



**HAL**  
open science

# Pondération multipolaire utilisée dans les systèmes microphoniques des aides auditives pour amélioration de l'intelligibilité de la parole dans le bruit

Joël Ducourneau, Phillipe Andre, Adil Faiz, Jacques Chatillon

## ► To cite this version:

Joël Ducourneau, Phillipe Andre, Adil Faiz, Jacques Chatillon. Pondération multipolaire utilisée dans les systèmes microphoniques des aides auditives pour amélioration de l'intelligibilité de la parole dans le bruit. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00538358

**HAL Id: hal-00538358**

**<https://hal.science/hal-00538358>**

Submitted on 22 Nov 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Pondération multipolaire utilisée dans les systèmes microphoniques des aides auditives pour amélioration de l'intelligibilité de la parole dans le bruit

J. Ducourneau<sup>1</sup>, P. André<sup>1</sup>, A. Faiz<sup>1</sup>, J. Chatillon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculté de Pharmacie, Université Henri Poincaré  
5, rue Albert Lebrun 54001 Nancy, France, {Joel.Ducourneau, Adil.Faiz}@pharma.uhp-nancy.fr

<sup>2</sup>Institut National de Recherche et Sécurité  
rue du Morvan, CS 60027, 54519 Vandœuvre-lès-Nancy, France, Jacques.Chatillon@inrs.fr

La directivité microphonique des aides auditives est très utilisée pour la localisation spatiale et un meilleur rapport signal/bruit. Elle participe par conséquent à l'amélioration de l'intelligibilité de la parole dans des situations bruyantes. Les systèmes microphoniques directionnels classiques, comportant généralement deux microphones, fonctionnent selon un principe de sommation des signaux incidents et permettent l'obtention de courbes de directivité diverses. La pondération multipolaire appliquée à des antennes acoustiques, dont le principe repose sur la dérivation des signaux reçus sur chaque capteur, permet d'obtenir des directivités dont le lobe principal conserve un niveau constant en fonction de la fréquence et les lobes secondaires sont très atténués. Nous avons mis en place une antenne acoustique utilisant trois microphones du type de ceux utilisés dans les aides auditives actuelles, puis nous avons appliqué la pondération multipolaire au signal reçu respectivement par chaque capteur. Après avoir validé expérimentalement la directivité théorique attendue en chambre sourde, nous avons comparé, dans des conditions de rapport signal/bruit variable, notre système microphonique final à ceux disponibles sur certains appareils de correction auditive disponibles sur le marché. Au-delà des problèmes d'appairage en phase rencontrés entre les microphones pour des fréquences bien spécifiques, les performances en termes d'intelligibilité dans le bruit du système final sont très prometteuses comparés aux systèmes classiques des aides auditives.

## 1 Introduction

La compréhension de la parole dans le bruit est un atout important que les aides auditives offrent aujourd'hui aux malentendants appareillés. Des systèmes microphoniques directionnels sont souvent incorporés dans ce type d'appareil afin de filtrer spatialement les bruits reçus dans des incidences bien déterminées. Dans le cas d'un microphone directionnel classique, un écran mécanique poreux est utilisé pour retarder le son entrant à son port arrière. Pour un doublet microphonique, on utilise un filtre électronique pour retarder le signal produit par le son capté par le microphone arrière. Ces systèmes directionnels sont capables d'améliorer considérablement le rapport signal sur bruit [1]. Des auteurs comme L. Jones Douglas [2] ont pris en compte, dans le traitement microphonique, la fonction de transfert de la tête (HRTF pour head-related transfer function) afin d'améliorer encore la directivité. Ce système utilise l'asymétrie de cette fonction de transfert HRTF pour réaliser des directivités plus performantes que les systèmes cardioïdes.

Cette publication décrit une méthode de pondération multipolaire appliquée à un système microphonique utilisé dans les appareils auditifs. La pondération multipolaire a récemment été utilisée sur une antenne acoustique afin d'obtenir une directivité présentant un lobe principal étroit dans l'espace et indépendant de la fréquence avec des lobes secondaires très atténués [3].

