

# Formation de voies exploitation de l'information spatiale des sources

## Introduction

Dans ce chapitre nous présentons une classe de méthodes de séparation de sources basée sur l'information spatiale des sources audio : la *formation de voies* (*beamforming*). Nous nous intéressons à ce type de méthodes de séparation géométrique de sources afin de l'exploiter dans nos algorithmes de séparation comme une étape de prétraitement avant l'étape de séparation basée sur l'information structurelle des sources.

Le terme *formation de voies* a été dérivé du fait que les premiers filtres spatiaux ont été développés pour former des *lobes* permettant de recevoir un signal émis d'une certaine direction et atténuant les signaux émis des autres directions. Former des voies semble indiquer la radiation de l'énergie, cependant, la formation de voies est appliquée à la radiation ou à la réception de l'énergie. Dans nos travaux, nous considérons la formation de voies pour la réception. La formation de voies a été étudiée dans plusieurs domaines comme le radar, la sismologie et les communications. Elle peut être utilisée pour différentes applications telles que la détection de présence d'un signal, l'estimation des directions d'arrivée des sources, l'amélioration de la qualité d'un signal, l'estimation d'un signal venant d'une direction donnée en la présence de bruit et de signaux interférents... Ceci est possible en construisant le *diagramme de directivité* adéquat, celui qui donne la bonne répartition de l'énergie en réception en fonction de la fréquence et des angles d'arrivées éventuels de la source audio émettrice, et ceci par rapport à l'application souhaitée.

La formation de voies est formulée comme un filtre spatial qui opère sur les sorties

---

d'un réseau de capteurs dans le but de former le diagramme de directivité désiré [87]. Typiquement, un filtre de formation de voies (*beamformer*) combine linéairement les séries temporelles échantillonnées spatialement par le réseau de capteurs afin d'obtenir à la sortie des séries temporelles scalaires : c'est le *filtrage spatio-temporel*. Le filtre de formation de voies idéal doit avoir un diagramme de directivité égale à 1 pour la direction d'arrivée choisie et nul dans les autres directions. Dans la pratique, ce genre de filtre ne peut être estimé : le lobe principal est toujours de largeur non nulle et les lobes secondaires sont de hauteur non nulle.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes intéressés à la formation de voies comme méthode de séparation de sources selon leurs *directions d'arrivées* (DOA : Directions of Arrival). La direction d'arrivée d'une source est l'angle que fait la perpendiculaire à son front d'onde avec le réseau de capteurs. Les méthodes de formation de voies peuvent être classées en deux catégories, selon leur dépendance aux données reçues :

- la formation de voies indépendante des données observés, appelée aussi *formation de voies fixe* ;
- la formation de voies dépendante des données observés, appelée aussi *formation de voies adaptative*.

Dans la suite, nous présenterons dans un premier temps le principe de la formation de voies. Nous nous intéresserons ensuite à la formation de voies adaptative et à la formation fixe en soulignant les avantages et les inconvénients de chacune de ces deux méthodes. Ensuite, nous introduirons notre méthode de formation de voies fixe avec les fonctions de transfert de tête (HRTF).

### 3.1 Formation de voies : principe

Supposons que l'on dispose d'un réseau de  $M$  capteurs de géométrie quelconque. Une onde plane  $s(t)$  issue d'une source audio située en champ lointain arrive sur le réseau de capteurs avec une direction d'arrivée  $\theta$ . Les sorties du réseau de capteurs sont notées  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_M(t)]^T$ ,  $t$  étant l'indice de temps, et sont modélisées comme la convolution de la source  $s(t)$  et les réponses impulsionnelles des différents chemins de propagation entre cette source et les capteurs. Ces réponses impulsionnelles sont tronquées à la longueur  $L$  et s'écrivent en fonction de la direction d'arrivée  $\theta$  de la source  $s(t)$  comme  $\mathbf{h}(l, \theta) = [h_1(l, \theta), \dots, h_M(l, \theta)]^T$ , avec  $0 \leq l \leq L - 1$ . Le signal à la sortie du capteur  $m$  s'écrit :

---

$$x_m(t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_m(l, \theta) s(t-l) \quad (3.1)$$

Nous voulons estimer un filtre de formation de voies qui nous permettra de rehausser le niveau de ce signal et de rejeter les signaux interférents arrivant de directions autre que  $\theta$ . Ceci est possible en construisant un lobe qui vise la direction d'arrivée désirée  $\theta$ .

