédrale de Lausanne et l'auditorium Stravinsky de Montreux. Ces deux espaces ont pour avantage de présenter des échogrammes dont la distribution temporelle des fronts d'onde facilite leur discrimination.

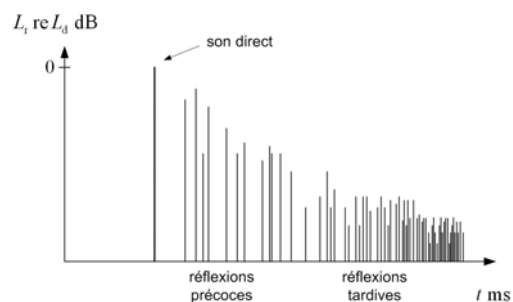


Figure 1 : Echogramme schématisique

La méthode de mesure doit non seulement être applicable à de grands espaces, mais doit être étendue à des auditoriums et des salles plus petites présentant une forte densité de réflexions dans les premières cinquante

millisecondes, nécessitant donc une amélioration des différents modules de calcul. Nous proposons un couplage du module de localisation avec un modèle de sources images tel qu'introduit par Allen & Berkley [4] afin d'augmenter le pouvoir de résolution de l'instrument proposé.

Un tel traitement ouvre donc des perspectives supplémentaires pour les mesures *in situ*. En effet, la discrimination spatio-temporelle des fronts d'onde détectés permettrait par reconstruction inverse de leur trajet acoustique de donner une information globale sur la salle et les caractéristiques globales voire locales des surfaces de réflexion identifiées.

3 Validation expérimentale du modèle source image

L'un des premiers modèles de simulation de la propagation et de réflexion a été proposé par Allen & Berkley en 1979 [4]. Le modèle des sources images 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.

3.1 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 de microphones sur une ligne transversale correspondant à la largeur de la salle. La réponse impulsionnelle est estimée en chaque point de sondage par corrélation entre le bruit blanc émis par la source et le son capté sur chaque microphone. Une telle mesure permet une synthèse de champ sonore par l'analyse des premiers fronts d'onde dus aux premières réflexions sur les parois. Les réponses impulsionnelles relevées sur la largeur de salle sont concaténées formant ainsi la réponse impulsionnelle multi-trace (RIMT) de la salle pour une position de source donnée [5]. Ainsi, les fronts d'onde incidents peuvent être visualisés et analysés par confrontation avec le modèle source image.

L'expérience est menée dans une petite salle semblable en dimensions à un studio mobile de radiodiffusion ; celle-ci est construite en panneaux de bois et de taille 3,40 x 2,10 m (Figure 2). Ainsi l'homogénéité des parois assure un facteur d'absorption moyen permettant l'analyse globale de la salle. De plus, les petites dimensions de la salle permettent d'obtenir une très forte densité temporelle de l'ensemble des réflexions du son visible par échogramme.

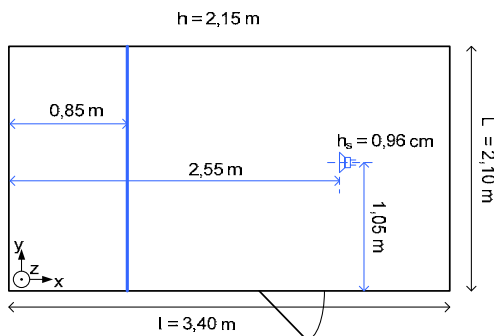


Figure 2: Dimensions de la salle test et positions de la source et de la ligne de mesure microphonique

3.2 Analyse temporelle des premiers fronts d'onde

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 au travers des RIMT mesurés. Le rayon direct est facilement identifiable par son temps d'arrivée et son énergie. Les fronts d'onde à faible nombre de réflexions sont également identifiables de part leur courbure et leurs distributions spatio-temporelles. 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.

