

# CFA/VISHNO 2016

## Transformer un jeu de HRTF en un autre à partir de données morphologique

M. Emerit<sup>a</sup>, F. Rugeles<sup>a</sup> et R. Nicol<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Orange Labs, 4 Av du Clos Courtel, 35512 Cesson-Seigné, France

<sup>b</sup>Orange Labs, 2 Av Pierre Marzin, 22307 Lannion, France  
rozenn.nicol@orange.com



LE MANS

Le projet BiLi (Binaural Listening) est un projet collaboratif français qui fédère les travaux de différents laboratoires et sociétés françaises dans le domaine de l'écoute binaurale. Un des objectifs du projet est de trouver des solutions à la personnalisation de l'écoute binaurale. La synthèse binaurale s'appuie sur les filtres linéaires décrivant les effets acoustiques produits par les oreilles, la tête et le torse sur les signaux qui sont reçus au niveau des tympanes, nommés HRIR ou HRTF suivant leur représentation, temporelle ou fréquentielle. Dans le cadre du projet BiLi, différentes pistes sont explorées. L'une des approches consiste à calculer les HRIR d'un nouveau sujet en transformant des HRIR contenues dans une base de données. Les transformations à appliquer sont déterminées par la comparaison entre des paramètres morphologiques mesurés sur le nouveau sujet et ceux contenus dans la bases de données associés aux HRIR à transformer. La démarche que nous avons suivie sera décrite dans cet article. Dans un premier temps, les transformations à appliquer pour passer d'un maillage 3D des pavillons d'un individu à un autre sera expliquée. Puis, une technique pour appliquer des transformations concordantes aux HRIR sera présentée et évaluée sur une base de données existante (base de données BiLi).

## 1 Introduction

Des espaces sonores virtuels de haute qualité peuvent être obtenus à travers des techniques de synthèse binaurale. La synthèse binaurale a pour but de reproduire les phénomènes de retard, réflexion, diffraction et atténuation subits par le signal provenant d'une source jusqu'à son arrivée à l'entrée des canaux auditifs. Pour chaque direction de l'espace et pour chaque oreille, ceci peut être représenté comme un système linéaire et invariant dans le temps, dans le cas où la personne est statique. Ce système est complètement caractérisé par sa fonction de transfert appelée en anglais Head Related Transfer Function (HRTF) ou par son équivalent dans le domaine temporel, le Head Related Impulse Response (HRIR). Ces fonctions de transfert sont spécifiques à chaque personne. Elles dépendent de la forme du torse, de la tête et du pavillon d'un individu. Chaque HRTF est défini par le triplet : morphologie, direction et canal auditif. D'après les études de Blauert, Morimoto & Ando, Wenzel et Kistler [1, 2, 3], l'utilisation de HRTF non-individuelles en synthèse binaurale peut provoquer une augmentation des erreurs lors de la localisation de sources sonores virtuelles, des problèmes d'externalisation de ces sources et des confusions avant/arrière. Ceci dégrade considérablement la qualité des espaces sonores créés.

C'est pour cette raison que, pour avoir des espaces sonores virtuels (*Virtual Auditory Space* ou VAS) de haute qualité, il est fortement conseillé d'utiliser des HRTFs individualisés ou personnalisés. Des HRTFs individualisés sont les filtres spécifiques à une morphologie tandis que des HRTF personnalisés sont des filtres qui ont été créés à partir de modifications d'autres HRTF pour les adapter à une personne. La façon la plus directe d'obtenir les HRTF d'une personne est de mesurer les réponses impulsionnelles de l'individu en chambre anéchoïque. De cette façon il est possible d'obtenir précisément les filtres caractéristiques de chaque individu. L'inconvénient de cette approche est le matériel qui est nécessaire pour faire les mesures ainsi que l'inconfort que doit subir la personne en restant immobile pendant toute la durée des mesures. C'est pour cette raison que cette approche ne peut pas être généralisée aux applications destinées au grand public.

D'autres solutions existent pour obtenir des HRTF personnalisés. L'une d'entre elles consiste à sélectionner, au travers de tests perceptifs, le jeu de HRTF le plus adapté au sujet dans une base de données ([4, 5]). Cette méthode est facile à implémenter et pourrait être utilisée pour des applications grand public. Mais, l'inconvénient de cette approche est que les résultats obtenus peuvent varier

beaucoup par rapport à l'algorithme qui est utilisé pour choisir le jeu de HRTF de la base de données ainsi que par rapport au temps et aux efforts que l'utilisateur doit faire avant de trouver un jeu de filtres adaptés.