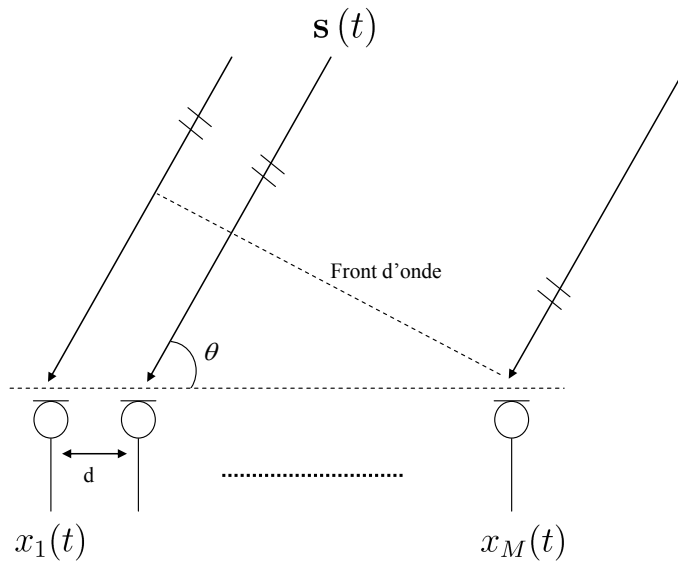


FIGURE 3.1 – Illustration d'un front d'onde plane arrivant sur un réseau de capteurs linéaire

Soit le filtre de formation de voies dans le domaine temporel  $\underline{\mathbf{b}}(l, \theta) = [b_1(l, \theta), \dots, b_M(l, \theta)]^T$  relatif à une direction de visée  $\theta$ , avec  $1 \leq l \leq L'$  et  $L'$  est la longueur de ce filtre. Les signaux à la sortie de la formation de voies sont exprimés dans le domaine temporel comme suit :

$$z(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} b_m(l, \theta) x_m(t-l) = \sum_{l=0}^{L-1} \underline{\mathbf{b}}^T(l, \theta) \mathbf{x}(t-l) \quad (3.2)$$

Les filtres spatiaux de formation de voies ont été développés pour les signaux à bande étroite qui peuvent être caractérisés par une fréquence unique. Pour les signaux large bande comme la parole, une transformation dans le domaine fréquentiel est nécessaire et les filtres de formation de voies à bande étroite sont développés pour

chaque fréquence indépendamment. Par conséquent, l'équation (3.2) s'écrit dans le domaine temps-fréquence :

$$z(f, k) = \mathbf{b}^H(f, \theta) \mathbf{X}(f, k) \quad (3.3)$$

où  $\mathbf{b}^H(f, \theta) = [b_1(f, \theta), \dots, b_M(f, \theta)]^T$  et  $\mathbf{X}(f, k) \simeq \mathbf{H}(f) S(f, k)$  avec  $\mathbf{X}(f, k) = [X_1(f, k), \dots, X_M(f, k)]^H$  (respectivement  $S(f, k)$ ) est la TFCT de  $\{\mathbf{x}(t)\}_{1 \leq t \leq T}$  (respectivement de  $\{s(t)\}_{1 \leq t \leq T}$ ) à la fréquence  $f \in \left[1, \frac{N_f}{2} + 1\right]$  et la fenêtre d'analyse  $k \in [1, N_T]$ .  $\mathbf{H}(f, \theta)$  est la transformée de Fourier des filtres de mélanges  $\{\mathbf{h}(l, \theta)\}_{0 \leq l \leq L-1}$  de dimension  $M \times 1$ .

