

Contrôle du Rayonnement Appliqué à la Synthèse Sonore :

Description de "Synthèse Additive Spatiale"

Nicolas Misdariis, Guillaume Defrance, Olivier Warusfel, René Caussé
 Ircam-CNRS-STMS, 75004 Paris, France, courriel : misdarii@ircam.fr

Résumé

D'une manière générale, la synthèse sonore s'intéresse à la reproduction des caractéristiques spectrales ou au comportement physique d'une source modélisée. Ceci étant, l'étape du rendu sonore se résume le plus souvent à la simple « écoute » d'une ou plusieurs grandeurs associées au modèle, généralement au moyen de systèmes audio traditionnels imposant leurs propres caractéristiques de rayonnement. Après avoir rappelé l'importance de certains indices spatiaux pour l'audition, nous présenterons une méthode qui combine un moteur de synthèse basé sur la modélisation physique et un système de reproduction sonore permettant le contrôle des propriétés de rayonnement associées à l'instrument virtuel issu de la synthèse. En utilisant le formalisme modal, les différents modes rayonnants d'une structure donnée sont synthétisés séparément, puis pondérés par leur fonction de directivité respective, et enfin rayonnés naturellement de manière à prolonger le processus de synthèse jusque dans le milieu de propagation qui réalise alors implicitement la superposition de toutes les composantes du modèle.

Cette approche, dénommée *Synthèse Additive Spatiale* (SAS), est actuellement explorée et illustrée dans le cadre de la synthèse sonore étendue du violon. Une caractérisation vibro-acoustique de l'instrument a été menée respectivement par vélocimétrie laser et antennerie acoustique. L'exploitation de ces deux ensemble de données va permettre, d'une part, de constituer des modèles spécifiques compatibles avec nos outils de synthèse et, d'autre part, grâce à une analyse conjointe, de déterminer les fonctions de rayonnement acoustique des principaux modes de vibration mécanique, c'est-à-dire de définir les modalités de couplage entre ces deux modèles, dernière étape avant la mise en oeuvre pratique du principe de SAS. Les bases théoriques, les méthodes expérimentales ainsi que les résultats obtenus suivant l'avancement des travaux seront présentés et discutés.

Introduction

Pour cette étude, nous partons du principe que la pertinence de simulation d'un instrument de musique dépend à la fois du moteur de synthèse (production) et du moteur de rendu (diffusion). Nous faisons également le constat que les technologies de diffusion actuelles ne prennent pas ou peu en compte les propriétés spatiales du son et nous nous proposons d'intégrer ce degré de liberté supplémentaire dans le cadre générale de la synthèse sonore numérique.

L'étude s'appuie donc, d'une part, sur un moteur de synthèse sonore par modélisation physique basé sur le formalisme

modal, et d'autre part, sur un système de diffusion capable de reproduire un champ acoustique donné en utilisant le principe de décomposition sur la base des harmoniques sphériques. Nous faisons par ailleurs l'hypothèse que le couplage de ces deux éléments permettra une recomposition à la fois spectrale et spatiale des propriétés sonores du modèle, au lieu de réaliser cette synthèse uniquement dans le domaine spectral, comme c'est le plus souvent le cas (par exemple, dans la synthèse additive).

Ainsi, soit un instrument donné, la procédure de travail peut se résumer par les quatre principales étapes suivantes : a) observation expérimentale de l'instrument – à partir d'un ou plusieurs points significatifs du point de vue vibro-acoustique –, b) analyse spectrale et spatiale des mesures pour définir les modes de vibration et leur fonction de directivité associée, c) modélisation mécanique et acoustique à partir des résultats précédents, d) couplage des deux modèles *i.e.* réalisation de la synthèse sonore "augmentée" des propriétés spatiales. Ces différentes étapes sont présentées et détaillées dans la Figure 1.