Une autre approche existante est la personnalisation des HRTF à partir de la morphologie d'un individu. Cette technique part du principe qu'il y a un lien direct et systématique entre la morphologie d'une personne et ses HRTF. Ainsi, pour créer une paire de HRTF personnalisées, les algorithmes de cette approche nécessitent des informations sur la morphologie du nouvel individu tel que des mesures anthropométriques. Cette approche est très prometteuse parce qu'elle permettrait d'effectuer une synthèse binaurale personnalisée à partir de quelques photos d'un individu par exemple [6]. Ceci éviterait les longues séances de mesures en chambre anéchoïque ou des tests perceptifs de personnalisation rébarbatifs.

Le problème qui se pose actuellement avec cette approche est le manque de connaissances scientifiques sur l'impact qu'a la morphologie d'un individu sur les caractéristiques spectrales de ses HRTF. En effet, la transformation subie par les ondes sonores qui arrivent dans le canal auditif est un processus complexe lié à des caractéristiques morphologiques précises et l'utilisation de quelques mesures anthropométriques pourrait ne pas être suffisante pour caractériser ce lien.

Une solution pour résoudre cette problématique est de se servir de méthodes numériques pour comprendre comment la morphologie d'une personne a un impact sur ses HRTFs. La méthode numérique la plus utilisée est la BEM (*Boundary Element Method* [7, 8, 9, 10]) qui résout le problème de la propagation acoustique des ondes sonores en présence d'un obstacle (morphologie de l'individu) en trouvant une solution numérique à l'équation de Helmholtz. Il est donc nécessaire d'avoir un modèle numérique de la personne pour pouvoir utiliser cette méthode afin de calculer ses HRTF.

Un des objectifs du projet BiLi est de faire des études à partir de techniques d'individualisation de HRTF pour mieux comprendre la relation qui existe entre la morphologie d'un individu et ses HRTF. Le but final est de créer une méthode fiable de personnalisation de HRTF à partir de paramètres morphologiques.

Cet article explique une des approches d'individualisation qui a été explorée dans le projet BiLi ainsi que les différents travaux qui ont été réalisés pour atteindre cet objectif. Dans un premier temps, la méthode d'individualisation choisie pour ces travaux est décrite en détail. Puis, les travaux réalisés pour adapter la morphologie d'une personne à un autre individu sont décrits. Ensuite, la façon d'adapter deux

jeux de HRTFs est expliquée en détail. Et enfin, le travail qui reste à faire pour relier ces deux domaines est expliqué.

## 2 Personnalisation de HRTF

### 2.1 Principe

Le principal objectif de cette étude est d'avancer sur les travaux de recherche menés par Guillon [11] visant à obtenir un rendu binaural de qualité sans mesurer les HRTF des auditeurs.

Guillon [11] a décrit une technique de personnalisation des HRTF dont le principe est schématisé dans la figure 1. La technique de personnalisation proposée part du principe qu'il existe une relation directe entre les différences morphologiques de deux personnes et les différences entre leurs HRTF. Elle est basée sur la détermination d'une fonction qui prend en entrée des paramètres morphologiques et qui donne en sortie des paramètres de transformation à appliquer à un jeu de HRTF existant pour obtenir un jeu de HRTF personnalisé. Cette fonction est estimée à partir d'analyses statistiques faits sur une base de données contenant des modèles numériques des individus ainsi que leurs HRTF. Pour avoir une méthode de personnalisation fiable, la base de données utilisée pour entraîner les modèles doit être la plus riche et la plus diverse possible en termes de nombre et de représentativité des individus.

