

# Le contrôle de la directivité par un système multi haut-parleurs

## – Applications –

N. Misdariis, O. Warusfel, R. Caussé, F. Nicolas

IRCAM

1, place Igor Stravinsky - 75004 PARIS - France

[misdarii@ircam.fr]

### Résumé

*A partir d'une précédente étude relative à la reproduction du son par un système multi haut-parleurs, une nouvelle méthode a été développée, en se basant sur les réseaux tri-dimensionnels de transducteurs et la constitution d'un ensemble de directivités de base. Cette architecture permet de contrôler la nature et la direction du rayonnement et, grâce à des optimisations, offre une gestion en temps réel et simultanée de plusieurs sources. Une maîtrise indépendante des caractéristiques spectrales et spatiales offre, en outre, des possibilités intéressantes quant à la reproduction des instruments de musique et permet d'entrevoir des perspectives d'applications dans le domaine de la synthèse sonore. Enfin, cette approche, impliquant d'une manière nouvelle le système de diffusion sonore dans l'œuvre musicale, traduit une volonté de renouveler le dialogue entre instruments acoustiques et partie électronique qui sont souvent amenés à "combattre" dans les productions musicales contemporaines.*

### Mots-clés

*Synthèse du rayonnement, spatialisation, reproduction d'instruments, synthèse sonore.*

## Introduction

Le contrôle de la directivité représente un nouvel enjeu dans le processus de diffusion des sons. En effet, si les technologies actuelles permettent un ajustement précis des caractéristiques de timbre et de niveau sonore – le cas échéant, au moyen de modules de traitement de signal numérique –, elles n'offrent que très peu de latitude en terme de contrôle des données spatiales (directivité) et ne permettent donc pas d'imposer un rayonnement adapté au signal diffusé par le système. A fortiori, dans un espace clos tel qu'une salle de concert, ces propriétés de rayonnement jouent un rôle fondamental puisqu'elles déterminent la distribution temporelle et spectrale de l'onde acoustique arrivant aux oreilles de l'auditeur : c'est, en partie, ce qui permet de mieux distinguer un piano réel et un son de piano diffusé par une enceinte, mis à part les problèmes de distorsion et de bande-passante inhérents au système de haut-parleurs.

Le contrôle de la directivité implique donc une nouvelle architecture, basée sur le principe des réseaux multidimensionnels de transducteurs. Si plusieurs voies ont déjà été explorées à ce sujet, elles ont plutôt eu pour objectif commun de s'affranchir de l'effet de salle en focalisant l'information sonore en un point de l'espace, soit par des systèmes hyper-directifs [1] [2], soit par des systèmes holophoniques [3]. La présente étude propose une démarche différente dans la mesure où elle vise justement à restituer, ou du moins contrôler, la manière dont les sources sonores interagissent avec la salle.

## Méthodes de reproduction

**Approche "statique".** Le cadre théorique générale de cette étude a fait l'objet d'un travail de thèse [4] [5] et peut se résumer de la manière suivante.

Considérons une source acoustique  $T$ , délimitée par un domaine  $D$ , et rayonnant une pression  $T(\vec{r}, \omega)$  dans un domaine  $V$  extérieur à  $D$ . Les lois de la propagation acoustique nous permettent d'affirmer que le rayonnement de la source  $T$  est entièrement déterminé par la connaissance de la pression (amplitude et phase) sur une surface arbitraire  $S$  entourant  $D$  (fig. 1).

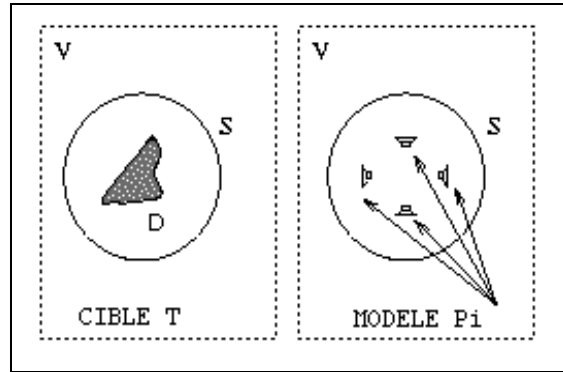


Figure 1. Reproduction du rayonnement

De fait, si l'on remplace la source  $T$  par une source  $P$  générant exactement le même champ de pression sur la surface  $S$ , on est alors assuré que le champ rayonné par les deux sources sera identique dans tout l'espace extérieur  $V$ . Si de plus, la source  $P$  est une source composite constituée de  $N$  sources élémentaires produisant chacune le champ de pression  $P_i$ , la condition précédente peut se traduire par une décomposition de la pression  $T$  sur l'ensemble des  $\{P_i\}$  suivant la relation :

$$\sum_{i=1}^N a_i(\omega) \cdot P_i(\vec{r}_0, \omega) = T(\vec{r}_0, \omega) \quad , \forall \vec{r}_0 \in S \quad (1)$$

où les  $\{a_i\}$  sont des valeurs complexes dépendant de la fréquence  $\omega$ .