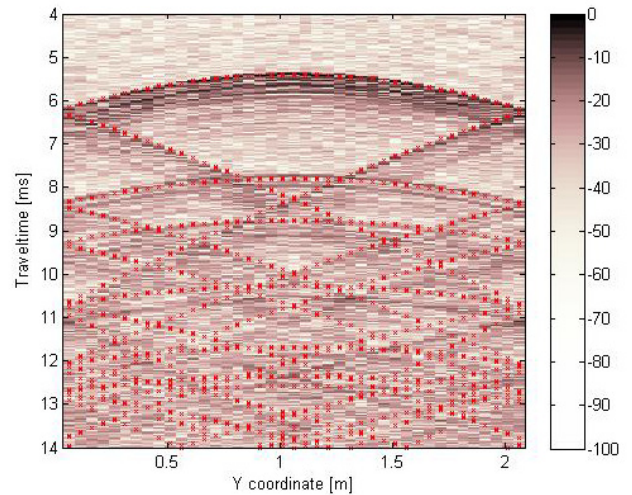


Figure 3 : RIMT de la salle test. (Echelle : dB rel. max, rouge : rayons calculés par simulation)

Un délai de 600 μ s est constaté entre la réponse simulée et la réponse mesurée et peut être imputé aux différents temps de latence présents dans la chaîne de traitement: réponse impulsionnelle de la source, retards de filtres, etc.

La comparaison entre RIMT issus du modèle et de la mesure souligne leur 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.

3.3 Amplitudes des premiers fronts d'onde

L'intérêt est porté sur la mesure des amplitudes des premières réflexions entre source et 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 4).

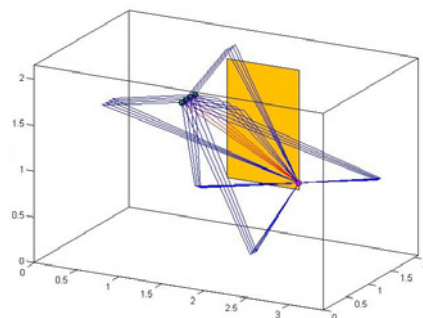


Figure 4 : Synopsis des trajets acoustiques d'intérêt entre la source et les microphones.

La mesure de la RIMT illustre à nouveau la bonne concordance entre les données simulées et les données mesurées quant à l'impact d'une surface absorbante sur les réflexions précoces (Figure 5).

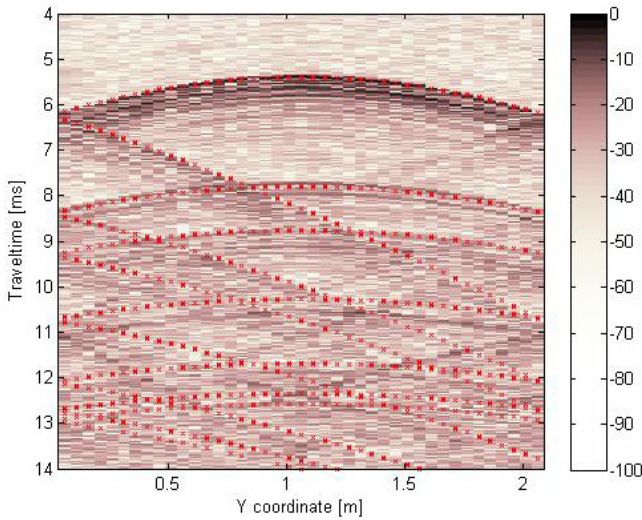


Figure 5 : RIMT de la salle test avec le panneau de laine de verre (Echelle : dB rel. max, rouge : rayons calculés par simulation)

Cependant on observe que la largeur finie du panneau entraine une réflexion partielle sur les positions en bord de salle qui n'est pas visible sur la simulation, puisque le moteur de simulation présume que toute la paroi est dotée du coefficient d'absorption de la laine de verre.

3.4 Commentaires

Ces expériences ont permis de mettre en évidence plusieurs points d'importance en vue de l'amélioration de l'algorithme de caractérisation des premières réflexions.

D'une part l'analyse de la RIMT assimilable à une synthèse du champ sonore pour les premiers fronts d'onde impose l'utilisation d'un modèle de propagation sphérique dans le module de localisation des réflexions précoces. Dans le cas d'une source située à mi-largeur de la salle parallélépipédique, les RIMT révèlent une symétrie remarquable et indiquent les lieux de sondage où la discrimination temporelle des fronts d'onde est la plus aisée. La mesure des réflexions précoces nécessite donc le développement de stratégies de placement des microphones selon les géométries de salle.

D'autre part, la mesure effectuée avec le panneau absorbant indique clairement l'importance de maîtriser la qualification et la quantification des énergies depuis les échogrammes.

Une synthèse du problème direct à l'aide des sources images peut améliorer considérablement notre compréhension sur les performances et limitations d'un instrument. Les données issues de la simulation permettent de prédire dans une certaine mesure les variations des indices acoustiques des salles (STI, EDT, clarté).