Après avoir rappelé les différentes directivités théoriques obtenues avec un microphone directionnel simple et celles obtenues avec un doublet microphonique, nous présenterons la technique de la pondération multipolaire. Nous montrerons alors l'avantage de cette

pondération en comparant des spectrogrammes de signaux vocaux dans le bruit à la sortie de plusieurs aides auditives performantes en termes de directivité et présentes sur le marché avec ceux obtenus avec un système microphonique utilisant la technique multipolaire.

## 2 Directivité des microphones

### 2.1 Microphones directionnels

Le principe du microphone directionnel classique utilise une membrane sensible sur ses deux faces aux variations locales de pression acoustique. L'ajout sur l'une de ses deux entrées (voir figure 1) d'un filtre à retard, constitué par un matériau résistif poreux, et de durée  $T_r$  idéalement identique pour toutes les fréquences, permet d'obtenir une courbe de directivité dite "cardioïde" (voir figure 2). La durée de ce retard est choisie en fonction de la distance  $d$  entre les deux entrées du microphone.

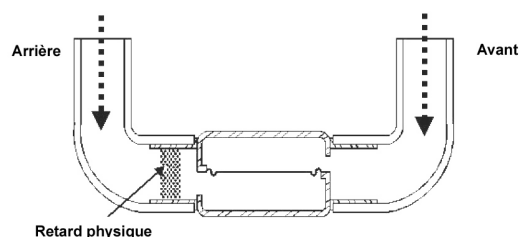


Figure 1 : Schéma de principe d'un microphone directionnel

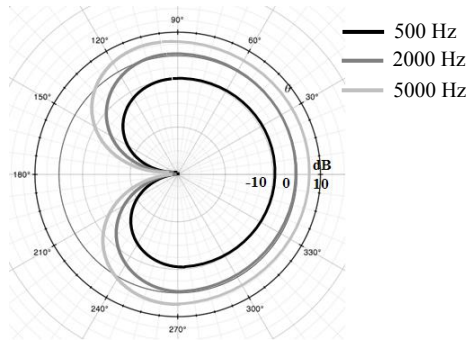


Figure 2 : Courbe polaire cardioïde d'un microphone directionnel classique,  $d=17\text{mm}$

## 2.2 Doublet microphonique

Dans le cas d'un doublet microphonique, on emploie deux microphones omnidirectionnels distincts, ainsi qu'un retard  $T_r$  géré électroniquement, donc variable. Le retard  $T_m$  est quant à lui, fixé par les dimensions du réseau. On calcule ensuite la différence entre les signaux électriques issus des deux microphones  $p_1$  et  $p_2$  afin d'obtenir une courbe de directivité variable  $D(\alpha)$ .

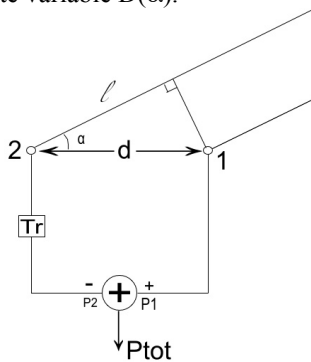


Figure 3 : Schéma de principe d'un réseau directionnel à deux microphones

On montre que cette fonction de directivité dépend des deux retards  $T_r$  et  $T_m$ , de l'angle d'incidence  $\alpha$  et la fréquence  $f$  :

$$D(\alpha) = \sin\left(\pi f \times T_r \left(1 + \frac{T_m}{T_r} \cos \alpha\right)\right) \quad (1)$$

Suivant le rapport  $\frac{T_m}{T_r}$  égal à  $\sqrt{3}$  ou 3 respectivement, on obtient des courbes de directivités dites supercardioïde ou hypercardioïde.