Ceci étant, puisque les  $\{P_i\}$  ne constituent pas, à priori, une base du problème, l'existence et l'unicité des  $\{a_i\}$  ne sont pas assurées et la solution de l'équation (1) ne peut être que le résultat d'une approximation. L'une des méthodes d'optimisation consiste à interpréter cette équation comme une distance algébrique entre la source-modèle  $P$  et la source-cible  $T$ , les coefficients  $\{a_i\}$  étant alors obtenus numériquement, par minimisation de cette grandeur.

Il en résulte un jeu de coefficients complexes dépendant de la fréquence – c'est-à-dire des filtres – qui, appliqués respectivement à chaque source  $P_i$ , reproduisent au mieux le champ de pression visé. Par nature même de la méthode, les relations d'amplitude et de phase entre les filtres doivent être scrupuleusement respectées, c'est pourquoi leur implémentation comporte un module commun d'égalisation (IIR) et une partie résiduelle de filtrage (FIR) capable de modéliser ces différences mutuelles (fig. 2).

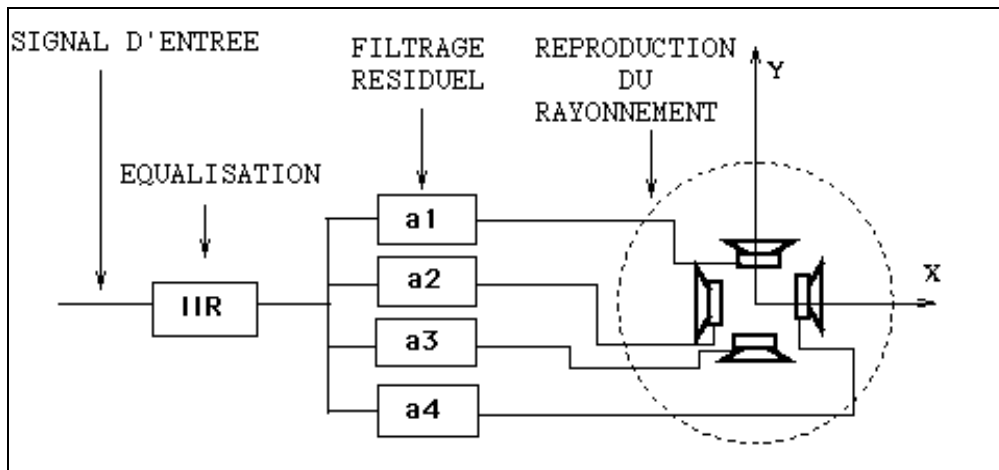


Figure 2. Implémentation du traitement du signal

**Approche "modale"**. Une approche dérivée consiste à relâcher les contraintes sur la fidélité de reproduction au profit d'une plus grande pertinence musicale (facilité de contrôle, interactivité, continuité...), induisant du même coup des problèmes d'interpolation de figures de directivité, et donc de filtres. Pour ce faire, nous proposons une nouvelle méthode d'implémentation basée sur une simplification du principe précédent.

Au lieu de considérer des directivités indépendamment les unes des autres, on constitue un ensemble de directivités élémentaires qui, combinées entre elles, permettront de construire une fonction de rayonnement, avec un degré d'approximation donné. Ces "entités de rayonnement" élémentaires sont choisies dans la base des harmoniques sphériques ce qui confère à la méthode son aspect "modal" puisque tout champ de pression est une combinaison linéaire infinie des vecteurs de cette base et que, dans ce cas précis, la décomposition se limite aux premiers "modes" de propagation.

En pratique, les directivités de base sont le monopole (H0) ainsi que le dipole (H1) et l'une des harmoniques sphériques d'ordre 2 (H2), dans les trois directions de l'espace (fig. 3a). La combinaison des ces figures fournissent un contrôle du rayonnement selon deux critères : la nature et la direction d'émission. Par ailleurs, les problèmes d'interpolation de filtres sont en partie résolus par le fait que toutes les directivités élémentaires sont en permanence générées par le système, le contrôle ne s'opérant uniquement qu'au moyen de gains pondérateurs. Cette description synthétique possède, en outre, l'avantage de pouvoir traiter en parallèle plusieurs signaux d'entrée sans multiplier le coût de calcul : chaque directivité étant assignée par un jeu de gains différent, avant mixage de tous les signaux (fig. 3b).