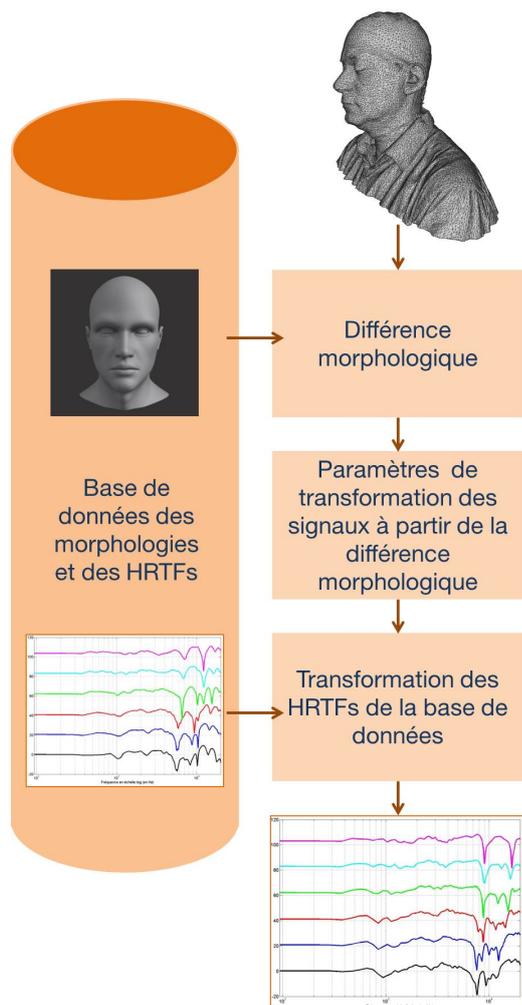


FIGURE 1 – Schéma expliquant la méthode d'individualisation choisie.

La technique de personnalisation de HRTF est composée des étapes suivantes :

1. La morphologie du nouvel individu est en entrée du modèle. Celle-ci doit être acquise préalablement par des scanners 3D ou des techniques de vision par ordinateur.
2. À partir du modèle numérique réduit ou de basse résolution de l'individu, il faut chercher la morphologie de la base de données qui lui ressemble le plus. Ceci est fait dans le premier bloc de la figure 1. Les meilleurs critères pour comparer les modèles numériques de la base de données avec la morphologie du nouvel individu restent toujours à étudier. La raison pour laquelle la morphologie la plus proche est choisie comme point de départ de la méthode de personnalisation résulte de l'hypothèse suivante : si les morphologies de deux individus sont proches, les HRTF de ces individus seront aussi proches en termes de différences spectrales.
3. En ayant la morphologie du sujet de la base de données et du nouvel individu, il faut déterminer quelles sont les transformations morphologiques qu'il faut appliquer à la morphologie du sujet de la base de données pour les adapter au nouvel individu.
4. Les transformations à réaliser sur les HRTF sont ensuite calculées dans le deuxième bloc à partir des paramètres de transformation morphologique calculés dans le premier bloc. Ceci peut être réalisé par une régression linéaire qui a été définie à partir de l'étude des corrélations entre les paramètres d'alignement des pavillons et les paramètres de transformation des HRTF pour les sujets de la base de données par exemple. D'autres techniques comme des réseaux de neurones artificiels peuvent aussi être utilisées pour modéliser le lien existant entre les paramètres morphologiques et les paramètres de transformation de HRTF. Cette modélisation constitue le cœur du modèle proposé par Guillon et les différentes approches qui peuvent être utilisées pour calculer ce modèle font toujours l'objet de recherches.
5. Le dernier bloc applique les transformations qui sont en sortie du deuxième bloc au jeu de HRTF du sujet de la base de données. Le résultat de ces transformations donne le jeu de HRTF personnalisé pour le nouvel individu.

Guillon n'a pas validé strictement le modèle qu'il a proposé parce que la base de données dans laquelle il a travaillé était constituée de seulement de 6 individus. Néanmoins, les premiers résultats qu'il a obtenu sont très prometteurs.

### 2.2 Travaux préalables

Dans le but de continuer la piste de recherche explorée par Guillon, nous avons décidé de créer une base de données de HRTF reliés à des modèles numériques de morphologies de plus grande taille. Ainsi, il sera possible de voir les limites du modèle proposé par Guillon et de proposer des améliorations qui permettent de le valider. Pour faire ceci il faut :

- Créer un système de mesure de HRTF et un protocole de mesure.
- Créer un système de numérisation des morphologies des individus et un protocole associé.
- Continuer les travaux de recherche pour pouvoir déterminer quelles sont les transformations qui peuvent être appliquées aux modèles numériques 3D ainsi qu'aux HRTFs pour déterminer quel est le lien entre la morphologie d'un individu et ses HRTF.