Par simple variation électronique du paramètre  $T_r$ , toutes les courbes de directivités intermédiaires sont envisageables. Il est ainsi possible d'adapter la directivité à l'environnement en détectant l'angle de la source sonore à annuler, et en variant le paramètre  $T_r$  de façon adéquate. La directivité adaptative repose en partie sur ce principe.

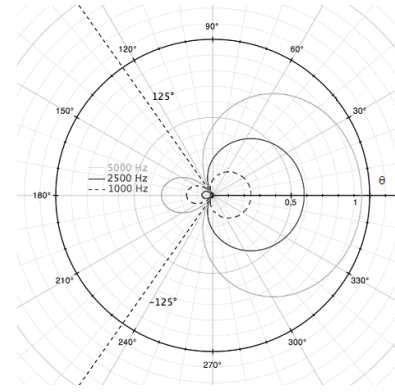


Figure 4 : Courbe de directivité supercardioïde –  $T_m=50\mu\text{s}$ .

$$-\frac{T_m}{T_r} = \sqrt{3}$$

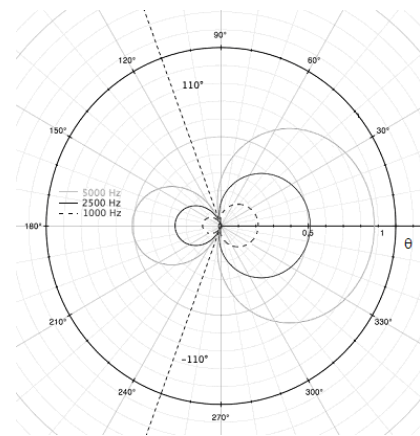


Figure 5 : Courbe de directivité hypercardioïde –  $T_m=50\mu\text{s}$ .

$$-\frac{T_m}{T_r} = 3$$

Cependant, afin d'obtenir des résultats valables, l'appariage des microphones en gain et en phase est nécessaire. S'il n'est pas effectué, il sera impossible d'obtenir une courbe de directivité utilisable, celle-ci se dégradant très vite si les microphones ne sont pas cohérents entre eux.

## 3 Les antennes acoustiques

Les antennes acoustiques permettent de localiser des sources mais également de séparer un signal désiré dans un environnement bruyant [4]. De nombreuses pondérations pour ce type d'antennes dites linéaires conventionnelles (pondération uniforme, triangulaire, Blackman, Hamming...) donnent des diagrammes de directivité étroits en hautes fréquences mais relativement omnidirectionnels en basses fréquences. Pour assurer des directivités constantes en fréquences, plusieurs techniques basées sur des espacements différents entre capteurs sont apparues [5-6]. La pondération de Schelkunoff dédiée à des antennes hyperdirectives assure également des directivités dont le lobe principal reste constant en basses fréquences [7]. Cependant ces techniques exigent un grand nombre de capteurs et l'antenne résultante est souvent de trop grande dimension. Ces antennes associées à ce type de pondération ne peuvent donc pas être utilisées dans des appareils auditifs de petite taille.

La pondération multipolaire fait partie des pondérations les plus performantes en donnant des diagrammes de directivité dont le lobe principal est étroit, constant en fréquence et dont les lobes secondaires sont très atténués [3].

### 3.1 Pondération multipolaire

Le principe de l'antenne linéique consiste en un alignement de  $N+1$  microphones. Ceux-ci sont omnidirectionnels, identiques et équidistants de  $d$ , placés en champ lointain par rapport à une source sonore, et donc soumis à des ondes considérées comme planes [8] (voir figure 6 où  $\theta$  représente l'angle entre l'antenne et la direction des ondes). Basé sur cette hypothèse d'ondes planes, le gradient spatial de pression acoustique s'écrit :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_1 - p_2}{d} = -jk.A.c \cos(\theta).e^{j(\omega t - kr)} \quad (2)$$

L'expression de la pression polarisée pour l'antenne dipolaire est alors :

$$p_{\text{dip}} = \frac{p_1 - p_2}{-jkd} = A \cos(\theta).e^{j(\omega t - kr)} \quad (3)$$