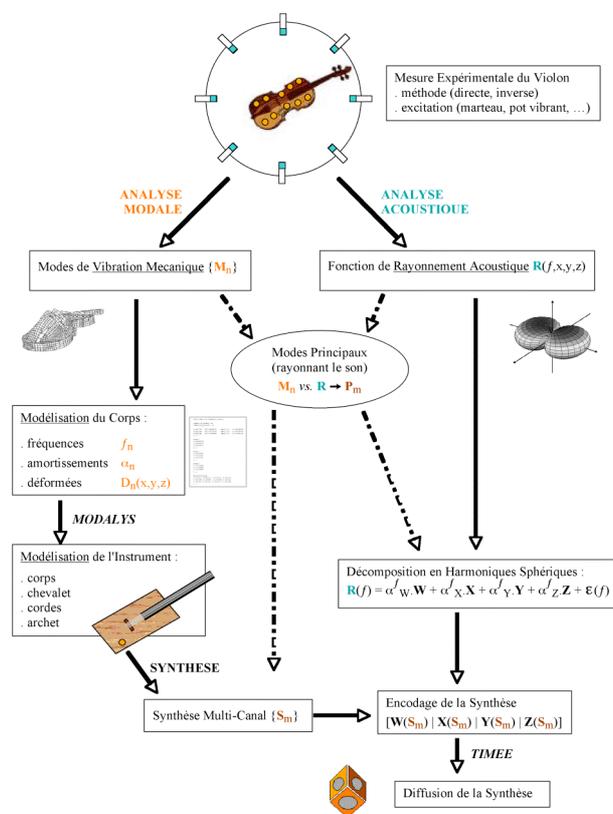


Figure 1: détail des étapes de la Synthèse Additive Spatiale

La SAS pouvant finalement être vue comme un procédé de synthèse spatio-opérationnelle telle que définie dans [0], développé dans le cadre de la synthèse modale et d'une technique de diffusion spécifique.

Outils de l'étude

Synthèse sonore

Le moteur de synthèse sonore retenu pour notre application est *Modalys*, développé par l'Ircam à partir des travaux de J.M. Adrien [1]. Il appartient à la catégorie des synthétiseurs par modélisation physique et possède, en outre, la spécificité de reposer sur le formalisme modal. Ainsi, dans cet environnement, le comportement vibratoire (mécanique ou acoustique) d'une structure est décomposé sur les fonctions de déformations élémentaires de la base modale (modes) et utilise – en faisant l'hypothèse de linéarité – le principe de superposition pour reconstituer la fonction de déformation complexe de la structure. En conséquence, la définition des modèles s'effectue au moyen d'une description modale uniforme : nombre de modes et, pour chacun d'eux, paramètres modaux (fréquence, amortissement et déformée).

Cela étant, l'instrument de synthèse le plus simple dans *Modalys* se compose de trois éléments : deux objets en interaction (excitateur et résonateur) et une connexion définissant cette interaction, dans lequel sont localisées les non-linéarités du modèle. Des procédures annexes, notamment la définition des accès et des contrôleurs, permettent, par ailleurs, de mettre en oeuvre la synthèse (voir [2] et [3]).

Synthèse du rayonnement

Généralités

La technique de reproduction exploite le principe de Huygens (voir §3.1 de [4]) et repose sur une méthodologie classique : décrire sur une même surface entourant la source, la contribution élémentaire de chaque transducteur composant le système ainsi que la fonction spatiale cible à reproduire, puis effectuer une optimisation (au sens mathématique) pour induire le meilleur jeu de filtres qui approxime l'égalisation du champ de pression sur cette frontière. La méthode produisant, *in fine*, un ensemble de filtres correspondant à des fonctions spatiales statiques (voir [5]). La Figure 2 résume ce principe pour un système de N haut-parleurs disposés sur les faces d'un polyèdre régulier.

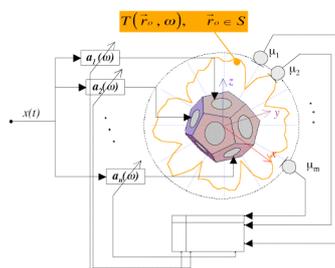


Figure 2: synthèse du rayonnement (principe)

Implémentation et Propriétés

Cela étant, d'un point de vue pratique, cette implémentation "statique" présente de fortes contraintes pour des applications audio et musicales. En effet, d'une part, le jeu de filtres associé à une directivité-cible dépend par nature des propriétés géométriques et acoustiques du système de transducteurs, et d'autre part, les capacités de modification en temps-réel – cruciales pour ce genre d'application –

imposent des procédures d'interpolation de filtres qui conduisent inévitablement à des artefacts de traitement du signal, notamment à cause de la phase des filtres.

Une approche plus pragmatique (issu d'autres applications audio telles que Ambisonics ou l'implémentation multi-canal du rendu binaural [6]) consiste à synthétiser en permanence un sous-ensemble de directivités élémentaires à partir desquelles une directivité composite sera ensuite reconstruite au moyen, cette fois-ci, d'un simple jeu de gains. La procédure s'effectue alors en deux étapes : encodage de la directivité sur un format multi-canal intermédiaire, puis décodage spécifique au système de reproduction, utilisant les filtres adaptés à la technologie et au type de décomposition spatiale choisis. Nous nous attacherons ici à la famille des harmoniques sphériques, chacun des filtres de décodage étant calculé suivant la procédure décrite précédemment (voir "Généralités") en considérant l'harmonique sphérique concernée comme directivité-cible à approximer (voir [7]).