Le système de mesure de HRTF qui a été créé dans le cadre de ces travaux de recherches et le protocole de mesures utilisé ont fait l'objet d'un article [12]. De même, le système de numérisation des morphologies des individus et son protocole associé sont décrits dans l'article [13].

Dans les sections qui suivent, cet article traite les problématiques associées aux calculs des différences morphologiques entre les sujets ainsi que les problématiques liées à la transformation d'un jeu de HRTF (blocs 1 et 3 de la figure 1).

### 3 Transformation morphologique

Dans le modèle de personnalisation de HRTF, la première étape consiste à déterminer quelles sont les transformations à appliquer aux morphologies de la base de données pour les adapter au nouvel individu. Dans notre cas, nous allons seulement prendre en compte les pavillons des individus pour la transformation des morphologies. Ce choix a été fait d'après les résultats de Zolfaghari et al., Iwaya et al. et Ramirez et al. [14, 15, 16] qui montrent que la forme du pavillon d'oreille est responsable d'au moins 86% des indices spectraux présents dans les HRTFs d'une personne. Ces indices sont utilisés par le cerveau pour identifier la direction des sources sonores.

#### 3.1 Type de transformation

Nous avons identifié trois types de transformation pour recalculer les oreilles d'un individu à un autre : transformation rigide, affine et non rigide.

La transformation rigide utilise seulement des rotations et des translations.

$$X' = RX + T \quad (1)$$

La transformation affine utilise en plus des facteurs d'échelle (dans un ou plusieurs axes).

$$X' = SRX + T \quad (2)$$

Et, contrairement aux autres types de transformations, la transformation non rigide n'applique pas la même transformation à tout le modèle.

Le choix de la transformation morphologique à utiliser doit prendre en compte le modèle de transformation de HRTF auquel on veut l'associer. Les études de Guillon [11] ont montré qu'il est possible de réduire les différences de deux jeux de HRTF en combinant des transformations de rotation et de dilatation ("scaling fréquentiel"). C'est pour cette raison que la transformation morphologique qui a été choisie est la transformation affine.

D'autres études ont utilisé des transformations non rigides telles que les études de Zolfaghari et al. [14]. Ces

techniques permettent de transformer, à quelques facteurs près, l'oreille d'une personne en l'oreille d'un autre individu. Le problème avec ces méthodes est que les transformations réalisées sont difficiles à exploiter parce qu'elles ne sont pas globales. En effet, plusieurs parties des pavillons d'oreille subissent différentes transformations afin de les adapter à un modèle d'oreille donné.

#### 3.2 Transformation rigide

Dans ses études, Guillon a choisi d'utiliser un algorithme d'Iterative Closest Point (ICP) [17] modifié afin de réaliser la comparaison morphologique entre les pavillons d'oreille de deux individus. Cet algorithme est souvent utilisé pour réduire la différence entre deux nuages de points 2D ou 3D. L'algorithme prend un modèle de référence et applique des transformations de rotation et de translation au deuxième modèle afin de le recalculer au mieux par rapport au premier modèle. Guillon a inclus une étape dans la transformation pour appliquer un facteur d'échelle global au pavillon d'oreille pour recalculer au mieux des oreilles de différentes tailles. Cet algorithme est très efficace pour recalculer des nuages de points pris de différents points de vue et ayant des zones de recouvrement d'un même objet. Cependant, les performances sont moindres lorsque l'on essaye de recalculer deux objets complètement différents et dépendent beaucoup des conditions initiales. En effet, l'ICP peut souvent trouver des solutions dans des minima locaux qui ne sont pas des solutions globales au problème. De plus, la méthode qui a été implémentée par Guillon pour trouver le paramètre de dilatation le mieux adapté est une méthode itérative qui est très coûteuse en temps de calcul.

C'est pour cette raison que nous avons décidé d'utiliser un autre algorithme pour calculer les transformations à appliquer entre deux modèles d'oreilles différents. L'algorithme choisi est le Coherent Drift Point (CDP) proposé par Myronenko et al. [18]. Cet algorithme peut être utilisé pour des transformations rigides et non rigides, mais pour notre cas d'étude nous n'utilisons que les transformations rigides. Le gros avantage de cette méthode est qu'elle prend une approche probabiliste ce qui la rend beaucoup plus robuste vis à vis du bruit présent dans les données et par rapport aux observations aberrantes. De plus, elle trouve des minima globaux (indépendamment des conditions initiales) en donnant des paramètres de dilatation et de rotation. Pour plus d'information sur cette méthode nous vous conseillons de consulter l'article de Myronenko [18].