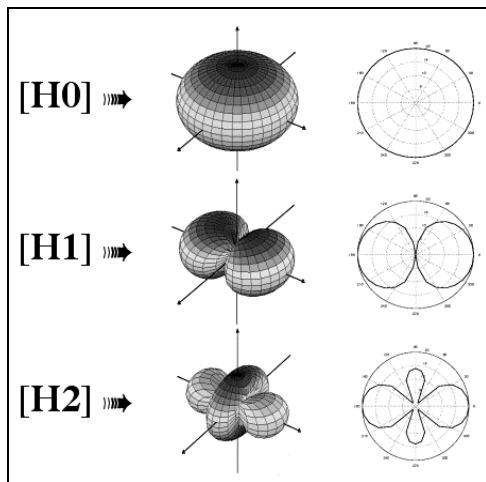


Figure 3a. Directivités élémentaires

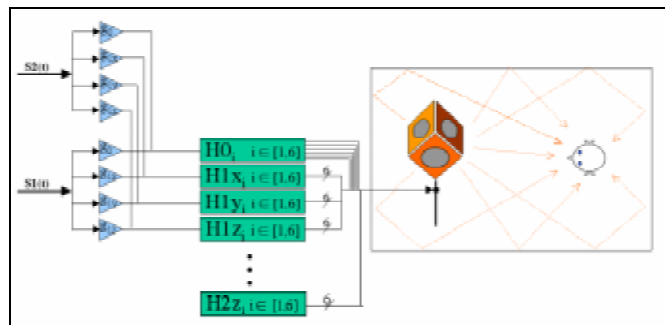


Figure 3b. Nouvelle implémentation

Afin de valider la méthode, plusieurs prototypes ont été conçus sur la base d'une structure cubique équipée d'un haut-parleur indépendant sur chacune des faces. De plus, pour tenter de minimiser le phénomène de repliement spatial inhérent aux réseaux de transducteurs, un prototype multi-voies a également été élaboré et constitue le développement le plus récent du projet. Dans ce cas précis, la structure cubique est dupliquée trois fois dans les dimensions relatives aux basses, moyennes et hautes fréquences (fig. 5), ce qui permet à chacune des sous-structures de travailler quasiment toujours en-dessous de la fréquence de coupure au-delà de laquelle les lobes de directivité parasites apparaissent.

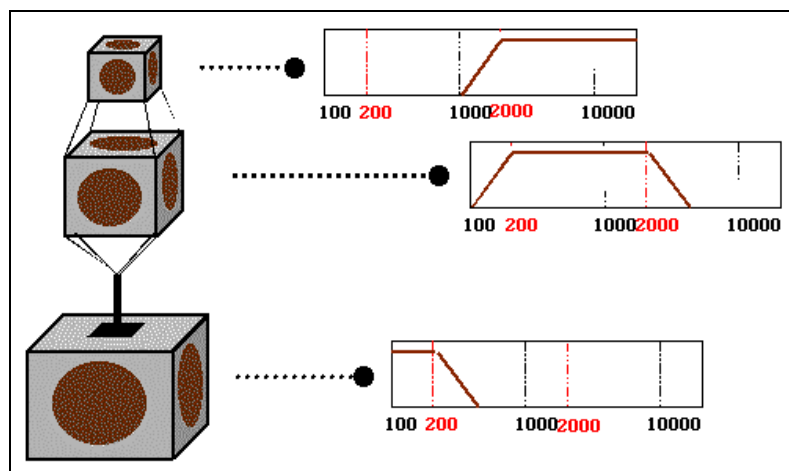


Figure 5. Prototype multi-voies

**Résultats.** Les performances des prototypes sont examinés en terme d'égalisation, de fidélité de reconstruction du champ sonore et de caractérisation objective du point d'écoute.

Des premières mesures en champ diffus atteste d'une égalisation en puissance satisfaisante pour le système multi haut-parleurs (fig. 6). Ce résultat a pour principale conséquence de considérer la source spectralement "neutre" vis-à-vis du signal d'entrée et donc d'assurer une cohérence de timbre quel que soit le rayonnement imposé : dès lors, les modifications spectrales perçues entre deux directivités différentes (par exemple, le monopole et le dipole) sont uniquement dues aux propriétés acoustiques du rayonnement.

