

# APPROCHE DE LA SYNTHÈSE PAR FRONTS D'ONDE (WFS), UTILISANT UNE ANTENNE À FAIBLE DENSITÉ

*Raymi Nicolas Morales*

Doctorant, Université de Paris 8, MSH Paris Nord  
CICM/Laboratoire MUSIDANSE.  
Université des Arts, Guayaquil, Équateur  
raymi.morales@uartes.edu.ec

*Anne Sedès*

Université de Paris 8, MSH Paris Nord  
CICM/ Laboratoire MUSIDANSE,  
Saint-Denis, France  
anne.sedes@univ-paris8.fr

## RÉSUMÉ

La Synthèse par fronts d'onde permet une distribution de sources sonores virtuelles dans l'espace ayant une interprétation cohérente sur une zone étendue de l'espace de reproduction. Cependant, dans sa conception normale, elle nécessite une grande quantité d'équipements et de puissance de calcul. Cette recherche analyse un montage plus simple utilisant une antenne à faible densité et rendant ainsi le système plus accessible.

## 1. INTRODUCTION

Actuellement, le système de spatialisation du son le plus répandu et utilisé est le système stéréophonique, qui se base sur une illusion perceptive [1] appelée « source fantôme » [2], en utilisant majoritairement l'indice interaural d'intensité (ILD). Ce système est extrêmement simple et efficace mais il présente un certain nombre de défauts, dont on citera les suivants :

- L'interprétation n'est correcte que dans un espace réduit appelé « sweet spot », ce qui empêche une correcte interprétation pour une partie des auditeurs en condition d'écoute collective ou quand l'auditeur se déplace dans l'espace de reproduction en dehors du sweet spot [3].

- Les sources peuvent uniquement être placées suivant une ligne droite entre les enceintes [4] (on a alors éventuellement recours à l'aide d'une coloration et/ou effet de salle pour donner une sensation de profondeur).

C'est pourquoi il existe toute une série de recherches et développements autour de la diffusion du son pour améliorer la qualité de reproduction spatiale. On peut citer le VBAP/VBIP [5][4], Binaural, Ambisonique/HOA, WFS.

Selon DANIEL [11], « Dans un contexte d'expérience d'écoute très général, l'ITD (Différence interaurale de temps) est un indice plus prégnant que l'ILD ». Rayleigh et Middlebrooks défendent également la « Duplex theory » [12] qui explique que « la localisation du son à basses fréquences repose sur des différences de phase au niveau des deux oreilles, ou ITD, et que la localisation à hautes fréquences repose sur des différences interaurales de niveau sonore (ILD). » [13]. C'est pourquoi nous avons jugé important d'utiliser le principe

de la WFS, qui en reconstruisant les fronts d'onde exploite à la fois l'ILD et l'ITD, et présente des caractéristiques qui favorisent l'écoute collective en créant une localisation cohérente des sources dans une zone étendue de l'espace de reproduction.

Parmi les contraintes de la WFS il y a la complexité de sa mise en place ainsi que la quantité d'équipements nécessaires, ce qui en limite l'accessibilité pour la majorité des créateurs sonores. C'est pourquoi, dans le cadre de cette recherche nous avons réalisé le montage d'une antenne [4] à faible densité d'enceintes, afin d'en analyser le comportement et les limites, puis en déduire les possibilités de création et les enjeux artistiques.

## 2. WFS

### 2.1 Principe

La Synthèse de fronts d'onde se base sur le principe de Huygens [4] pour recréer des variations de pression acoustique que générerait une source primaire [6] ou source virtuelle [7] [1], à l'aide d'une ceinture d'enceintes situées tout autour de l'espace de reproduction.

Les principaux avantages de la WFS sont :

- La restitution sonore spatialisée de manière homogène sur une zone étendue de l'espace de reproduction
- Le déplacement de la source virtuelle en profondeur, en l'éloignant au-delà du plan de positionnement de l'antenne d'enceintes ou en la focalisant à l'intérieur de l'espace de reproduction [6].

Chaque source secondaire est alimentée par un signal préalablement traité, modifiant le contenu spectral, l'amplitude et le retard. Les filtres utilisés pour générer les signaux qui alimentent les haut-parleurs sont ceux présentés par [8] et [9] utilisant la synthèse par modèle physique *Model-based Rendering* [8].