Les résultats du CDP rigide dans le recalcul de modèles 3D de pavillons d'oreille donnent comme résultat une matrice de transformation associée à une matrice de translation. La matrice de transformation peut être décomposée en valeurs singulières pour obtenir une matrice de "scaling" et des matrices de rotation.

#### 3.3 Exemple

Pour pouvoir utiliser les résultats du CDP dans la méthode de personnalisation de HRTF, il est nécessaire de s'assurer que certaines conditions soient vérifiées. En effet, la seule condition initiale dont il faut s'assurer avant de calculer les transformations morphologiques est que les maillages 3D soient alignés dans le même système de

référence. Ceci peut s'effectuer en alignant l'axe interaural des sujets (l'axe défini par les entrées des canaux auditifs de chaque individu) et leur axe médian (l'axe qui passe par le milieu du visage). Cette condition initiale n'affecte pas les performances de l'algorithme du CDP mais doit être vérifiée pour pouvoir relier les transformations du CDP avec les transformations des HRTF, qui sont eux calés dans le même référentiel. La figure 2 montre un exemple des différentes étapes de l'algorithme CDP pour calculer les transformations entre deux pavillons d'oreille.

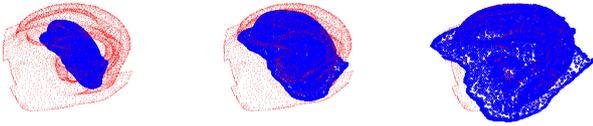


FIGURE 2 – Algorithme du Coherent Drift Point. En rouge le pavillon d'oreille de référence et en bleu le pavillon d'oreille dans les différentes étapes de l'algorithme. A droite on observe le résultat final de l'algorithme qui donne la transformation optimale entre les deux oreilles.

Une fois définie la façon de calculer les transformations morphologiques, il est nécessaire de définir comment seront calculées les transformations à appliquer entre deux jeux de HRTF.

## 4 Transformation des HRTF

### 4.1 Harmoniques Sphériques

Pour définir les transformations à effectuer entre deux jeux de HRTFs, Guillon a analysé les représentations sphériques des modules en dB des HRTF par fréquence qu'il a nommé "fonctions de directivité". Ainsi, il a pu constater que les fonctions de directivité entre deux sujets peuvent avoir beaucoup de ressemblances à un facteur de rotation et une valeur de dilatation de l'échelle fréquentielle (facteur de scaling) près. Pour trouver les paramètres de rotation et de scaling entre deux jeux de HRTF, il a proposé une méthode itérative qui prend un échantillonnage des fonctions de directivité, les décompose en harmoniques sphériques et calcule la rotation à réaliser entre deux jeux HRTF par des méthodes de descente du gradient pour chaque facteur de scaling donné. Cette méthode est une méthode itérative qui doit être évaluée à l'aide de plusieurs pas de rotation pour trouver la meilleure solution. En effet avec un pas trop petit, on peut tomber sur un minimum local. [19]

### 4.2 Analyse en composantes indépendantes

Pour trouver une méthode directe qui nous permette de trouver la rotation entre deux filtres, nous proposons une nouvelle méthode basée sur l'analyse en composantes indépendantes suivie d'une décomposition en harmoniques sphériques.

Dans un premier temps, nous réalisons une analyse en composante indépendantes de la base de données de HRTF que nous avons créé dans le cadre du projet BiLi. Cette analyse est réalisée à partir des modules en dB des HRTF de chaque individu qui sont ré-échantillonnés sur une échelle log-fréquentiel. De cette façon, le fonctionnement du système auditif est pris en compte en donnant plus

d'importance aux informations contenues dans les basses fréquences que dans les hautes fréquences. Le nombre de composantes indépendantes choisi dépend du pourcentage de la variance de filtres qui veut être expliqué (qui varie entre 90.64% pour 15 composantes indépendantes et 99.9999% pour 233 composantes indépendantes dans notre cas).