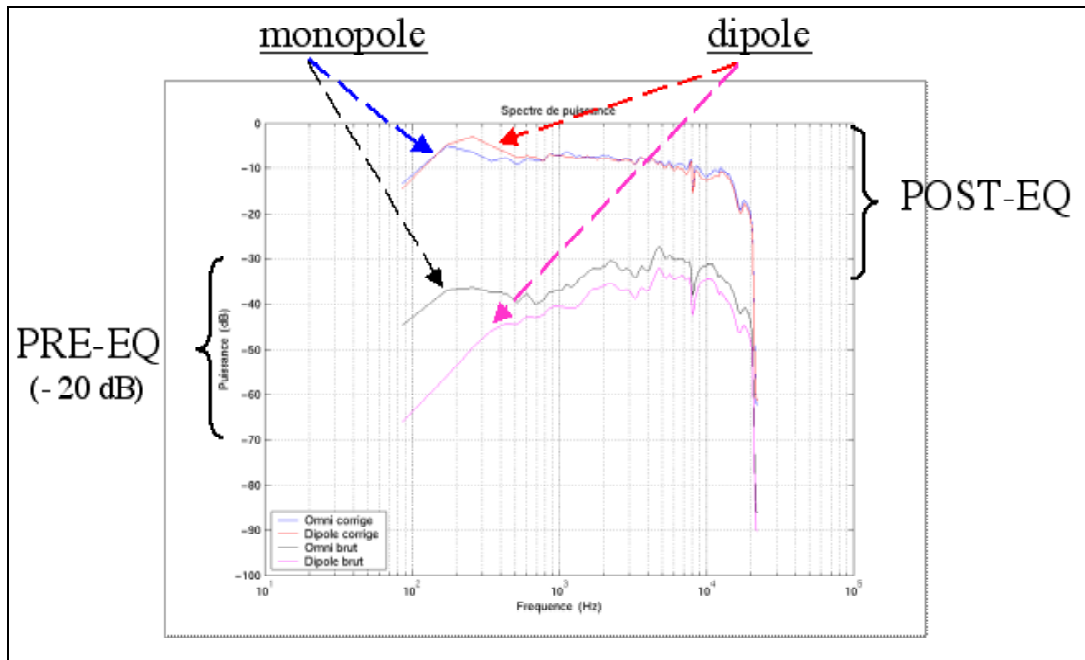


Figure 6. Egalisation en puissance de H0 & H1

Des mesures plus complètes en chambre sourde, nous permettent ensuite de mesurer la qualité de reproduction des figures élémentaires (fig. 7a : monopole, fig. 7b : dipole) sur une grande partie de la bande passante du système. Les résultats sont également satisfaisants et la comparaison entre les différents prototypes fait apparaître le gain obtenu grâce à l'approche multi-voies qui repousse effectivement les limites du repliement – et donc de la dégradation de la reproduction – en dehors de la bande passante utile de chacune des sous-structures.

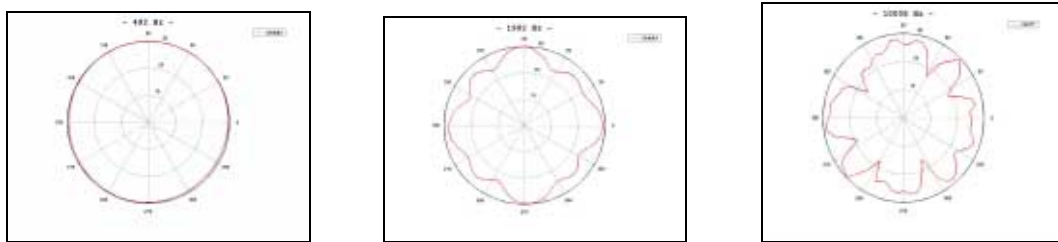


Figure 7a. Reproduction de H0 @ 500 Hz, 2000Hz & 10000 Hz

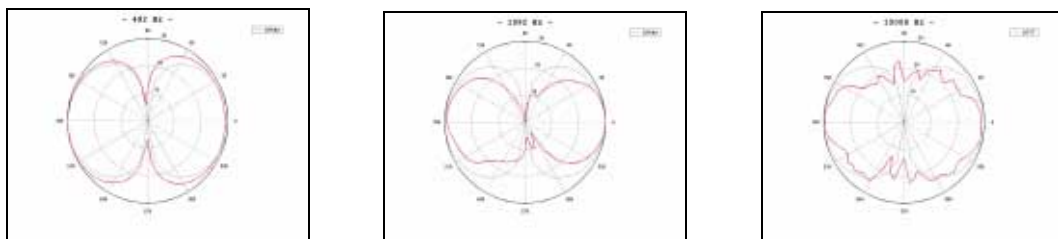


Figure 7b. Reproduction de H1 @ 500 Hz, 2000Hz & 10000 Hz

Enfin, une caractérisation objective au point d'écoute a été tentée afin d'interpréter physiquement les effets spatiaux produits et de vérifier l'efficacité des figures de directivité élémentaires. Pour ce faire, les réponses impulsionnelles de chacune d'entre elles sont mesurées et analysées en terme de distribution spatio-temporelle de l'énergie acoustique.