Nous voulons que le diagramme de directivité, défini comme la magnitude au carré de la *réponse directionnelle* de cette formation de voies, pointe vers la direction d'arrivée  $\theta$ . La réponse directionnelle de la formation de voies s'écrit en fonction du *vecteur directionnel*  $\mathbf{d}(f, \theta)$  comme suit :

$$r(f, \theta) = \mathbf{b}^H(f, \theta) \mathbf{d}(f, \theta) \quad (3.4)$$

Le vecteur directionnel est la réponse en fréquence du réseau de capteurs, il représente les délais de phase d'une onde plane calculés aux niveaux des éléments du réseau de capteurs. Cette réponse est une fonction de l'angle de visée  $\theta$  et de la configuration du réseau. Dans un champ libre, le vecteur directionnel d'un réseau de capteurs s'écrit comme suit :

$$\mathbf{d}(f, \theta) = [e^{-j2\pi f \mathcal{F}_1(\tau(\theta))}, \dots, e^{-j2\pi f \mathcal{F}_M(\tau(\theta))}] \quad (3.5)$$

où  $\tau(\theta)$  est la *différence de temps d'arrivée* (TDOA : Time Difference Of Arrival) entre le premier et le deuxième capteur d'une onde plane arrivant d'une direction d'arrivée égale à  $\theta$ , et  $\mathcal{F}_m(\tau(\theta))$  est le délai temporel relatif entre le 1<sup>er</sup> et le  $m^{\text{ième}}$  capteur. Pour un réseau de capteurs linéaire uniforme,  $\mathcal{F}_m(\tau(\theta)) = (m-1)d \cos(\theta)/c$  où  $d$  est la distance entre deux capteurs et  $c$  est la vitesse du son (*cf.* figure 3.1).

L'estimation du filtre de formation de voies  $\mathbf{b}(f, \theta)$  pour la fréquence  $f$  et la direction d'arrivée  $\theta$  peut se faire d'une manière adaptative en fonction des données observées, ou d'une manière fixe, complètement indépendante des observations. C'est le sujet des deux prochaines sections.

## 3.2 Formation de voies adaptative

Dans une formation de voies statistiquement optimale, les poids du filtre sont estimés en se basant sur les statistiques des signaux reçus aux capteurs. Le but est d'optimiser la réponse directionnelle de la formation de voies de telle sorte que sa sortie contienne une contribution minimale des signaux provenant d'autres directions que la direction désirée [87]. Dans la suite, nous présentons deux exemples de ces formations de voies adaptatives calculés dans le domaine fréquentiel [15, 87] : la formation de voies MVDR ou Capon et la formation de voies à maximisation du rapport signal sur sources.

### 3.2.1 Capon ou MVDR

La méthode MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) de Capon est sans doute la méthode de formation de voies adaptative la plus utilisée. Le principe de MVDR est d'estimer les coefficients du filtre  $\mathbf{b}(f, \theta)$  qui minimise l'énergie du signal à la sortie  $\mathbb{E}(z^2(f, k)) = \mathbf{b}^H(f, \theta)\mathbf{R}_{xx}(f, k)\mathbf{b}(f, \theta)$ , avec la contrainte que le signal désiré  $S(f, k)$  ne soit pas affecté. Le problème MVDR s'écrit :

$$\min_{\mathbf{b}(f, \theta)} \mathbf{b}^H(f, \theta)\mathbf{R}_{xx}(f, k)\mathbf{b}(f, \theta) \text{ tel que } \mathbf{b}^H(f, \theta)\mathbf{H}(f, \theta) = 1 \quad (3.6)$$

où  $\mathbf{R}_{xx}(f, k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M X_m^H(f, k) X_m(f, k)$ . La solution de l'équation précédente donne le filtre de formation de voies par la méthode MVDR et pour la direction de visée  $\theta$  :

$$\mathbf{b}(f, \theta) = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1}(f, k)\mathbf{H}(f, \theta)}{\mathbf{H}(f, \theta)^H \mathbf{R}_{xx}^{-1}(f, k)\mathbf{H}(f, \theta)} \quad (3.7)$$