Le résultat de l'analyse en composantes indépendantes donne des fonctions en fréquence qui agissent principalement dans une bande de fréquence donnée. Ces fonctions sont rangées de manière croissante dans une matrice par rapport à la valeur de la fréquence centrale de la bande sur laquelle ils agissent. Cette matrice de filtres indépendants est normalisée pour créer une base orthonormée qui sera utilisée pour décomposer tous les spectres des HRTF. Un exemple de ces fonctions de base est représenté dans la figure 3.

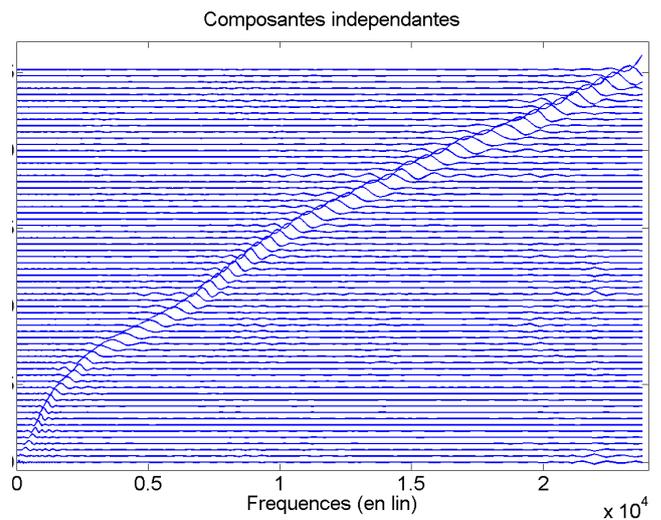


FIGURE 3 – Résultats de l'analyse en composantes indépendantes des spectres d'une base de jeux de HRTF rangées en ordre croissant. Il y a 64 composantes indépendantes, représentées par chaque ligne, expliquant 98.09% de la variance des spectres des HRTF.

Afin de réduire les informations redondantes qui sont présentes dans tous les spectres des jeux de HRTF, ceux-ci peuvent être décomposés en utilisant la base orthonormée de composantes indépendantes, nommée IC (cf. équation 3). Le résultat de cette décomposition donne une matrice, nommée WIC, contenant les coefficients attribués à chaque composante indépendante afin d'obtenir un jeu de HRTF.

Dans cette équation, la matrice **HRTF** possède  $D$  directions spatiales et  $F$  échantillons dans sa représentation fréquentielle. La matrice **WIC** est composée de  $D$  directions spatiales et  $N$  coefficients pour chaque composante indépendante et finalement la matrice **IC** contient  $N$  composantes indépendantes ayant  $F$  échantillons dans leur représentation fréquentielle.

$$\begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix}_{D \times F} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_{D \times N} \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix}_{N \times F} \quad (3)$$

Pour comparer les jeux de HRTF de deux individus il est donc possible de comparer que leur matrice **WIC**. En effet, on utilise la même matrice de composantes indépendantes pour décomposer tous les spectres des HRTF, donc toute

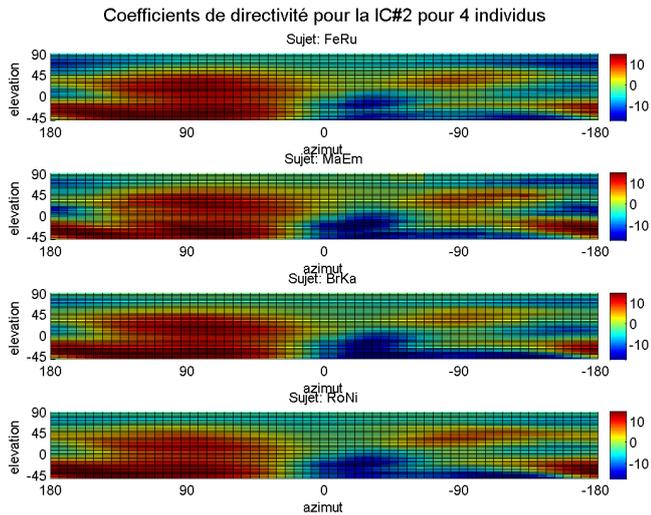


FIGURE 4 – Coefficients de directivité  $\mathbf{WIC}(2)$  de quatre sujets différents. En abscisse sont représentés les azimuts et en ordonnée les élévations. Les niveaux de couleur représentent les coefficients de la deuxième colonne de la matrice  $\mathbf{WIC}$ .

l'information individuelle est comprise dans les matrices  $\mathbf{WIC}$  de chaque individu.