4 Le chrono-goniomètre cubique

4.1 L'instrument

Le laboratoire a développé une antenne cubique de huit microphones utilisée lors de précédentes études (Figure 6). 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, 6]. L'algorithme basé sur la mesure des différences des temps d'arrivée d'ondes planes sur les microphones n'est pas adapté aux salles de petites dimensions puisqu'il ne respecte pas l'hypothèse d'ondes sphériques.

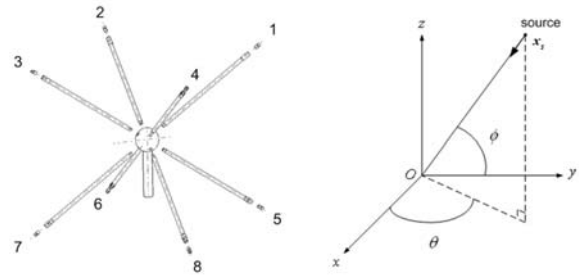


Figure 6 : Arrangement cubique de microphones et son système de référence

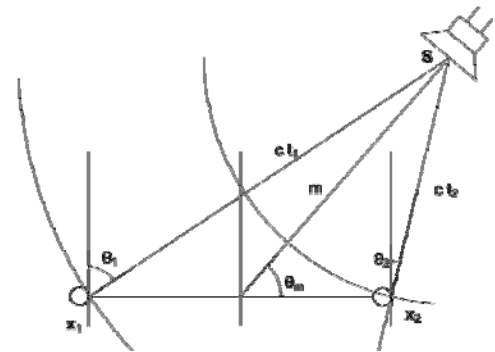


Figure 7 : Théorème de Stewart et localisation

4.2 Le nouvel algorithme de localisation

Suivant le théorème de Stewart, une nouvelle formulation est définie dans le module de localisation autorisant le modèle de propagation sphérique pour toute source en dehors de l'arrangement cubique. De plus la robustesse est améliorée par optimisation d'une contrainte géométrique vérifiant la relation (1). Ainsi un critère sur la relation existant entre les angles d'arrivée relatifs aux quatre paires de microphones portées par les diagonales du cube permet un traitement combinatoire efficace des différents temps de propagation détectés dans les échogrammes. En effet, la géométrie de l'antenne stipule la relation suivante [7]:

$$\sum_{n=1}^4 \cos^2(\theta_{mp}) = \frac{4}{3} \quad (1)$$

Malgré la robustesse ajoutée à l'algorithme de détection et de localisation, certains ensembles de solutions sont toujours rejetés par l'algorithme. Les paramètres de réglage tels que le seuil de détection et la tolérance géométrique permettent d'ajuster les performances de l'algorithme dans certaines limites. Cette nécessité d'ajustement a donné lieu

à l'intégration de l'algorithme dans une interface graphique permettant à l'utilisateur la visualisation immédiate des résultats de mesure pour une prise de décision *in situ*.

4.3 Description de l'interface

L'interface Matlab développée dans le cadre du projet se doit de calculer les paramètres suivants (Figure 8):

- les échogrammes associés aux huit microphones,
- les azimuts et élévations des fronts d'onde localisés,
- la représentation chrono-goniométrique des résultats,
- les indices acoustiques usuels.

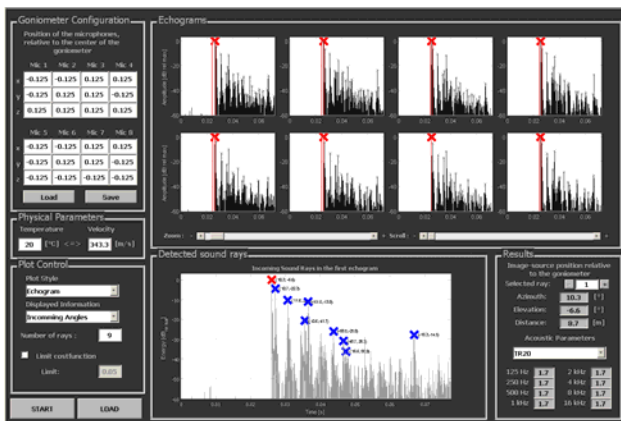


Figure 8 : Interface graphique de contrôle

4.4 Principe de calibration automatique

Afin de caractériser sinon compenser la chaîne traitement, un haut-parleur est situé au centre de l'antenne. Il émet un signal MLS pour d'une part, satisfaire la synchronisation des cartes d'acquisition et de génération, et d'autre part effectuer l'auto-calibration du dispositif électroacoustique.