### 3.2.2 Maximisation du rapport signal sur bruit

Comme nous le verrons dans la section suivante, la formation de voies fixe exploite la géométrie du réseau de capteurs pour optimiser son diagramme de directivité. Cependant, la capacité d'une formation de voies fixe à supprimer le bruit et les sources interférentes est limitée par plusieurs facteurs comme l'ouverture géométrique du réseau de capteurs. Une manière d'obtenir un rapport signal sur bruit (SNR : Signal to Noise Ratio) supérieur quand la géométrie du réseau de capteurs est fixée passe par l'utilisation des caractéristiques des signaux source et bruit. Dans ce cas, on cherche à estimer le filtre optimal qui maximise le SNR à la sortie de la formation de voies.

Nous considérons le même modèle que dans le paragraphe précédent, avec l'ajout d'un vecteur de bruit  $\mathbf{v}(t) = [v_1(t), \dots, v_M(t)]^T$ . Le signal et le bruit sont supposés être décorrélés, la matrice d'autocorrélation du vecteur  $\mathbf{X}(f, k)$  s'écrit :  $\mathbf{R}_{xx}(f, k) = \mathbf{H}(f)^H \mathbf{R}_{ss}(f, k) \mathbf{H}(f, \theta) + \mathbf{R}_{vv}(f, k)$ , où  $\mathbf{R}_{vv}(f, k)$  est la matrice d'autocorrélation du bruit  $\mathbf{V}(f, k)$  dans le domaine temps-fréquence. Le SNR de sortie s'écrit à la fréquence  $f$  comme :

$$SNR(f) = \frac{\mathbf{b}^H(f, \theta) \mathbf{H}^H(f, \theta) \mathbf{R}_{ss}(f, k) \mathbf{H}(f, \theta) \mathbf{b}(f, \theta)}{\mathbf{b}^H(f, \theta) \mathbf{R}_{vv}(f, k) \mathbf{b}(f, \theta)} \quad (3.8)$$

Dans un traitement par réseau de capteurs, nous espérons supprimer le plus de bruit possible. Une méthode possible pour réaliser ceci est d'estimer le filtre  $\mathbf{b}(f, \theta)$  qui maximise  $SNR(f)$ , la solution est le vecteur propre associé à la plus grande valeur propre de  $\mathbf{R}_{vv}^{-1}(f, k) \mathbf{R}_{ss}(f, k)$ , avec  $\mathbf{H}(f, \theta)$  égal au vecteur directionnel du réseau de capteurs.

### 3.3 Formation de voies fixe

Dans une formation de voies fixe, les poids des filtres spatio-temporels  $\mathbf{b}(f, \theta)$  sont estimés de telle sorte que la réponse directionnelle  $r(f, \theta) = \mathbf{b}^H(f, \theta) \mathbf{d}(f, \theta)$  de la formation de voies soit approximée à une réponse désirée  $r_d(f, \theta)$ , indépendamment des données observés à la sortie des capteurs. Ceci est similaire à la construction de filtres RIF à partir d'un gabarit.