La matrice  $\mathbf{WIC}$  peut être étudiée par colonne. En effet, comme la matrice  $\mathbf{IC}$  représente un banc de filtres, chaque colonne de la matrice  $\mathbf{WIC}$  représente les coefficients de directivité associés à chaque bande de fréquence des composantes indépendantes. Un exemple de ces coefficients de directivité est représenté sur la figure 4 pour 3 sujets différents. On observe une certaine ressemblance entre les coefficients de directivité des différents individus.

### 4.3 Matrice de rotation par décomposition en Harmoniques sphériques

Pour calculer les transformations à appliquer entre deux jeux de HRTF, nous décomposons la matrice  $\mathbf{WIC}$  à l'aide des harmoniques sphériques afin de réduire les informations redondantes dans le domaine spatial (cf. équation 4).

$$\begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \mathbf{WIC} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_{D \times N} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \mathbf{HS}_L & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_{D \times M} \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \mathbf{WHS} & \vdots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (4)$$

La matrice  $\mathbf{HS}_L$  est une matrice contenant les  $M = (L + 1)^2$  fonctions de base des harmoniques sphériques réels d'ordre  $L$  évaluées pour les directions de mesure des jeux de HRTF ( $D$  directions).

Cette décomposition réduit encore l'information relative aux indices individuels de chaque individu. En effet, les matrices  $\mathbf{WIC}$  de chaque individu sont décomposées sur les mêmes fonctions de base des harmoniques sphériques et une estimation de toute l'information individuelle se retrouve dans  $\mathbf{WHS}$ . Cette estimation sera d'autant plus précise que l'ordre  $L$  des harmoniques sphériques qui a été choisi pour la décomposition est élevé. Cette approche peut servir pour compresser la quantité de données des spectres des HRTF en ne gardant que la matrice  $\mathbf{WHS}$ .

Une autre propriété intéressante de cette décomposition est qu'elle permet d'appliquer des rotations à la grille de mesure des jeux de HRTF existants en appliquant une simple matrice de rotation aux coefficients de la décomposition en harmoniques sphériques. De manière réciproque, on peut estimer une matrice de rotation entre deux jeux de spectres de HRTF directement en utilisant les matrices  $\mathbf{WHS}$  tel que le montre l'équation 5 [20]. Avec cette méthode, on obtient les 3 angles de rotation de façon directe contrairement à l'approche suivie par Guillon qui est sensible aux minima locaux.

$$[\mathbf{R}]_{M \times M} = [\mathbf{WHS}_1]_{M \times N} [\mathbf{WHS}_2']_{N \times M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & X & X & X & \dots \\ 0 & X & X & X & \dots \\ 0 & X & X & X & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 4.4 Validation

Une première validation de cette méthode a été réalisée en créant des jeux de HRTF synthétiques ayant une rotation connue par rapport aux jeux de HRTF originaux pour 10 individus différents. Trois rotations différentes ont été appliquées à chaque jeu de HRTF d'une base de données pour évaluer la méthode.

Les résultats obtenus sont très prometteurs parce que les angles de rotations trouvés entre les HRTF synthétiques qui ont été créés et les HRTF originales sont identiques aux angles qui ont été appliqués, à 1° près. Cette erreur peut être due à la grille d'échantillonnage de la sphère qui n'est pas assez précise pour avoir des résultats exacts. La résolution angulaire de la grille de mesure utilisée est de 6° en azimut et en élévation.

## 5 Conclusion

Dans cet article nous avons présenté la méthode d'individualisation de HRTF que nous avons choisi d'explorer. Les principes de cette méthode ont été expliqués ainsi que les différentes étapes par lesquelles il faut passer pour obtenir des filtres individualisés. Nous avons proposé d'utiliser la méthode du Coherent Drift Point pour calculer la transformation entre les morphologies de deux individus. De même, nous avons proposé une nouvelle décomposition des spectres des HRTF, en faisant une analyse en composantes indépendantes suivie d'une décomposition en harmoniques sphériques. Celle-ci facilite d'une part l'estimation des paramètres de transformations permettant de passer d'un jeu de HRTF à un autre. D'autre part, elle peut être utilisée pour compresser des jeux de HRTF.