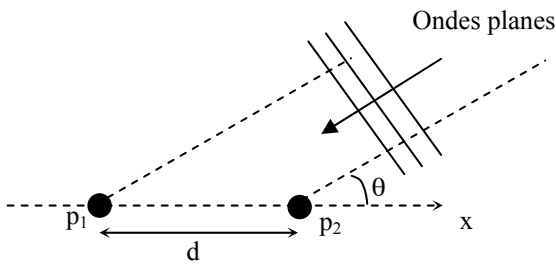


Figure 6 : Antenne dipolaire

L'équation (3) montre que la directivité de l'antenne dipolaire du premier ordre varie en  $\cos(\theta)$ . Pour obtenir des directivités plus étroites, nous devons augmenter l'ordre  $i$  de la dérivée spatiale pour atteindre une directivité variant en  $\cos^{i-1}(\theta)$ . Si l'antenne comprend par exemple 5 capteurs, nous pouvons effectuer 4 dérivées spatiales successives pour obtenir une directivité en  $\cos^4(\theta)$ . Si nous prenons le troisième microphone central comme référence dans cet exemple, l'expression de pression acoustique à l' $i^{\text{ème}}$  microphone sera :

$$p_i = P e^{-jk[r+(3-i).d \cos(\theta)]} \quad (4)$$

avec  $P = A e^{j\omega t}$

La première dérivée spatiale calculée à partir de la différence finie entre les deux pressions acoustiques  $p_1$  et  $p_2$  s'écrit :

$$\frac{p_1 - p_2}{-jkd} = P e^{-jk\left(r + \frac{3d}{2} \cos(\theta)\right)} \times \cos(\theta) \times \frac{\sin\left(k \frac{d}{2} \cos(\theta)\right)}{\left(k \frac{d}{2} \cos(\theta)\right)} \quad (5)$$

L'équation (5) est comparable à l'expression de vitesse acoustique au point milieu entre des microphones 1 et 2, soit :

$$v = \frac{-1}{jk} \frac{dp_{12}}{dx} = P e^{-jk\left(r + \frac{3d}{2} \cos(\theta)\right)} \cos(\theta) \quad (6)$$

L'erreur commise sur l'expression de la vitesse acoustique est donc une fonction sinus cardinal en raison de la différence finie effectuée par approximation entre les deux pressions acoustiques :

$$\varepsilon = \text{sinc}\left(k \frac{d}{2} \cos(\theta)\right) \quad (7)$$

Le gradient de pression acoustique (équation (5)) doit être corrigé en utilisant cette fonction correctrice  $\varepsilon$ . Quand cette méthode est appliquée à une antenne acoustique constituée de  $N+1$  microphones, l'erreur commise sur la  $N^{\text{ième}}$  dérivée sera :

$$\varepsilon = \text{sinc}^N\left(k \frac{d}{2} \cos(\theta)\right) \quad (8)$$

Les fonctions correctives permettent d'obtenir un lobe principal de directivité constant en fréquence. Cependant il apparaît un lobe arrière et des lobes secondaires qu'il est possible d'éliminer en sommant la fonction impaire conçue à partir des deux dernières dérivées d'ordre  $N-1$  à son module (fonction paire). Cette technique permet d'annuler les résidus de directivité de  $-\pi$  à  $-\pi/2$  et de  $+\pi/2$  à  $+\pi$ . Cette technique permet au final d'établir une courbe de directivité de l'antenne multipolaire améliorée.

La figure 7 montre le diagramme de directivité théorique obtenu pour une antenne linéaire formée par 3 microphones électrets espacés de 12 mm. La source est placée 1,5 m du centre de l'antenne. Des lobes secondaires sont atténués de plus de 20 dB. Le lobe principal s'élargit légèrement aux fréquences basses : au-dessous de 300 Hz pour l'espacement de 12 mm. Une directivité plus étroite serait difficile à réaliser avec un aussi faible nombre de capteurs.