Pour réaliser la synthèse de fronts d'onde on utilise une ceinture d'enceintes situées tout autour de l'espace de reproduction, ce qui génère des ondes cylindriques et non pas sphériques. C'est pourquoi on doit réaliser une correction dans la loi d'atténuation et se placer dans le cas de « 2.5D » [3] [10]

## 2.2 Discrétisation et Aliasing

Selon l'équation de Kirchhoff-Helmholtz [4], pour pouvoir reconstruire correctement les fronts d'onde pour tout le spectre il est nécessaire d'avoir une densité infinie de sources secondaires [10]. Or, dans l'état de l'art actuel, il n'est pas possible d'obtenir une ligne continue de sources secondaires. La reconstruction des fronts d'onde est donc correcte jusqu'à la fréquence d'aliasing donnée par la relation suivante [4] :

$$f_{al} = \frac{c}{2\Delta \sin \alpha_{max}}$$

Dans le cadre de cette recherche on se place dans la situation d'une antenne à faible densité pour en étudier le comportement, en utilisant une antenne avec 8 enceintes théoriquement omnidirectionnelles espacées de 40 cm. Ce qui nous donne une fréquence d'aliasing de 430 Hz pour une source frontale et 860 Hz pour une source à 45°.

Cette approche implique que les fronts d'onde ne sont correctement reconstruits qu'en basses et moyennes-basses fréquences. On s'éloigne donc du concept original de la synthèse de fronts d'onde vu que la plus grande partie du spectre n'est pas correctement synthétisée.

C'est pourquoi au-dessus de la fréquence d'aliasing il se produit des interférences qui génèrent des filtres en peigne qui peuvent être identifiables. Pour résoudre ce problème on peut introduire des décorrélations temporelles [4] pour les fréquences au-dessus de la fréquence d'aliasing et ainsi générer un léger effet de salle

Cependant on peut utiliser les principes de la WFS sur une antenne espacée pour en obtenir des résultats perceptifs intéressants quant à la distribution et localisation spatiale des sources sonores.

## 3. LOGICIEL DE SYNTHÈSE

Le cahier des charges de cette recherche inclut une grande accessibilité du système. C'est pourquoi nous avons développé un logiciel de traitement multiplateforme qui sera prochainement en libre accès sous forme d'une bibliothèque d'objets qui pourra être intégrée au sein d'une multitude d'environnements de programmation sonore.

Ce traitement des signaux ne nécessite pas une grande puissance de calcul (jusqu'à une certaine limite). La technologie moyenne actuelle offre des capacités suffisantes pour que le traitement puisse être effectué sur n'importe quel ordinateur de gamme moyenne.

L'entrée et sortie des signaux audio s'effectue par des entrées et sorties physiques ou virtuelles, et l'information sur la position spatiale de chaque source sonore, ainsi que le modèle physique de front d'onde à utiliser (source point, onde plane, source focalisée) se transmettent à travers le protocole OSC.

## 4. ÉVALUATION PERCEPTIVE

Une première maquette a été installée à la Maison des Sciences Humaines à Paris, avec une seule antenne contenant huit enceintes Meyer Sound qui ont été placées à différentes



Figure 1. Maquette WFS installée à la Maison des Sciences Humaines, Laboratoire MUSIDANSE

distances (20, 30 et 40 cm d'espacement entre chacune) pour en analyser les résultats. On a utilisé une série d'échantillons représentatifs comme sources sonores virtuelles comprenant des instruments enregistrés (guitare, piano, percussion, voix, ambiances) et des sons générés par ordinateur.

Au cours des expérimentations nous avons constaté qu'en utilisant le principe de la WFS qui utilise à la fois l'ILD et l'ITD on peut obtenir une plus grande transparence et une meilleure perception de l'espace par rapport aux systèmes qui utilisent uniquement l'ILD.

Les premières observations qui ont été réalisées portent sur le compromis entre la distance séparant les enceintes et la qualité de restitution des sources sonores. On a pu constater qu'une distance de 40 cm peut être acceptable vu qu'elle permet de conserver les propriétés de la WFS pour les basses et moyennes-basses fréquences tout en limitant significativement la quantité d'enceintes nécessaires et rendant le système plus accessible.