Par analogie avec les techniques employées pour la construction des filtres RIF, les poids des filtres de formation de voies  $\mathbf{b}(f, \theta)$  sont ceux qui minimisent la norme  $l_p$  pondérée de la différence entre la réponse directionnelle effective et la réponse directionnelle désirée. Nous considérons la technique la plus utilisée qui est la méthode des moindres carrés. Pour estimer les filtres de formation de voies fixe avec l'optimisation de la norme  $l_2$ , nous considérons la minimisation du carré de l'erreur entre la réponse directionnelle effective et la réponse directionnelle désirée [15] :

$$\min_{\mathbf{b}(f, \theta)} \sum_{\theta \in \Theta} \mathcal{V}(\theta) |r(f, \theta) - r_d(f, \theta)|^2 \quad (3.9)$$

$\Theta$  étant un ensemble d'angles couvrant l'espace où se trouve la source qui nous intéresse (exemple :  $\Theta = [0, \pi]$ ) et  $\mathcal{V}(\theta)$  est une fonction de poids positive pour accentuer ou diminuer l'importance de certains angles. En remplaçant l'expression de la réponse directionnelle (3.4) dans l'équation (3.9), l'erreur entre cette réponse

directionnelle et la réponse directionnelle désirée à la fréquence  $f$  s'écrit :

$$\epsilon^2(f) = \mathbf{b}^H(f, \theta \in \Theta) \mathbf{Q}(f) \mathbf{b}(f, \theta \in \Theta) - 2\mathbf{b}^H(f, \theta \in \Theta) \mathbf{p}(f) + \sum_{\theta \in \Theta} \mathcal{V}(\theta) |r_d(f, \theta)|^2 \quad (3.10)$$

où :

$$\mathbf{Q}(f) = \sum_{\theta \in \Theta} \mathcal{V}(\theta) \mathbf{d}(f, \theta) \mathbf{d}^H(f, \theta) \quad (3.11)$$

$$\mathbf{p}(f) = \sum_{\theta \in \Theta} \mathcal{V}(\theta) \text{Re}[\mathbf{d}(f, \theta) r_d(f, \theta)] \quad (3.12)$$

$\text{Re}(\cdot)$  étant la partie réelle.

Faire la différentielle de  $\epsilon^2$  par rapport à  $\mathbf{b}(f, \theta)$  et mettre le résultat à zéro donne l'expression du filtre de formation de voies selon la méthode des moindres carrés :

$$\mathbf{b}_{MC}(f, \theta \in \Theta) = \mathbf{Q}^{-1}(f) \mathbf{p}(f) \quad (3.13)$$

On remarque que la matrice  $\mathbf{Q}(f)$  est fonction de  $\mathcal{F}_m(\tau(\theta))$  et que le vecteur  $\mathbf{p}(f)$  est fonction de  $\mathcal{F}_m(\tau(\theta))$  et de  $r_d(f, \theta)$ , par conséquent, le filtre au sens des moindres carrés dépend de la géométrie du réseau de capteurs et de la réponse directionnelle désirée. Si nous voulons construire une formation de voies qui laisse passer le signal incident venant d'un angle entre  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , la réponse directionnelle désirée s'écrit dans ce cas :

$$r_d(f, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.14)$$

### 3.4 Les fonctions de transfert de tête (HRTF)

La localisation d'une source sonore par un humain se fait à travers deux indices binauraux [16] : la *différence de temps interaural* (ITD : Interaural Time Difference) et la *différence d'intensité interaurale* (IID : Interaural Intensity Difference). L'ITD est la différence en temps d'arrivée d'un front d'onde sonore aux oreilles droite et gauche. L'IID est la différence en l'amplitude d'un son qui atteint les oreilles droite et gauche. Il est connu que l'ITD et l'IID sont importants pour la perception du son dans un plan horizontal. Cependant, si la source sonore est autorisée à varier en

élévation et distance, l'ITD et l'IID ne spécifient pas une unique position spatiale : ils sont identiques pour des sources sonores placées sur un cône nommé le cône de confusion (*cf.* figure 3.2). La localisation d'une source placée sur ce cône n'est pas possible si nous utilisons uniquement les paramètres ITD et IID.