Globalement, cette implémentation présente deux avantages majeurs : indépendance de l'encodage vis-à-vis du système de reproduction et possibilité de traiter plusieurs voies simultanément (à coût de calcul quasi-constant), avec, notamment pour conséquence directe, le contrôle de la directivité en fonction de la fréquence (Figure 4). Ce qui, considérant le fait que les instruments de musique présentent presque tous cette propriété, nous relie directement au sujet de cette étude : la *Synthèse Additive Spatiale*.

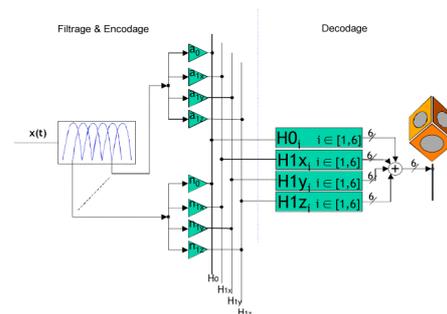


Figure 3: synthèse du rayonnement (contrôle de la directivité en fonction de la fréquence)

Objet de l'étude : le violon

Présentation

Le violon fait l'objet de multiples recherches depuis de nombreuses années et ses caractéristiques ont été étudiées de manière approfondie tant sur le plan fonctionnel (voir [11]), mécanique, acoustique que du couplage entre comportement vibratoire et rayonnement. Nous mentionnons ici certains des résultats obtenus, en grande partie à la lumière de trois références majeures dans le domaine ([8], [9], [10]).

Du point de vue mécanique, dans une expérience impliquant un marteau d'impact frappant le chevalet et un accéléromètre placé sur 190 points de mesure, Marshall [8] met évidence 35 modes propres entre 100 et 1330 Hz. Il les classe, en outre, en 3 grandes catégories : i) les modes de flexion (B), ii) les modes de cavité (A), iii) les modes de plaque (P). Certains de ces principaux modes sont répertoriés dans la colonne 1 du Tableau 1 (voir "Premiers résultats").

Du point de vue acoustique, Weinreich [9] démontre, dans une expérience mettant en jeu le principe de réciprocité, le comportement du violon globalement omnidirectionnel en basse fréquence (100 - 1000 Hz) et très fortement dépendant de la fréquence au-delà de 1 kHz. Il en déduit, par ailleurs, d'éventuelles conséquences sur la perception auditive de l'instrument, comme par exemple, sa capacité "d'éclairer" la salle à chaque note différente jouée au-delà de cette limite.

Expérience préliminaire

Dans une phase préliminaire de l'étude, une mesure acoustique du violon a été réalisée par la méthode inverse, en utilisant le paradigme expérimentale de Weinreich [9]. Le violon a donc été sondé de manière indirecte en plaçant le récepteur (cellule piézo-électrique) au niveau du chevalet et en scrutant l'espace au moyen d'un émetteur (système Tannoy 600) délivrant le signal d'excitation (voir [12]).

Outre une évaluation des paramètres (fréquence et amortissement) de certains modes propres, cette première expérience a permis de confirmer le principe de décomposition du champ de pression sur la base des harmoniques sphériques et a mis en évidence l'effet de troncation : d'une part la prédominance de la composante monopolaire en-dessous de 700 Hz confirme le comportement omnidirectionnel du violon en basses fréquences, d'autre part la comparaison entre le spectre de puissance évalué à partir des mesures et celui reconstruit après décomposition montre qu'au delà de 1.8 kHz, les ordres supérieurs seront nécessaires pour décrire le champ acoustique rayonné (Figure 4).

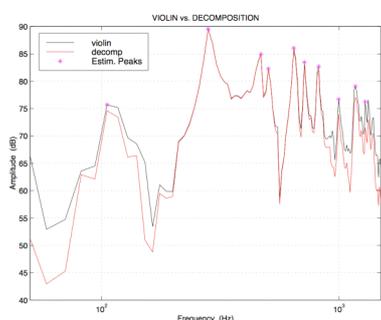


Figure 4: spectre de puissance du violon mesuré (noir) et reconstruit (rouge) à partir des harm. sphér. d'ordre 0 et 1.

Cette première approche s'est cependant avérée incomplète dans la mesure où les données recueillies ne permettaient pas de décrire correctement un modèle physique associé, et notamment de caractériser les déformées modales.