La figure 8a représente l'évolution temporelle de l'énergie frontale mesurée avec un microphone cardioïde pointant la source : cette première analyse met nettement en évidence la carence tardive de l'énergie frontale pour le dipole vertical et latéral. La figure 8b, quant à elle, montre le rapport de l'énergie frontale à l'énergie latérale, celle-ci étant mesurée au moyen d'un microphone bi-directionnel. De manière prévisible, le dipole frontal donne la meilleure localisation de la source, supporté en cela par les premières réflexions. Le dipole latéral présente, au début de la réponse, un rapport faible entre énergies frontale et latérale ce qui a pour conséquence de produire une sensation de source élargie et d'enveloppement de la salle. Quant au dipole vertical, en dépit d'un faible son direct, il fournit la sensation de source étroite à cause d'un équilibre tardif entre l'énergie frontale et l'énergie latérale. Notons, par ailleurs, que toutes ces propriétés sont aisément détectables à l'écoute, robustes à la reproduction et faiblement dépendantes de la salle : elles permettent donc d'assigner des identités perceptives pertinentes aux sons produits ou diffusés par le dispositif.

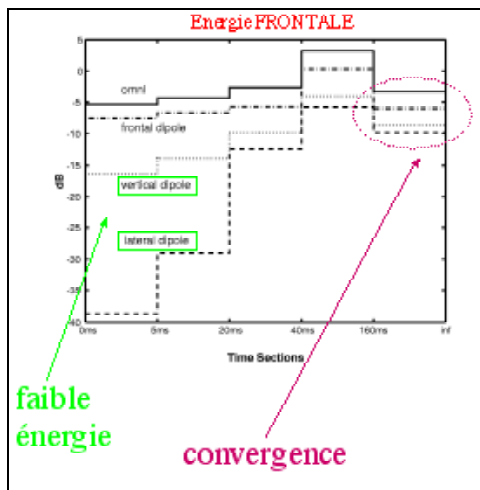


Figure 8a. Energie frontale

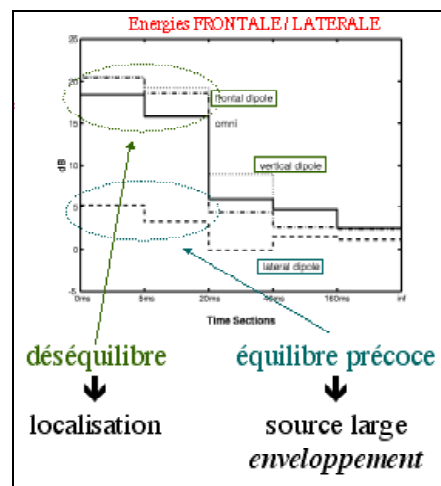


Figure 8b. Energies frontale/latérale

## Une nouvelle instrumentalisation de la musique mixte

**Problématique.** Dans le contexte actuel de la musique, une grande partie des œuvres tendent à faire co-exister des sons acoustiques provenant d'instruments de musiques *live* et des sons électroniques synthétiques ou transformés qui sont diffusés par un système électro-acoustique. De plus, dans la plupart des cas, les instruments sur scène – y compris les voix – doivent être eux-mêmes amplifiés pour rivaliser en puissance avec la partie électronique. Enfin, le système de diffusion est généralement constitué d'une ceinture de haut-parleurs entourant l'auditoire, imposant une acoustique propre, en s'affranchissant totalement de la salle existante.

Pour toute ces raisons, la cohésion entre les parties acoustiques et électroniques d'une même œuvre musicale peut apparaître difficile, voire illusoire. C'est pourquoi, l'approche proposée dans la présente étude visant à considérer un système de diffusion sonore localisé, jouant avec l'espace architectural plutôt que le contraignant, et qui, à l'image d'un instrument de musique, possède des propriétés de rayonnement spécifiques – et dans le cas présent, modulables – peut sembler une alternative à cette problématique de la musique mixte.

**Possibilités sonores et musicales du dispositif.** Dans cette optique, une collaboration étroite avec le compositeur François Nicolas a permis d'explorer les potentialités sonores et musicales de la méthode ; l'un des points-clés du travail étant de vérifier si les attributs spatiaux liés au rayonnement des sources sonores pouvaient constituer un vocabulaire musical à part entière.

Pour cela des outils spécifiques (enveloppes temporelles, fonctions aléatoires, contraintes, ...) ont été développés afin de tester les différentes possibilités – aussi bien statiques que dynamiques – d'utiliser le système. Ainsi, de nombreux exemples ont été créés dans le but de formaliser, et dans la mesure du possible notifier, les effets auditifs obtenus dont voici trois illustrations : le morphing de directivité qui, au cours du jeu, transforme la directivité d'un instrument de musique ou d'un évènement sonore (fig. 9a) ; le contrepoint spatial qui assigne des directivités à des flux rythmiques ou mélodiques d'une partition (fig. 9b) ; le portrait cubiste qui, à partir d'éléments échantillonnés et grâce à des traitements de directivité, donne à percevoir un instrument de musique sous un angle de vue particulier (fig. 9c).