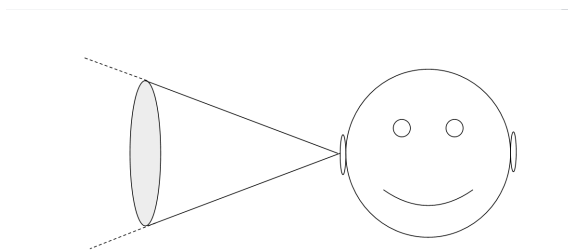


FIGURE 3.2 – Le cône de confusion

Cependant, le système d'audition humain est capable de définir les directions de ces sources. Ceci s'explique par le fait que pour l'audition humaine, une source sonore subit un filtrage spectral par la tête et le pavillon de l'oreille, ainsi, une fonction de transfert entre la source et chacune des deux oreilles est définie : c'est la *fonction de transfert de tête* (HRTF : Head Related Transfer Function).

Une HRTF prend en compte la différence de temps interaural, la différence d'intensité interaurale et la forme de la tête et du pavillon. La HRTF caractérise comment un son émis d'une direction spécifique et altéré par la tête et le pavillon est reçu à l'oreille. La notion de HRTF reste la même si on remplace la tête humaine par la tête d'un mannequin de vitrine (dummy) et les deux oreilles par deux microphones. Nous gardons toujours la même notion de HRTF si nous augmentons le nombre de capteurs à plus que 2. Avoir plus que deux capteurs fixés autour d'une tête permet de capturer plus précisément l'effet de cette tête sur le champ sonore environnant.

Nous étendons le concept habituel de HRTF binaurales au contexte de l'audition des robots où un humanoïde est équipé d'un réseau de microphones (plus de deux capteurs). Dans notre cas, la HRTF  $h_m(f, \theta)$  à la fréquence  $f$  caractérise comment un signal émis d'une direction spécifique  $\theta$  est reçu au  $m^{\text{ième}}$  microphone fixé à la tête. La réponse impulsionnelle qui correspond à la représentation temporelle de la HRTF s'appelle *réponse impulsionnelle de tête* (HRIR : Head Related Impulse Response), un exemple de HRIR est montré à la figure 3.3.



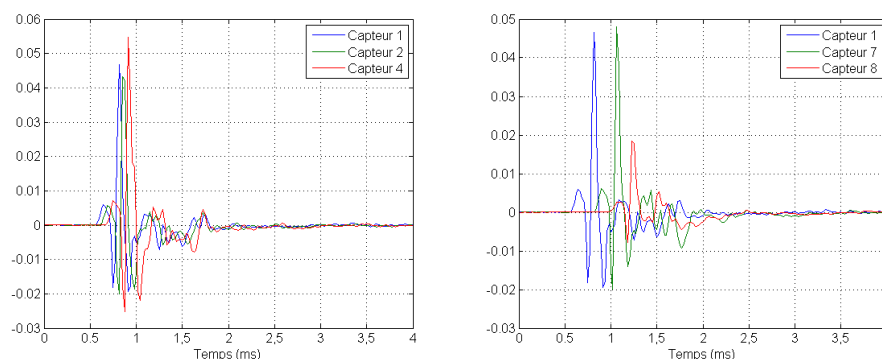


FIGURE 3.3 – Les réponses impulsionnelles de têtes (HRIR : Head Related Impulse Response) : la représentation temporelle des HRTF pour différents micros de la tête du mannequin de vitrine

## 3.5 Formation de voies fixe en utilisant les HRTF

### 3.5.1 Vers la modélisation de la variété du réseau de capteurs

Dans le cas de l'audition des robots, la géométrie du réseau de microphones est fixée une fois pour toute. Une fois la géométrie du réseau de capteurs connue et les directions de visée choisies par une technique de localisation ou autre, la formation de voies fixe utilise ces informations spatiales pour construire le diagramme de directivité désiré. Les caractéristiques du diagramme de directivité (largeur des lobes, amplitudes des lobes secondaires et la position des zéros) sont donc fixées pour tous les scénarios<sup>1</sup> et calculées une seule fois, indépendamment des mélanges mesurés aux capteurs.