Un des problèmes perçus est que si l'on met à contribution l'ensemble des enceintes de l'antenne pour synthétiser une source sonore statique, il est difficile d'identifier précisément la position de la source sonore. Ceci est dû à la faible différence d'intensité entre les sources secondaires qui génèrent des pré-échos, et par effet de précedence confondent l'indice interaural d'intensité qui est l'indice de majeure efficacité pour la localisation spatiale des sources sonores en hautes fréquences.

Quand la source virtuelle se déplace dans l'espace, le sens de déplacement de cette dernière est observable, ce qui démontre clairement l'efficacité de l'ITD, mais ne permet pas d'identifier avec précision la position de la source.

Ce problème a pu être masqué en limitant la quantité de sources réelles mises à contribution pour synthétiser la source sonore. Ceci a permis d'identifier très clairement la position de la source virtuelle vue uniquement en augmentant l'influence de l'ILD. Dans notre configuration de salle, on a pu constater que l'utilisation de l'apport de 4 enceintes pour chaque source permet à la fois d'obtenir une source transparente et de localiser très précisément la source dans l'espace.

La distance entre les enceintes implique qu'il se produise des filtres en peigne au-dessus de la fréquence d'aliasing qui peuvent être masqués pour des sources fixes, mais qui deviennent très évidents pour des sources en mouvement, les

décorrélations temporelles ne suffisant plus. C'est pourquoi en fonction de la vitesse de mouvement il est préférable de limiter la quantité de différences de temps entre les enceintes, même si cela implique que le front d'onde devienne plus plat, car il reste comme objectif d'expérimentation pour la suite de limiter les différences de temps pour les sources virtuelles en mouvement, mais uniquement pour les fréquences au-dessus de la fréquence d'aliasing et ainsi maintenir le front d'onde pour les basses et moyennes-basses fréquences.

On a pu constater également que la localisation des sources virtuelles est plus précise pour les sons percussifs ou pour ceux qui ont une grande dynamique sonore.

#### 4.1 Profondeur et focalisation

Avec une fréquence d'aliasing aussi basse (430 Hz ou 860 Hz) et en se rapprochant du VBAP, il devient difficile de percevoir les sources derrière la ceinture de hauts parleurs, et pour ce qui est de la profondeur, on se rapproche des caractéristiques du système stéréophonique où les sources sont localisées sur l'axe traversant les enceintes.

Pour ce qui est des sources focalisées, l'effet se perd complètement et en échange, on perçoit des artefacts qui ne correspondent pas à l'effet désiré de percevoir une source sonore à l'intérieur de l'espace de reproduction. Il est évident que pour pouvoir reconstruire correctement une source focalisée il est nécessaire d'avoir une plus grande densité d'enceintes.

### 5. PROJETS EN COURS DE DEVELOPPEMENT

#### 5.1 Salle d'expérimentation sonore

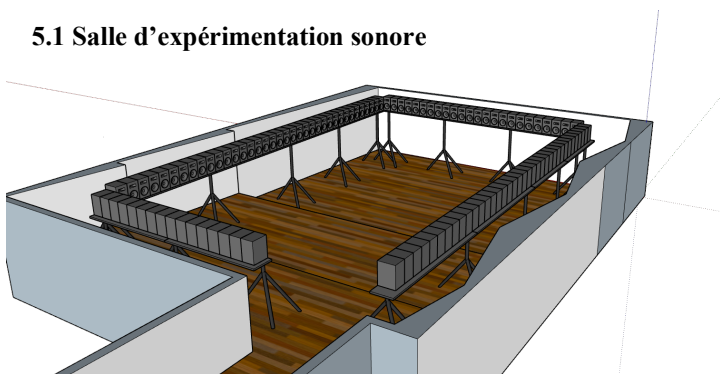


Figure 2. Maquette de l'installation en cours au Centre d'innovation et Production Artistique (Manzana 14), Universidad de las Artes, Guayaquil - Equateur

Pour accueillir ce projet on installera une salle au sein du Centre d'innovation en arts (Manzana14) de l'université de Guayaquil, en Équateur. Elle sera équipée de 40 enceintes JBL 305p mk2 distribuées sur 3 antennes dans une première phase, puis 147 enceintes conformant une ceinture qui englobe tout l'espace de reproduction.