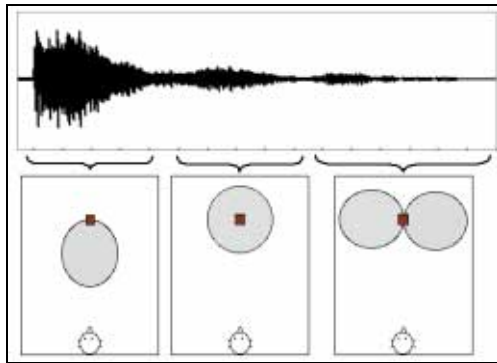


Figure 9a. Morphing de directivité

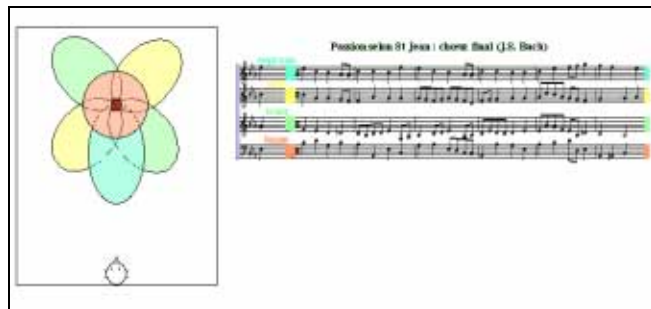


Figure 9b. Contrepoint spatial

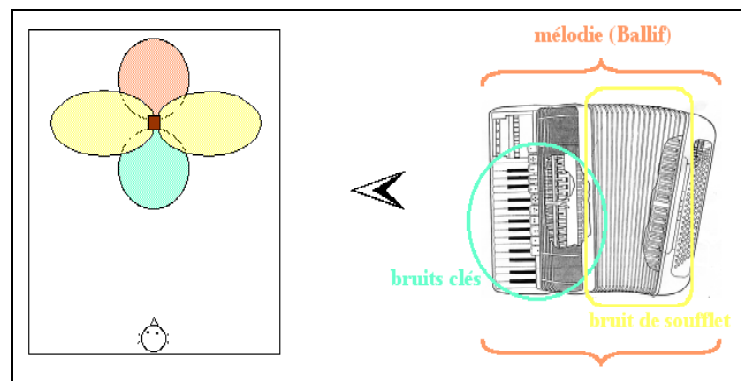


Figure 9c. Portrait cubiste

**Premières performances.** Cette collaboration s'est finalement concrétisée par une création de François Nicolas : *Duelle*, œuvre pour piano, violon, voix et électronique dans laquelle la diffusion de la partie électronique est assurée un dispositif multi haut-parleurs à directivité contrôlable, nommé pour l'occasion Timée (en rapport au Timée de Platon). Le matériau sonore utilisé pour cette pièce est constitué de séquences échantillonnées correspondant à différents instruments : ceux présents sur scène, mais aussi des voix parlées, la flûte, le clavecin et le grand orgue. S'il peut paraître paradoxal de postuler une approche alternative de la musique mixte par une œuvre n'utilisant que des instruments (*live* ou enregistrés), c'est qu'en fait le caractère mixte dans *Duelle* n'est pas – d'après les propos mêmes du compositeur – un mixte de sonorités (instrumentales / synthétiques), ni un mixte d'instruments (acoustiques / électroniques) mais un mixte quant aux manières de concevoir l'instrumentalité musicale : un mixte d'instrumentalisation.

Suite à cette première expérience, une seconde œuvre impliquant la Timée est en cours d'écriture : *Five Imaginary Spaces* (Oliver Schneller), œuvre pour piano et électronique. Du fait de l'instrumentarium choisi et de la nature du matériau sonore développé dans la partie électronique, la Timée est ici employée dans l'optique d'un prolongement / extension de l'instrument plutôt que dans celle précédente qui l'assimile davantage à un "générateur" d'images instrumentales.

## Une nouvelle simulation de l'instrument de musique

**Contrôle indépendant du timbre et de la directivité.** Dans le cas précis de la simulation d'un instrument de musique, il apparaît également intéressant de pouvoir contrôler indépendamment les contributions spatiales et spectrales de la diffusion. Pour cela, outre le fait de doter le dispositif d'une pondération des directivités

élémentaires en fonction de la fréquence, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la reproduction du spectre de puissance rayonnée par un instrument de musique. C'est en effet cette grandeur moyenne, prenant en compte globalement toutes les directions de l'espace, qui détermine, pour la plus grande part de l'auditoire, la perception du timbre des sources placées sur scène.

Pour ce faire, nous utilisons une technique traditionnelle d'analyse de la puissance acoustique (en milieu réverbérant) adaptée à une salle de concert quelconque [6]. Une gamme chromatique jouée par l'instrument est utilisée comme signal de référence et est enregistrée en champ lointain par un microphone bi-directionnel placé de telle manière à réduire au maximum la captation du champ direct. L'estimation du temps de réverbération et la prise en compte d'une fonction d'égalisation du microphone permettent de calculer une estimation de la puissance rayonnée par l'instrument. A titre d'exemple significatif, la figure 10a montre les spectres de puissance pour différents jeux d'un clavecin.