Afin d'estimer les filtres de formation de voies qui donneront le diagramme de directivité voulu, la technique des moindres carrés introduite dans la section précédente est utilisée. Mais pour procéder à l'estimation de ces filtres, nous avons besoin de calculer les vecteurs directionnels relatif à la géométrie du réseau de capteurs. Dans le cas de l'audition des robots, les capteurs sont souvent fixés autour de la tête du robot. Le modèle en champ libre du vecteur directionnel présenté dans l'équation (3.5) ne prend pas en compte l'influence de la tête sur le champ acoustique environnant, et dans ce cas, la variété du réseau de capteurs n'est pas modélisée (inconnue).

Afin de modéliser la variété du réseau de capteurs, nous proposons d'utiliser les HRTF comme vecteurs directionnels pour l'estimation des filtres de formation

1. Ici, le mot « scénario » fait référence aux différentes directions d'arrivée que l'on peut avoir dans notre problème de séparation ainsi qu'au changement du nombre des sources.

de voies et remplacer la variété inconnue du réseau de capteurs par une distribution discrète de HRTF d'un groupe de  $N_s$  directions de visée choisi *a priori*  $\Theta = [\theta_1, \dots, \theta_{N_s}]$ . Les HRTF sont mesurées dans une chambre anéchoïque comme ça sera expliqué à la section 7.6.

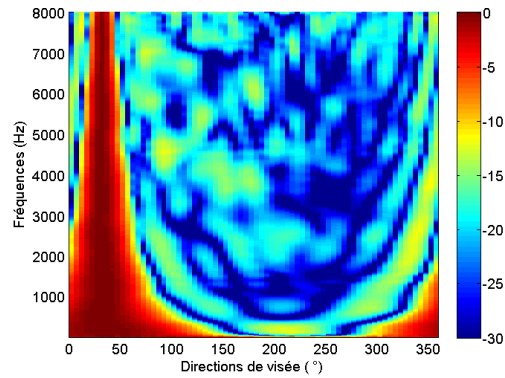
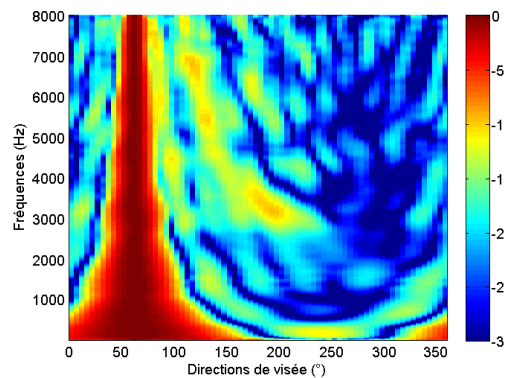
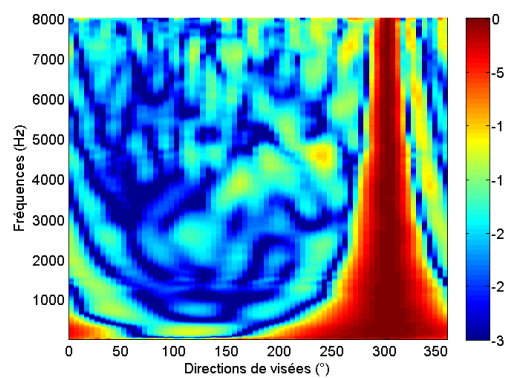
(a) Angle de visée  $\theta = 30^\circ$ (b) Angle de visée  $\theta = 60^\circ$ (c) Angle de visée  $\theta = 300^\circ$ 