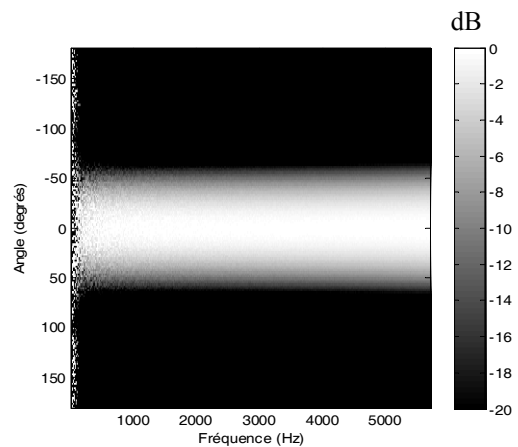


Figure 7 : Diagramme de directivité théorique - espacement de 12 mm - pondération multipolaire

### 3.2 Validation expérimentale de la directivité pour une antenne constituée de trois microphones électrets utilisés dans les aides auditives

L'antenne linéaire est constituée de trois microphones Pulse de type 1M033 0801 (voir figure 8). La différence de phase entre chaque microphone induit un lobe principal instable en basses fréquences. Chaque microphone a été calibré avec une source de bruit blanc positionnée à 1,5 m pour éviter ce problème d'instabilité et pour produire un niveau constant du lobe principal sur une large bande passante.

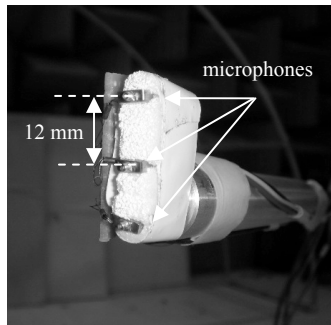


Figure 8 : Antenne constituée de 3 microphones électrets

La directivité de cette antenne a été validée expérimentalement dans une chambre semi-anéchoïque. La source utilisée est constituée d'un haut-parleur de 100 mm de diamètre et d'un cône exponentiel comme bouche de sortie. Posée sur le sol réfléchissant, elle se comporte comme un monopole. Un système de rotation permet à l'antenne de pivoter autour de son capteur central et ainsi de mesurer la directivité en fonction de l'angle  $\theta$ . La source générant du bruit blanc a été positionnée à 1,2 m du centre de l'antenne.

Le diagramme de directivité représenté sur la figure (9) peut être comparé au diagramme théorique de la figure (7). La pondération multipolaire présente, comme prévu, un lobe principal constant en fréquence. Les lobes secondaires sont atténués de plus de 20 dB. Cela dit, la directivité apparaît bruitée autour de 1350 Hz, 4400 Hz et 5300 Hz. A 4400 Hz, le niveau de la source sonore étant faible, cela entraîne une chute de cohérence des signaux entre chaque capteur. Autour de 1350 et 5300 Hz, les signaux reçus par les capteurs sont fortement perturbés à cause d'une mauvaise sensibilité d'un des microphones à ces fréquences. Comme prévu par la théorie, on observe un élargissement du lobe principal en dessous de 300 Hz pour cet espacement de 12 mm entre capteur.

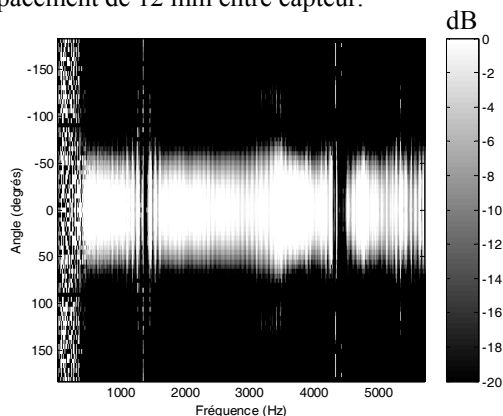


Figure 9 : Diagramme de directivité expérimentale - espacement de 12 mm - pondération multipolaire