Ceci étant, une prise de son en champ lointain ne pourrait en aucun cas constituer le signal d'entrée de notre dispositif puisqu'elle contient également toute l'information de la salle. Nous devons donc calculer une correction entre champ proche et champ lointain afin d'utiliser une prise de son rapprochée. Ce filtre correcteur est directement issu de la fonction de transfert entre le spectre de puissance estimé précédemment et le spectre émis par l'instrument en situation "anéchoïque" ; la figure 10b donne un exemple de cette correction dans le cas de la flûte. Le signal capté en champ proche peut alors venir "alimenter" le dispositif de reproduction à directivité contrôlable qui, puisqu'il a été préalablement égalisé en puissance (voir précédemment), restituera au mieux les propriétés spectrales "moyennes" de l'instrument étudié tout en gardant toute sa latitude quant aux caractéristiques spatiales (rayonnement) de l'ensemble.

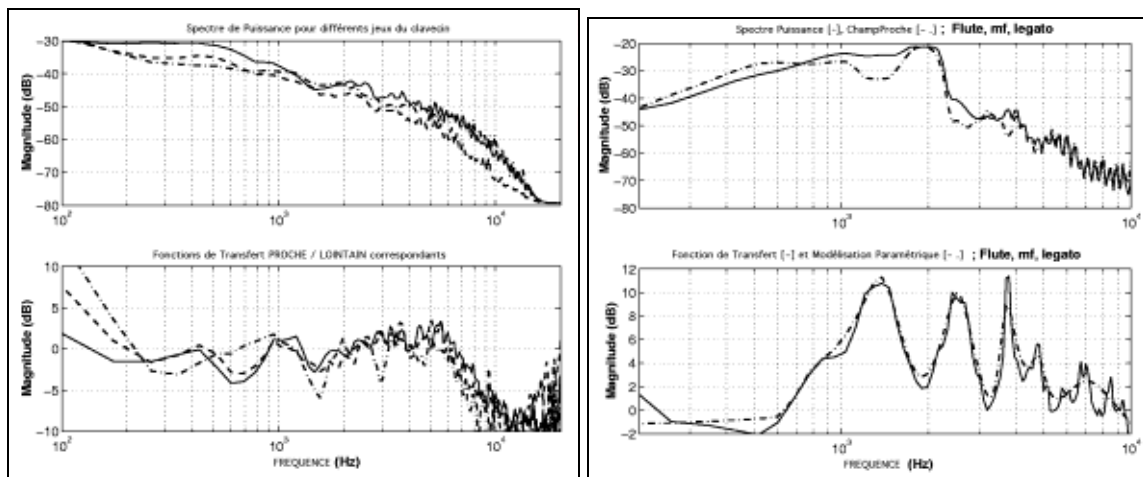


Figure 10a. Haut- spectre de puissance de différents jeux de clavecin ;  
Bas- fonction de transfert champ lointain / champ proche.

Figure 10b. Haut- spectre de puissance [-] et spectre en champ proche [- -] de la flûte.  
Bas- Fonction de transfert [-] et sa modélisation paramétrique [- -].

**Vers une synthèse sonore "augmentée".** Ce complément à la méthode de contrôle du rayonnement développée précédemment a démontré ses capacités sur des instruments comme le clavecin ou la flûte. Dans le cadre d'une utilisation généralisée à la reproduction sonore, il nous paraît intéressant d'étudier son efficacité sur des instruments plus complexes comme le piano qui pose, encore aujourd'hui, des problèmes de rendu sonore réaliste.

Par ailleurs, en projetant une perspective d'application plus large, il semble également pertinent d'associer cette approche à une application dédiée à la synthèse sonore. En effet, selon la technique utilisée, un moteur de synthèse sonore va soit reconstituer les caractéristiques spectro-temporelles du signal (synthèse de type signal), soit reproduire des échantillons pré-enregistrés (synthèse par échantillonnage), soit calculer les variations de grandeurs physiques liées à l'instrument (synthèse par modélisation physique). La plupart du temps, les modes de rayonnement ne sont pas pris en compte et sont finalement délégués aux systèmes de diffusion traditionnels. Le dispositif de contrôle du rayonnement tel qu'il est développé dans la présente étude pourrait ainsi constituer un prolongement naturel et fonctionnel à de nombreux synthétiseurs qui se verraient, de fait, "enrichis" d'une dimension spatiale supplémentaire.