4.5 Evaluation dans la salle test

Des mesures ont été effectuées dans la salle test (Figure 2) pour tester l'interface. Selon les indications de placement des microphones, la source et le chrono-goniomètre ont été placés hors de tous les plans de symétrie de la salle pour obtenir une dispersion temporelle maximale des réflexions. Les fronts d'onde mesurés et détectés dans l'échogramme sont indiqués sur les figure 9 et figure 10.

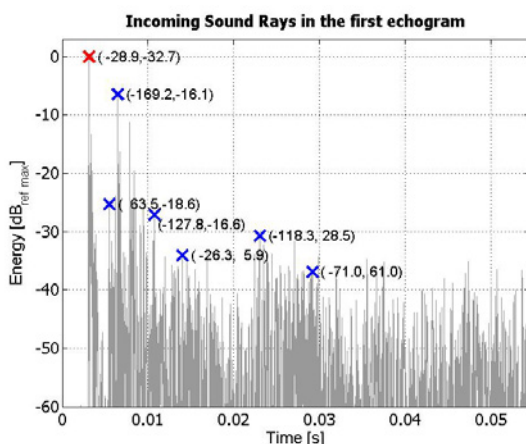


Figure 9 : Echogramme de la salle test

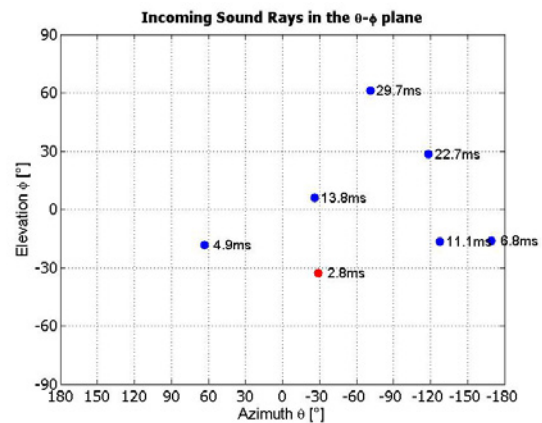


Figure 10 : Représentation chrono-goniométrique. Azimuts et élévations des échos identifiés dans la salle test (rouge : le son direct, bleu : réflexions)

Ces localisations correspondent en partie au rayon direct et aux premières réflexions attendues, mais aussi à de fausses détections. Par contre, on constate que des échos très énergétiques dans l'échogramme ne sont pas assimilés à un front d'onde et que toutes les réflexions de premier ordre ne sont donc pas localisées. Il s'agira ainsi par la suite d'améliorer l'algorithme pour de tels échogrammes.

4.6 Mesure de la salle d'audition du Conservatoire de Musique de Vevey

D'autres mesures ont été effectuées dans la salle d'audition du conservatoire de Vevey. Cependant, nous avons rapidement été confrontés aux limites du système. En effet, la salle d'audition assimilable à un petit amphithéâtre n'est pas de forme parallépipédique (Figure 11).

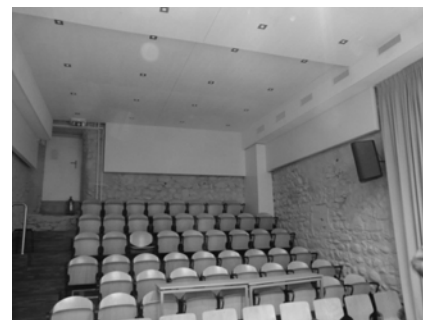


Figure 11 : Salle d'audition du Conservatoire de Vevey

De plus, ses parois présentent une forte rugosité rendant un modèle par sources images inadapté. La diffusion des murs est telle que les réflexions ne sont pas spéculaires. Le mobilier présent dans cette salles génère de nombreux phénomènes de diffraction limitant fortement une interprétation directe des échogrammes si le réseau de microphones est placé dans l'auditoire.

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

Malgré une géométrie de salle non idéale au sens de la modélisation, la Maison Visinand à Montreux fut le lieu de mesure permettant d'évaluer l'impact acoustique sur les premières réflexions de rideaux situés sur un côté et au fond de la salle.

Les figure 12, figure 13 et figure 14 illustrent les échogrammes mesurés sans rideaux, avec rideaux et l'échogramme résiduel respectivement. Il est remarquable sur la figure 14 que le résidu des échogrammes avec et sans rideaux est principalement constitué 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 sur site.