## 4 Comparaison de l'intelligibilité de la parole dans le bruit entre l'antenne multipolaire et deux appareils auditifs directionnels

### 4.1 Configuration expérimentale

Nous avons mesuré et comparé les spectrogrammes d'un signal de parole superposé à un bruit de cocktail party. Ces spectrogrammes ont été obtenus avec, d'une part l'antenne linéaire étudiée utilisant la pondération multipolaire, et, d'autre part, deux appareils auditifs directionnels. Le premier, appelé HA-A, possède un système directionnel adaptatif avec deux microphones espacés à 12 mm. Le deuxième, appelé HA-B, possède trois microphones espacés à 6 mm et fonctionne également comme un système directionnel adaptatif. Le logiciel de Noah a été utilisé pour programmer les deux appareils auditifs. Afin de comparer uniquement l'effet de la directivité sur l'intelligibilité de la parole dans le bruit, chaque aide auditive a été programmée de manière unique : courbe de réponse linéaire sur la majeure partie du spectre étudié. Tous les systèmes de traitement de signal, à part le programme directionnel de chaque appareil auditif, ont été éteints.

Les mesures ont été réalisées dans une chambre semi-anéchoïque à l'Institut national de recherche et sécurité (INRS). Chaque système de réception a été alternativement placé au centre de 5 haut-parleurs. Celui de devant émettait un signal vocal (phrases de Combescure, figurant sur le CD n°3 de la collection d'Audiométrie Vocale éditée par le Collège National d'Audioprothèse) pendant que les quatre autres émettaient un bruit de cocktail party.

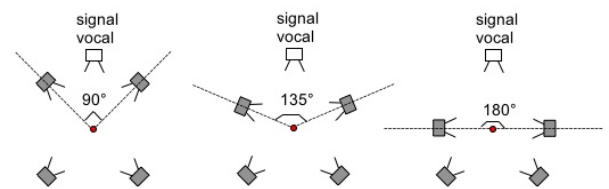


Figure 10 : Configurations géométriques d'émission du signal de parole et du bruit cocktail party

3 positions différentes pour les haut-parleurs frontaux diffusant le bruit de cocktail-party ont été étudiées : angulation à 90°, 135° et 180° (voir figure (10)). Nous avons fait varier pour chacune de ces configurations, le rapport signal/bruit au point de mesure : +5 dB, 0 dB, -5 dB, -10 dB.

Les 2 appareils de correction auditive ont été reliés, à l'aide d'un coupleur de 2 cm<sup>3</sup>, à un microphone demi pouce Brüel & Kjær Type 4188 préamplifié (préamplificateur Brüel & Kjær Type 2671 et alimentation externe Brüel & Kjær Type 5935), qui permet d'adresser le signal au système d'acquisition OROS OR25 PC-PACK 16 voies.

Chaque mesure a consisté en la diffusion simultanée, pendant 10 secondes, du signal vocal et du bruit de cocktail-party. Pour l'antenne multipolaire, les signaux issus des trois microphones sont enregistrés sur un ordinateur PC afin de procéder au traitement multipolaire via le même système d'acquisition.

## 4.2 Résultats

Nous présentons ici les spectrogrammes obtenus dans la configuration la plus défavorable : rapport signal sur bruit de -10 dB et angulation des haut-parleurs frontaux égale à 90°. Les figures 10 (a) et (b) représente respectivement le spectrogramme de la phrase de Combescure et le bruit de cocktail party choisis. Les figures 10 (c), (d), (e), (f), (g) et (h) représentent les spectrogrammes du signal vocal superposés au bruit de cocktail party. La figure 10 (c) montre le spectrogramme pour le mode omnidirectionnel (sans traitement directif) et respectivement les figures 10 (d) et (e) en mode directionnels adaptatifs pour les deux aides auditives. La figure 10 (f) représente le spectrogramme mesuré par le capteur central de l'antenne linéaire (pas de traitement multipolaire) et la figure 10 (g) le spectrogramme mesuré par le macro-capteur de l'antenne multipolaire (avec traitement).