Dispositif expérimental

Un protocole expérimental a donc été mis en oeuvre pour réaliser des mesures vibratoires et acoustiques comparables. Dans les deux cas, la partie "excitatrice" de la chaîne de mesure est constituée d'un pot vibrant B&K 4810, relié à l'interface RME FireFace 800 d'un Macintosh PowerBook doté de l'environnement Max/MSP dans lequel est généré le signal d'excitation : un sinus glissant balayant la plage 20Hz - 22 kHz (échelle logarithmique, 185 msec.). Par ailleurs, une micro-perforation est réalisée sur chacun des pieds du chevalet pour recevoir la pièce métallique, supposée rigide,

effectuant la liaison entre le pot vibrant et le violon. Enfin, le violon est maintenu en position par deux pinces situées au niveau de la base du cordier et de la volute (Figure 5).



Figure 5: violon dispositif expérimental

Mesures vibratoires

Les mesures vibratoires ont été effectuées en chambre calme au moyen d'un vélocimètre laser Ometron VH300+. Elles s'effectuent sur un maillage préalablement matérialisé par des pastilles réfléchissantes sur les deux parties principales du violon : la table d'harmonie (199 points) et le fond (203 points). Pour chaque point, l'observation est répétée plusieurs fois jusqu'à obtenir un indice de focalisation satisfaisant, au sens des préconisations du vélocimètre (au minimum, 3 diodes vertes allumées).

Mesures acoustiques

Les mesures acoustiques ont été effectuées en chambre sourde, au moyen d'un banc de microphones à électret (marque Monacor, type MCE2000) disposés en arc de cercle. Le violon est situé au centre d'un appareillage mécanique automatisé, constitué d'une table tournante B&K assurant les déplacements dans le plan horizontal (0/360°) et d'un bras assurant les déplacements dans le plan vertical (0/90°) (Figure 5) : ainsi, en n'opérant qu'un seul retournement, les deux parties du violon peuvent être caractérisés sur une sphère complète entourant la source. Par ailleurs, l'échantillonnage spatial de cette mesure est imposé par l'écartement des microphones sur l'antenne : 7.5°.

Premiers résultats

Dans un premier temps, une analyse fréquentielle est réalisée sur l'ensemble des réponses impulsionnelles du maillage (échantillonnage à 48 kHz, FFT sur 4096 points) et la recherche des modes propres de vibration s'effectue en recoupant les données spectrales de déformation de plusieurs points caractéristiques de la structure (exemple, Figure 6).

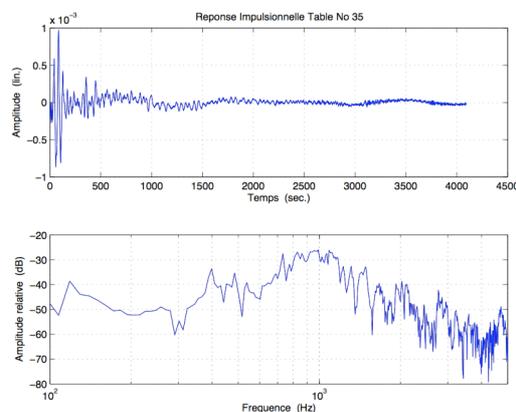


Figure 6: exemple de réponse impulsionnelle (en temporel et en fréquentiel) au point N° 35 du maillage de la table

Les résultats, pour la plupart d'entre eux, sont placés dans le Tableau 1, en regard de ceux de Marshall [8].

Marshall [8]	Freq. mesurées	Marshall [8]	Freq. mesurées
163.2 (B)	151	574.1 (B)	600
187.3 (B)		656.1 (P)	
225.0 (B)		665.6 (B)	670
278.2 (A ⁰)	269	690.8 (P)	690
303.4 (B)	300	760.3 (B)	780
410.5 (P)	388	839.5 (A ³)	840
434.9 (B)	420	882.0 (B)	900
466.1 (B)	460	930.1 (P)	926
470.8 (P)		1173.5 (B)	1170
478.2 (A ¹)	495	1273.1 (P)	1260

Tableau 1: fréquences propres, recoupement biblio. (Hz)

Concernant la mesure de rayonnement, une synthèse des résultats peut s'illustrer par le produit de la décomposition en harmoniques sphériques à l'ordre 0 et 1 (Figure 7) où l'on retrouve globalement la prédominance du rayonnement monopolaire en basses fréquences et l'émergence des contributions dipolaires à partir d'environ 700 Hz.