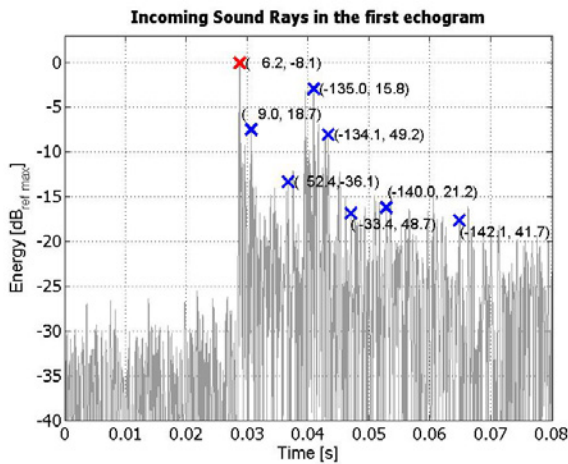


Figure 12 : Echogramme de l'auditoire de la Maison Visinand sans rideaux – côté jardin

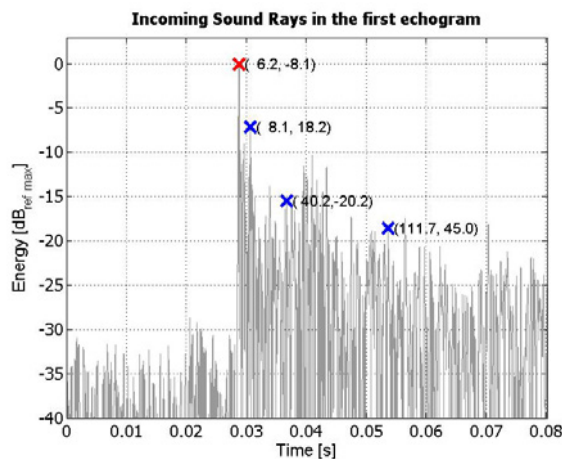


Figure 13 : Echogramme de l'auditoire de la Maison Visinand avec rideaux – côté jardin

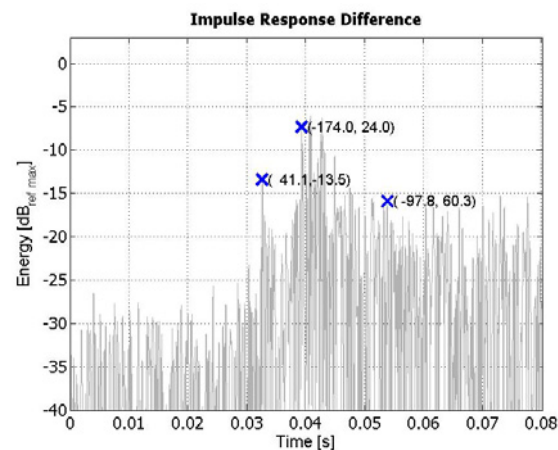


Figure 14 : Echogramme de la différence entre les réponses impulsionnelles avec et sans rideaux – côté jardin

Les résultats mettent en évidence une influence attendue des rideaux sur le temps de réverbération. Ainsi par l'analyse de la différence d'échogrammes couplée à l'information spatiale issue du chrono-goniomètre, la qualification locale d'une surface absorbante ou d'un ensemble d'éléments absorbants semble possible.

Ce principe de mesure pourrait donc être généralisé pour la mesure sur site de tout matériau absorbant en incidence normale et oblique.

5 Conclusion

La caractérisation acoustique spatio-temporelle des salles basée sur l'exploitation d'échogrammes mesurés sur un arrangement compact de microphones présente aujourd'hui un avantage majeur pour la caractérisation sur site des réflexions précoces. Ce principe a été validé par simulation puis par traitement de cas réels : d'abord dans une salle test rectangulaire avec ou sans traitement absorbant de ses parois, puis dans les salles d'audition d'un Conservatoire de musique. Les résultats obtenus valident le procédé et ont mis en évidence ses apports mais aussi les difficultés de mise en œuvre.

Références

- [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] Van Lancker, E., "Acoustic goniometry", in *LEMA*. (2001), EPFL: Lausanne. p. 108.
- [7] Marmaroli, P., "Solutions analytiques de localisation pour le goniomètre cubique", rapport interne, EPFL-LEMA (2009).