Nous notons que le mode directionnel de l'aide auditive HA-B assure une meilleure émergence du signal vocal par rapport au bruit de cocktail party que l'aide auditive HA-A : la figure 10 (d) montre clairement que le signal vocal est encore masqué par le bruit en dessous de 2000 Hz alors que l'on perçoit les formants dans cette même plage fréquentielle avec l'aide auditive HA-B (figure 10 (e)).

L'antenne linéaire multipolaire atténue le bruit sur une large partie du spectre, les formants en dessous de 2000 Hz et les explosions occlusives de la voix sont clairement visibles dans la figure 10 (g). Cette antenne donne globalement une meilleure intelligibilité de la parole dans le bruit. Cependant, nous notons la présence d'artéfacts autour de 1300 Hz et 6000 Hz dus aux chutes de sensibilités des trois microphones à ces fréquences. L'espacement de 12 mm choisis entre capteurs ainsi que le filtre passe-haut utilisé dans le traitement et dont la fréquence de coupure a été fixée à 100 Hz, entraînent un comportement omnidirectionnel de l'antenne en dessous de 300 Hz comme prévu. La pondération multipolaire assure un filtrage spatial qui permet d'obtenir une importante atténuation du bruit émis par les haut-parleurs frontaux. Pour la même configuration géométrique, l'antenne multipolaire donne des résultats identiques pour différents rapports signal sur bruit (voir figure 10 (h))

En résumé, l'antenne multipolaire permet d'obtenir une importante émergence de la parole dans le bruit sur une large bande de fréquences comprises entre 300 et 6000 Hz. Cependant cette technique multipolaire est sensible à la calibration des microphones, ceci pouvant induire au niveau de la directivité, des instabilités du lobe principal à des fréquences discrètes et donc provoquer des pertes de l'intelligibilité de la parole.

## 5 Conclusion

L'objectif de ce travail a été de développer une antenne acoustique performante en termes de directivité (lobe principal étroit et constant en fréquence et des lobes secondaires très atténués) à l'aide de microphones utilisés dans les aides auditives. La pondération multipolaire est relativement efficace pour ce type d'antenne car elle nécessite un faible nombre de microphones. La directivité obtenue avec ce type de pondération pour une antenne constituée de 3 microphones a été validée sur une large bande passante comprise entre 300 à 6000 Hz.

Nous avons par la suite, comparé les performances en termes d'intelligibilité de la parole dans le bruit de ce type d'antenne avec celles mesurés avec deux appareils auditifs à directivité adaptative. L'antenne acoustique assure une meilleure émergence de la parole dans le bruit sur la bande passante escomptée par rapport aux deux appareils. Cependant, la performance de la technique multipolaire reste très liée à la sensibilité des capteurs.