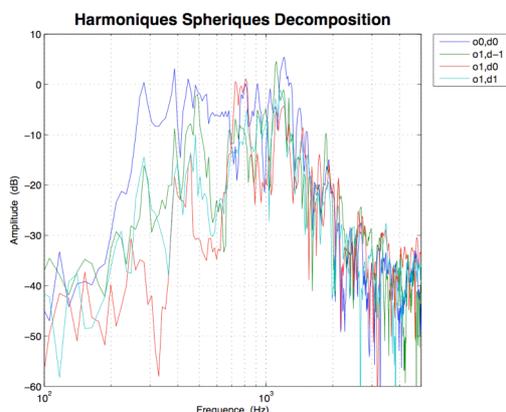


Figure 7: décomposition en harmoniques sphériques (ordre 0 et 1) du champ de pression rayonné par le violon.

Perspectives

En terme d'analyse, ces premiers résultats doivent bien évidemment être affinés et complétés, notamment en considérant le comportement de la caisse du violon non contrainte, *i.e.* sans l'action couplée du chevalet et des cordes. Ils permettent néanmoins de franchir une étape supplémentaire dans le processus de *Synthèse Additive Spatiale*. Les points restant à traiter avant d'atteindre notre objectif consiste, d'une part, à exploiter l'intégralité des données vibratoires pour construire un modèle de violon cohérent dans *Modalys*, et d'autre part, à examiner les relations entre modes de vibration et modes de rayonnement afin de sélectionner les modes mécaniques qui interviennent de manière prépondérante dans les propriétés acoustiques de l'instrument. Nous pourrions alors jouer séparément les modes propres les plus pertinents en terme d'énergie acoustique rayonnée, pondérés par leurs composantes dans la base des harmoniques sphériques, comme illustré Figure 8.

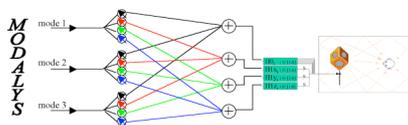


Figure 8: procédure générale de *Synthèse Additive Spatiale*

Conclusion

Cette étude porte sur le développement d'une procédure de couplage d'un moteur de synthèse par modélisation physique avec une technologie de diffusion sonore capable de reproduire les composantes spatiales d'un champ acoustique.

Nous avons décrit l'approche générale ainsi que les premiers résultats consécutifs à sa mise en oeuvre, le but final étant de réaliser une *Synthèse Additive Spatiale*, à la place d'une "simple" synthèse "additive" réalisée uniquement dans le domaine spectral.

Références

- [0] Topper D. Burtner M. Serafin S., « Spatio-Operational Spectral (S.O.S.) synthesis » DAFx, 5th International Conference on Digital Audio Effects, Hamburg, Germany, 2002.
- [1] Adrien J. M., « Etude de structures complexes vibrantes, applications à la synthèse par modèles physiques », thèse de doctorat, Université de Paris VI, Paris, 1988.
- [2] Adrien J. M., « The missing link : modal synthesis », in G. De Poli, A. Picalli, and C. Roads eds., *Representations of Musical Signals*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.
- [3] Eckel G., Iovino F., Caussé R., « Sound synthesis by physical modelling with *Modalys* », ISMA, International Symposium on Musical Acoustics, pp 478-482, Dourdan, France, 1995.
- [4] Nicol R., « Etude de la restitution du son spatialisé dans une zone étendue : application à la téléprésence », thèse de doctorat, Université du Maine, 1999.
- [5] Warusfel O., Derogis P., Caussé R., « Radiation synthesis with digitally controlled loudspeaker », 103rd Convention of the Audio Eng. Soc., New-York, 1997.
- [6] Jot J.-M., Wardle S., Larcher V., « Approaches to binaural synthesis », 105th Convention of the Audio Eng. Soc., 1998. [preprint 4861]
- [7] Misdariis N., Warusfel O., Caussé R., « Radiation Control on a Multi-Loudspeaker Device », ISMA, International Symposium on Musical Acoustics, 2001.
- [8] Marshall K. D., « Modal analysis of a violin », *Journal Acoust. Soc. of America*, vol. 77 (2), 1985.
- [9] Weinreich G., « Directional tone color », *Journal Acoust. Soc. of America*, vol. 101 (4), 1997.
- [10] Bissinger G., « Contemporary generalized normal mode violin acoustics », *Acta Acustica*, vol. 90, pp 590-599, 2004.
- [11] Jansson E., « Acoustics for violin and guitar makers - Chapter VII : the function of the violin », KTH, Dept of Speech, Music and Hearing, 4th edition, 2002.
- [12] Vos H. J., Warusfel O., Misdariis N., de Vries D., « Analysis and reproduction of the frequency spectrum and directivity of a violin », *Nederlands Akoestisch Genootschap journal*, n° 167, sept. 2003.