Les méthodes décrites sont des améliorations faites à la méthode de personnalisation proposée par Guillon. Il nous faut maintenant valider ces méthodes améliorées sur les bases de données de HRTF et de morphologie que nous avons constituée dans le cadre du projet BiLi. Ce travail de validation nécessitera de faire le lien entre les paramètres de la transformation permettant de passer d'une morphologie à une autre et ceux de la transformation permettant de passer d'un jeu de HRTF associé à un autre.

## Remerciements

Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet "BiLi" (www.bili-project.org), financé par le FIU, et avec le support de "CAP DIGITAL - PARIS REGION".

## Références

- [1] J. Blauert, *Spatial Hearing : The Psychophysics of Human Sound Localization*. MIT Press, 1997.
- [2] M. Morimoto and Y. Ando, "On the simulation of sound localization," 1980.
- [3] E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler, and F. L. Wightman, "Localization using nonindividualized head related transfer functions," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 94, no. 1, pp. 111–123, 1993.
- [4] B. U. Seeber and H. Fastl, "Subjective selection of non-individual head-related transfer functions," in *Proceedings of the 2003 International Conference on Auditory Display*, pp. 1–4, Boston, MA, USA, 2003.
- [5] B. F. G. Katz and G. Parsehian, "Perceptually based head-related transfer function database optimization," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 2, pp. EL99–EL105, 2012.
- [6] D. Schönstein and B. Katz, "HRTF selection for binaural synthesis from a database using morphological parameters.," in *20th International Congress on Acoustics (ICA)*, (Sydney), pp. 1–6, 23-27 August 2010.
- [7] Y. Kahana and P. A. Nelson, "Boundary element simulations of the transfer function of human heads and baffled pinnae using accurate geometric models," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 300, pp. 552–579, Mar. 2007.
- [8] B. F. G. Katz, "Boundary element method calculation of individual head-related transfer function. I. Rigid model calculation," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, no. 5, p. 2440, 2001.
- [9] B. F. G. Katz, "Boundary element method calculation of individual head-related transfer function. II. Impedance effects and comparisons to real measurements," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, no. 5, p. 2449, 2001.
- [10] W. Kreuzer, P. Majdak, and Z. Chen, "Fast multipole boundary element method to calculate head-related transfer functions for a wide frequency range," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 126, no. 3, 2009.
- [11] P. Guillon, *Individualisation des indices spectraux pour la synthèse binaurale : recherche et exploitation des similarités inter-individuelles pour l'adaptation ou la reconstruction de HRTF*. PhD thesis, Université du Maine, Nov. 2009.
- [12] F. Rugeles Ospina, M. Emerit, and J. Daniel, "A fast measurement of high spatial resolution head-related transfer functions for the bili project," *International Conference of Spatial Audio*, 2015.
- [13] F. Rugeles Ospina, M. Emerit, and B. F. Katz, "The three-dimensional morphological database for spatial hearing research of the bili project," *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 23, no. 1, 2016.
- [14] R. Zolfaghari, N. Epain, C. T. Jin, J. Glaunès, and A. Tew, "Large Deformation Diffeomorphic Metric Mapping And Fast-Multipole Boundary Element Method Provide New Insights For Binaural Acoustics," *arXiv :1401.7100 [cs]*, Jan. 2014.
- [15] Y. I. S. Yukio Iwaya, "Numerical analysis of the effects of pinna shape and position on the characteristics of head-related transfer functions.," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, no. 5, p. 3297, 2008.
- [16] M. A. Ramirez and S. G. Rodriguez, "HRTF Individualization by Solving the Least Squares Problem," in *Audio Engineering Society Convention 118*, 2005.
- [17] P. Besl and N. D. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 239–256, 1992.
- [18] A. Myronenko and X. Song, "Point set registration : Coherent point drift," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 32, no. 12, pp. 2262–2275, 2010.
- [19] P. Guillon, T. Guignard, and R. Nicol, "Head-related transfer function customization by frequency scaling and rotation shift based on a new morphological matching method," in *Audio Engineering Society Convention 125*, Oct 2008.
- [20] W. Jarosz, *Efficient Monte Carlo Methods for Light Transport in Scattering Media*. PhD thesis, UC San Diego, La Jolla, CA, USA, Sept. 2008.