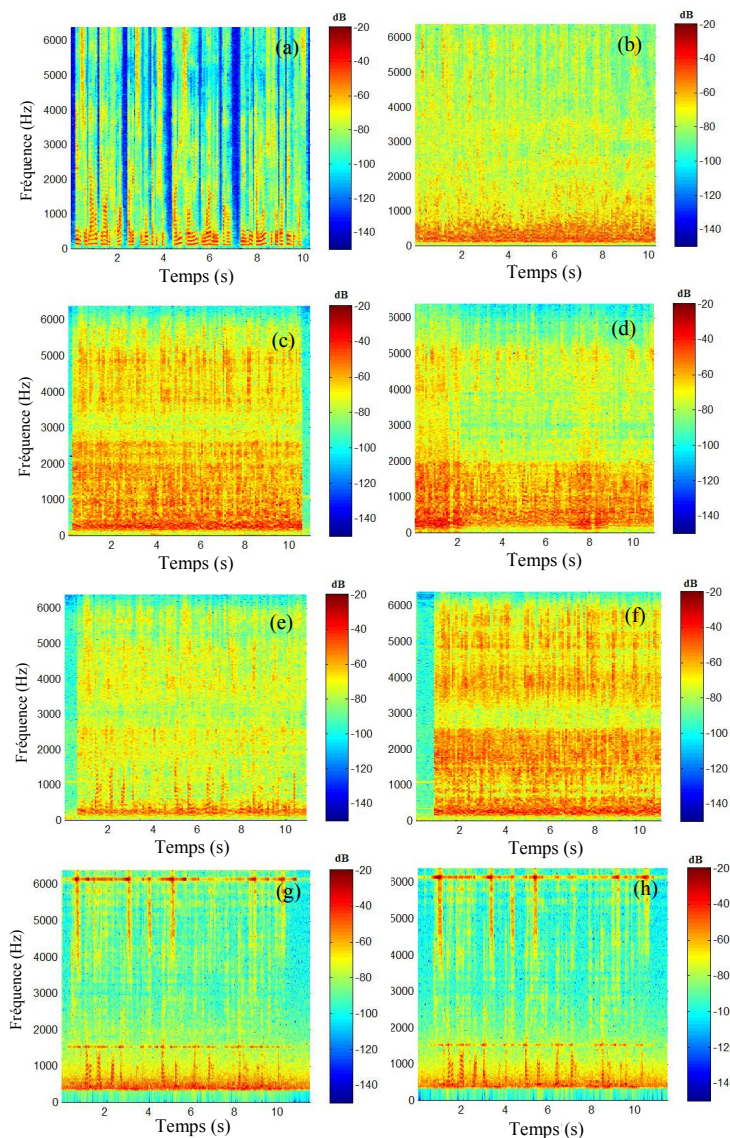


Figure 10 : Spectrogrammes expérimentaux

- (a) : Spectrogramme du signal vocal
- (b) : Spectrogramme du bruit de cocktail party
- Spectrogramme du signal vocal superpose au bruit de cocktail party – Rapport signal/bruit = -10dB
- (c) : Mode omnidirectionnel mode – HA-A,
- (d) : Mode directionnel adaptatif – HA-A,
- (e) : Mode directionnel adaptatif – HA-B,
- (f) : Capteur central de l'antenne multipolaire (omnidirectional mode),
- (g) : Antenne multipolaire,
- (h) : Antenne multipolaire - Rapport signal/bruit = +5dB

## Références

- [1] Valente M., Sweetow R., May A, “Using Microphone Technology to Improve Speech Recognition”, *High Performance Hearing Solutions*, 3, 10-13. (1999)
- [2] Jones Douglas, L., Lockwood Michael. E., Lansing. R. Charissa, Feng and Albert. S., “Improved BTE hearing-aid directivity using a directional microphone array”, *J. Acous. Soc. Am.* 115 (5), 2598-2598, (2001).
- [3] Ducourneau J., Planeau V., Nejade, A. “Design of a multipolar weighting for acoustic antennae”. *Applied Acoustics*, 70, 484-492, (2009).
- [4] Brandstein, M., Ward, D., “Microphone arrays, Signal Processing Techniques and Applications”, *Springer-Verlag Publishers*, Berlin, (2001).
- [5] Flanagan, J.L., Berkeley, D.A., Elko, G.W., West, J.E., Sondhi, M.M, “Autodirective microphone systems”, *Acustica – acta acustica*, 73, 58-71, (1991).
- [6] Khalil, F., Jullien J.P., Gilloire,A. “Microphone array for sound pickup in teleconference systems” *J. Audio Eng. Soc.*, 42 (9), 691-700, (1994)
- [7] Schelkunoff, A. “A Mathematical Theory of Linear Arrays”, *Bell System Technical Journal*, 22, 80-107, (1943)
- [8] Brandstein, M., and Ward, D., “Microphone arrays, Signal Processing Techniques and Applications”, *Springer-Verlag Publishers*, Berlin, (2001).