Le système que nous sommes en train de développer va subir une période d'évaluation pour mettre en évidence le rendu, les apports du système à la perception de l'espace et à la position des sources virtuelles et les nouvelles possibilités que cela peut offrir à la création sonore.

Une des premières informations à obtenir concerne les limites de puissance de calcul que peut fournir l'ordinateur qui fait office de DSP, et si nécessaire, envisager la possibilité d'utiliser le GPU pour certains calculs et ainsi fournir de la puissance de calcul supplémentaire au système.

Puis nous réaliserons une série de mesures objectives et analyses subjectives pour déterminer la réponse du système : son homogénéité tout au long du spectre, l'apparition de filtres en peigne dus aux interférences entre les enceintes, et la précision dans l'interprétation des positions spatiales des sources sonores.

Dans une deuxième phase on analysera l'efficacité du rendu pour des sources focalisées (qui se trouvent à l'intérieur de l'espace de reproduction) ainsi que l'impact des réflexions produites par la salle sur la perception de la position des sources sonores virtuelles.

Pour réaliser ces évaluations on mettra la salle et le système à disposition de créateurs pour qu'ils puissent développer plusieurs projets artistiques conçus spécifiquement pour la WFS.

#### 5.2 Synthèse hybride

Utiliser une antenne à faible densité va à l'encontre de ce que requiert la WFS, c'est une condition dégradée de la WFS, cependant, il ne reste pas moins pertinent d'utiliser les principes de la WFS pour avoir une vraie reconstruction du front d'onde dans le bas du spectre et avoir une spatialisation cohérente pour les fréquences aiguës. La solution mise en pratique est la réduction du nombre d'enceintes qui contribuent à la construction de la source virtuelle, ainsi que la réduction de la courbature du front d'onde pour les sources en mouvement.

Pour les fréquences aiguës, qui ne sont pas correctement synthétisées en WFS, il est envisagé de fractionner le spectre en utilisant une autre technologie comme HOA avec compensation de distance ou VBAP, pour éviter des phénomènes de filtre en peigne qui sont très dérangeants pendant le mouvement de sources virtuelles et créer ainsi une synthèse hybride.

#### 5.3 Projets artistiques liés

Il existe plusieurs projets artistiques qui utiliseront le système proposé dans cet article et ainsi aideront au développement et validation du dispositif, parmi lesquels :

- « Les voix de l'enfermement », exposition sonore réalisé par Priscilla Aguirre, qui cherche à sensibiliser le public sur les conditions de vie que subissent les personnes enfermées dans une prison féminine en Équateur. Pour cela on cherche à plonger l'auditeur dans l'univers sonore de la prison afin de représenter la violence et l'oppression qui peuvent être ressenties à travers des sons froids et métalliques qui se superposent aux cris, voix, et autres éléments sonores propres à cet espace si particulier.

- Le compositeur colombien Fredy Vallejos réalisera une pièce acousmatique donnant un rôle protagoniste à l'espace et à la position et déplacements des sources dans l'espace.

- Un ensemble qui mélange instruments musicaux et sons générés par ordinateur, adaptera et interprétera un set de jazz qui permettra d'évaluer le système en conditions de concert.

- Le système fera également l'objet de plusieurs mémoires de fin d'études d'étudiants de l'université des Arts à Guayaquil.

### 5.3 Méthodes d'évaluation

Dans l'état actuel de développement du projet, on a réalisé une évaluation perceptive subjective. Il est prévu par la suite de procéder à une validation scientifique du dispositif.

Les projets artistiques liés nous permettront d'avoir une quantité suffisante d'utilisateurs du système et d'auditeurs pour obtenir des informations subjectives sur les avantages et défauts du dispositif et nous donneront les indices nécessaires pour l'améliorer.