FIGURE 3.4 – La réponse directionnelle  $r_{\text{hrtf}}(f, \theta) = \mathbf{b}^H(f, \theta) \mathbf{d}_{\text{hrtf}}(f, \theta)$  (en dB) relative à différents angles de visée, construite à partir des HRTF

### 3.5.2 Estimation des filtres de formation de voies par les HRTF

Nous proposons d'utiliser les HRTF comme vecteurs directionnels  $\{\mathbf{d}(f, \theta)\}_{\theta \in \Theta}$ , où  $\Theta = \{\theta_1, \dots, \theta_{N_S}\}$  est un groupe de  $N_S$  directions de visée choisi *a priori*. Soit  $h_m(f, \theta)$  une fonction de transfert de tête d'un point d'émission localisé à  $\theta$  jusqu'au  $m^{\text{ième}}$  capteur, à la fréquence  $f$ . Le vecteur directionnel est donc :

$$\mathbf{d}_{\text{hrtf}}(f, \theta) = [h_1(f, \theta), \dots, h_M(f, \theta)]^T \quad (3.15)$$

Nous voulons une formation de voies qui extrait le signal émis de la direction  $\theta_i$ . Dans ce cas, la réponse directionnelle désirée s'écrit :

$$r_d(f, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta = \theta_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.16)$$

Étant données l'équation (3.15) et la réponse directionnelle (3.16), le filtre de formation de voies selon la méthode des moindres carrés (*cf.* équation (3.13)) et pour une direction de visée  $\theta_i$  s'écrit :

$$\mathbf{b}(f, \theta_i) = \mathbf{R}_{\mathbf{dd}}^{-1}(f) \mathbf{d}_{\text{hrtf}}(f, \theta_i) \quad (3.17)$$

où  $\mathbf{R}_{\mathbf{dd}}(f) = \frac{1}{N_S} \sum_{\theta \in \Theta} \mathbf{d}_{\text{hrtf}}(f, \theta) \mathbf{d}_{\text{hrtf}}^H(f, \theta)$ . Nous considérons la version normalisée de ce filtre :

$$\mathbf{b}(f, \theta_i) = \frac{\mathbf{R}_{\mathbf{dd}}^{-1}(f) \mathbf{d}_{\text{hrtf}}(f, \theta_i)}{\mathbf{d}_{\text{hrtf}}^H(f, \theta_i) \mathbf{R}_{\mathbf{dd}}^{-1}(f) \mathbf{d}_{\text{hrtf}}(f, \theta_i)} \quad (3.18)$$

Si nous voulons choisir un sous-ensemble de  $K$  directions de visée  $\theta_1, \dots, \theta_K$  à partir des  $N_S$  directions de visée pour lesquelles nous avons calculé les filtres de formation de voies, la matrice de formation de voies  $\mathbf{B}(f)$  s'écrit comme suit :

$$\mathbf{B}(f) = [\mathbf{b}(f, \theta_1), \dots, \mathbf{b}(f, \theta_K)]^T \quad (3.19)$$

La figure 3.4 montre des exemples de réponses directionnelles construites à partir des HRTF.

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une classe de méthodes de séparation de sources : la formation de voies. Après une introduction au principe de la formation de voies, nous avons consacré la deuxième section de ce chapitre à la formation de voies adaptative qui utilise les statistiques des données aux capteurs et nous nous sommes intéressés dans la troisième section à la formation de voies fixe, indépendante des données reçues. C'est ce dernier type de formation de voies qui nous intéresse dans nos travaux. Nous avons étendu le principe de formation de voies fixe à l'audition des robots en tenant compte de l'effet de la tête de celui-ci sur le champ sonore proche et ceci en modélisant la variété du réseau de capteurs par les fonctions de transfert de tête (HRTF). Cette nouvelle méthode de séparation géométrique basée sur les HRTF constitue un pilier de nos travaux sur la séparation de sources et sera utilisée comme un prétraitement à l'étape de séparation de sources dans nos algorithmes de séparation à deux étapes.

---