En ce qui concerne le piano, des études ont été ébauchées dans deux directions différentes. D'une part, coupler un piano numérique (échantillonneur) au système de reproduction en développant des interfaces de contrôle en temps-réel spécifiques afin, dans un premier temps, de restituer l'image spatiale de l'instrument, puis, dans un second de temps, de proposer des extensions pouvant constituer de nouveaux modes de jeu de

l'instrument ; un peu à l'image de l'organiste qui, en modifiant ses jeux, change également la position et la nature des sources sonores actives (tuyaux) et, du même coup, le rayonnement global de l'orgue. Et d'autre part, travailler dans l'environnement de synthèse sonore par modélisation physique Modalys qui semble propice à une approche de ce genre. En effet, conceptuellement, le logiciel est d'ores et déjà capable de modéliser un piano, c'est-à-dire, un marteau qui frappe une corde reliée à une table d'harmonie via un chevalet. Cependant, ce modèle implique pour l'instant de nombreuses simplifications, tant au niveau du marteau que du type d'interaction – frappée – ou bien encore de la prise en compte du doublet ou du triplet de cordes pour certains registres de l'instrument. Ceci étant, et quelle que soit la précision du modèle, la sortie de Modalys délivre un signal relatif à la vibration des résonateurs (vitesse) – comme si l'instrument était écouté via un microphone de contact posé sur la table d'harmonie – sans que la propagation de cette grandeur jusqu'à un point d'écoute donné ne soit modélisée. On imagine alors aisément le rôle que pourrait jouer le dispositif de contrôle du rayonnement dans la modélisation de ce couplage fluide-structure. Selon l'avancement des travaux, les résultats obtenus dans ces deux axes de recherche seront détaillés et, dans la mesure du possible, "joués" lors de la présentation.

## **Conclusion**

Une précédente étude a posé les bases théoriques et expérimentales d'une procédure visant à reproduire une figure de directivité donnée au moyen d'un dispositif multi haut-parleurs. A partir de ces résultats, une étude dérivée a été explorée dans le but de proposer une approche plus musicale du contrôle du rayonnement. Pour ce faire, une nouvelle méthode a été développée et validée sur différents prototypes : elle repose sur un réseau de transducteurs tri-dimensionnels et sur la constitution d'un ensemble de directivités élémentaires issues de la base des harmoniques sphériques. Cette architecture "originale" donne la maîtrise de deux paramètres d'espace : la nature et la direction d'émission de l'onde sonore. En outre, grâce à une implémentation optimisée, le dispositif autorise également un contrôle en temps-réel ainsi que la gestion simultanée de plusieurs signaux d'entrée. Il offre enfin la possibilité de restituer le spectre de puissance rayonné indépendamment des caractéristiques spatiales, ce qui constitue un atout supplémentaire pour la simulation d'un instrument de musique.

D'un point de vue musical, le système tente de répondre à une nouvelle approche de la musique mixte – mêlant sons acoustiques et synthétiques – en concevant un système de diffusion sonore sur le modèle de l'instrument de musique : localisé et possédant une fonction de rayonnement propre. Cette démarche tente finalement de replacer sur un même plan les instruments *live* et la partie électronique diffusée qui se livrent le plus souvent un combat inégal.

Dans le cadre plus restreint de la reproduction d'un instrument de musique, le dispositif de contrôle du rayonnement, grâce à ses capacités techniques relatives au spectre de puissance, permet d'entrevoir des associations intéressantes avec différentes techniques de synthèse sonore : des plus traditionnelles (échantillonnage), aux plus avancées (modélisation physique). Dans tous les cas, le système apparaît comme un prolongement possible des synthétiseurs qui, à l'heure actuelle, ne prennent en compte que très rarement la dimension spatiale du son.



## **Références**

- [1] Jacob, K. D., Birkle, T. K., "Prediction of the full-space directivity characteristic of loudspeaker arrays", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. **38(4)**, 1990, pp 250-259.
- [2] Pompei, F. J., "The Use of Airborne Ultrasonics for Generating Audible Sound Beams", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 47, 1999, pp. 726-731.
- [3] De Vries, D., "Sound enhancement by wave field synthesis : adaptation of the synthesis operator to the loudspeaker directivity characteristics", *Proc. 98<sup>th</sup> Audio Eng. Soc. Convention*, 1995, Paris, France.
- [4] Derogis, P., "Analyse des vibrations et du rayonnement de la table d'harmonie d'un piano droit et conception d'un système de reproduction du champ acoustique", *PhD thesis*, 1997, Université du Maine (Le Mans, France).
- [5] Warusfel, O., Derogis, P., Caussé, R., "Reproduction of directivity patterns using multi-loudspeaker sources", *Proc. 103<sup>rd</sup> Audio Eng. Soc. Convention*, 1997, New-York, USA.
- [6] Jot, J. M., Cerveau, L., Warusfel, O., "Analysis and synthesis of room reverberation based on statistical time-frequency model", *Proc. 103<sup>rd</sup> Audio Eng. Soc. Convention*, 1997, New-York, USA.