On recueillera en premier lieu les impressions des créateurs qui auront été invités à pousser le système jusqu'à ses limites. Nous nous focaliserons sur la transparence du rendu fréquentiel des sources sonores virtuelles, la qualité de rendu pour les sources en mouvement et la possibilité d'utiliser les filtres en peigne, conséquence de la discrétisation comme outil créatif pour générer des traitements spatiaux et ainsi développer les ressources créatives propres du système.

On réalisera également une série d'évaluations perceptives avec des auditeurs pour évaluer la perception de l'espace et la précision sur la position des sources sonores dans l'espace.

Dans une deuxième phase on évaluera également avec différents groupes d'auditeurs la perception de la proximité des sources virtuelles qui se trouvent à l'intérieur de l'espace de reproduction.

## 6. CONCLUSION

La WFS à faible densité d'enceintes est un dispositif qui permet d'obtenir des sources sonores beaucoup plus transparentes et naturelles, ce qui implique une plus grande lisibilité des sources sonores quand il s'agit de scènes sonores complexes [11], un plus grand confort d'écoute et une meilleure immersion sonore par rapport aux systèmes stéréophoniques ou VBAP.

L'avantage avec le système que nous proposons est qu'il peut être obtenu avec une quantité relativement faible d'équipements et de puissance de calcul. C'est pourquoi il s'agit d'un système accessible à la plupart des membres de la communauté artistique, pour pouvoir créer des scènes sonores complexes ayant une grande lisibilité de tout le contenu spectral des sources sonores en évitant le masquage fréquentiel.

Ce système permet également une distribution continue et homogène des sources virtuelles dans l'espace ainsi que des mouvements fluides sans avoir de zones d'ombre dans les trajets des sources.

Les filtres en peigne et les décorrélations temporelles peuvent être utilisés comme traitements spatialisés pour générer des sensations perceptibles par les auditeurs.

Cette recherche a comme but principal de proposer aux créateurs sonores des outils sous plusieurs formes pour faciliter l'exploration de l'espace dans la création sonore tels que:

- Une bibliothèque complète d'objets qui puissent être intégrés dans la plupart des logiciels ou environnements de création sonore pour générer une spatialisation sonore par synthèse de fronts d'onde.

- Un code ouvert en libre accès qui permettra l'appropriation du code par les créateurs et ainsi partager le savoir sous forme de science ouverte.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

1. Caulkins, T. « Caractérisation et contrôle du rayonnement d'un système de Wave Field Synthesis pour la situation de concert », PhD thesis, Université Paris VI – Pierre et Marie Curie, 2007.
2. Frank, M. « Phantom Sources using Multiple Loudspeakers », PhD thesis. University of Music and Performing Arts Graz, 2013.
3. DeBruijn, W. « Applications of Wave Field Synthesis in Videoconferencing », PhD thesis, TU Delft, Delft, Pays-Bas, 2004.
4. Nicol, R. « Restitution sonore spatialisée sur une zone étendue : Application à la téléprésence », Ph.D. thesis, Université du Maine, Le Mans, France, Le Mans, France, 1999.
5. Pulkki, V. « Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning, » J. Audio Eng. Soc, 45, 456 – 466, 1997.
6. Corteel, E. « Caractérisation et Extensions de la Wave Field Synthesis en conditions réelles », Ph.D. thesis, Université de Paris VI, Paris, France, 2004.
7. Merlier, B. « Vocabulaire de l'espace en musiques électroacoustiques. coll. Musique et sciences », éditions Delatour, France, pp.230, 2006.
8. Wierstorf, H. « Perceptual Assessment of Sound Field Synthesis », PhD thesis, TU Berlin, Berlin, Allemagne, 2014.
9. Ahrens, J. « Analytic Methods of Sound Field Synthesis. Springer, Berlin, 2012.
10. Verheijen, E.N.G. « Sound Reproduction by Wave Field Synthesis », PhD thesis, TU Delft, Delft, Pays-Bas, 1997.
11. Daniel, J. « Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia », PhD thesis, Université Paris VI – Pierre et Marie Curie, 2001.
12. Strutt JW. « On our perception of sound direction », Philos Mag 13: 214–232, 1907.
13. Middlebrooks, J. C. « Sound localization », In Handbook of Clinical Neurology Vol. 129 (3rd series) Chapitre 6, 2015.