



## **Caractérisation expérimentale du microphone SoundField ST250 pour la mesure de la diffusivité du champ sonore**

J.P. Espitia Hurtado, H. Dujourdy et J.-D. Polack  
LAM - D'Alembert, 11, rue de Lourmel, 75015 Paris, France  
espitia@lam.jussieu.fr

Les microphones B-Format (ordre 1 Ambisonics), dont le SoundField ST250, apparus il y a plus de 25 ans, ont été largement utilisés pour l'enregistrement du champ sonore 3D. Ces microphones délivrent un signal omnidirectionnel et trois signaux bidirectionnels (B-Format), qui correspondent aux signaux de pression et de vitesse particulaire, et qui peuvent être utilisés pour calculer la diffusivité (« diffuseness ») d'un champ sonore à partir du rapport entre la magnitude de l'espérance de l'intensité acoustique active et l'espérance de la densité d'énergie acoustique. Néanmoins, la précision de cette mesure pour toute la plage de fréquence dépend de la stabilité de la directivité dans les trois axes. Dans un premier temps, nous vérifions expérimentalement que le microphone ST250 délivre bien des signaux de pression et vitesse particulaire dans le cas d'une onde plane. Nous retrouvons les limites fréquentielles de la bande utile du microphone donnée dans la littérature. Puis, dans ce domaine, nous mesurons la diffusivité pour une onde plane et pour une onde sphérique approximée par 12 haut-parleurs placés sur une sphère dans une chambre très assourdie.

## 1 Introduction

Le groupe d'acoustique des salles de l'Institut d'Alembert a effectué plusieurs campagnes de mesures de réponses impulsionnelles dans une quinzaine de salles de concerts et théâtres parisiens sélectionnés pour leur intérêt acoustique, architectural et historique [FPD10]. Ces mesures ont été menées selon la norme ISO 3382-1 :2009 grâce au matériel constitué d'une source omnidirectionnelle Outline GRS et d'un caisson de basse Tannoy Power VS10. La réponse était mesurée avec un microphone SoundField ST250. Ces mesures ont fait l'objet de tests d'écoute dans la salle sèche du laboratoire en utilisant un décodeur Ambisonics B-Format du 1<sup>er</sup> ordre. De même, à partir de ces mesures, une méthode pour estimer la diffusivité et améliorer l'incidence du son direct et des premières réflexions a été développée pour l'auralisation [EHPW13].

Le microphone type SoundField a été développé au cours des années 70 à partir des recherches de Gerzon [Ger75]. Ce microphone permet le codage au premier ordre d'Ambisonics nommé B-Format.

La prise de son en B-Format est faite en utilisant quatre capsules cardioïdes placées de façon quasi-coïncidente au centre d'un tétraèdre régulier (on peut l'observer sur le microphone de droite de la figure 1). Les signaux LF (left-front), LB (left-back), RF (right-front) et RB (right-back), correspondant aux sorties de chaque capsule sont nommés A-Format. Chaque canal Ambisonics B-Format est construit à partir de la combinaison linéaire de ces signaux. Une compensation d'amplitude et de phase est appliquée aux canaux Ambisonics afin de corriger les effets introduits par la non-coïncidence entre capsules.



FIGURE 1 – Montage en tétraèdre des quatre capsules des microphones SoundField ST250 (à gauche) et DPA-4 (à droite)

Après un bref rappel de la théorie Ambisonics, nous vérifions expérimentalement la directivité des signaux B-Format Ambisonics pour un microphone ST250 en condition de champ libre et lointain dans la salle anéchoïque du Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) à Trappes. Dans une dernière partie, nous mesurons la diffusivité dans le cas d'une onde plane et d'une onde

sphérique approximée par 12 haut-parleurs placés sur une sphère dans une chambre très assourdie.

## 2 Technologie Ambisonics

### 2.1 B-Format

La technologie Ambisonics est basée sur la solution de l'équation d'onde en coordonnées sphériques. En tout point de l'espace, la pression acoustique  $p$  peut être exprimée par une décomposition de Fourier-Bessel [Dan01], où les fonctions de directivité  $Y_{mn}^\sigma$  appelées harmoniques sphériques apparaissent. Ces fonctions sont associées avec les coefficients de pondération  $B_{mn}^\sigma$ .

$$p(kr, \theta, \delta) = \sum_{gf}^{\text{inf}} i^m j_m(kr) \sum_{n=\sigma}^m \sum_{\sigma=\pm} B_{mn}^\sigma Y_{mn}^\sigma(\theta, \delta)$$

où  $k$  est le nombre d'onde,  $r$  est le rayon d'observation,  $\theta$  et  $\delta$  sont respectivement l'azimut et le site. La décomposition de Fourier-Bessel doit être tronquée à un ordre fini  $M$  par suite de limitations pratiques. Le champ sonore est décrit par un nombre fini de coefficients  $B_{mn}^\sigma$  ( $m = 0, 1, \dots, M$ ) aussi appelés composantes Ambisonics. Dans le cas particulier d'une onde plane d'amplitude  $S$  provenant de la direction  $(\theta_s, \delta_s)$ , ces composantes sont définies par [Dan01] :

$$B_{mn}^\sigma = Y_{mn}^\sigma(\theta_s, \delta_s) S$$

L'équation décrit le processus d'encodage pour une source sonore simple. Ainsi, le champ sonore est décomposé en harmoniques sphériques  $Y_{mn}^\sigma$  évaluées dans la direction de la source et multipliées par l'amplitude de l'onde  $S$ . Le nombre de composantes  $K$  pour un système Ambisonic 3D est calculé à partir de l'ordre  $M$  :

$$K = (M + 1)^2$$

Pour  $M = 1$  il y a donc 4 composantes Ambisonics. M. Gerzon a développé un système d'encodage pour le premier ordre, appelé B-format [Ger75]. En B-format, le champ sonore est encodé par les premières quatre composantes Ambisonics (appelées W, X, Y et Z). Le canal W est omnidirectionnel et les composantes X, Y et Z sont bidirectionnelles (sur les trois dimensions de l'espace).

En B-format, la pression acoustique peut être dérivée du canal W et la vitesse particulaire des canaux X, Y et Z [MP05]. La densité d'énergie instantanée  $E$  et l'intensité  $I$  d'un champ acoustique peuvent alors être exprimées en fonction du vecteur vitesse  $v$  et de la pression acoustique  $p$  par [MI86]

$$E(t) = \frac{1}{2} \rho [v^2(t) + Z^{-2} p^2(t)]$$

$$I(t) = p(t)v(t)$$

où  $Z = \rho c$  est l'impédance du milieu,  $\rho$  est la masse volumique et  $c$  est la célérité des ondes. Le vecteur d'intensité instantanée  $I$  peut être exprimé en amplitude et direction par :

$$|I| = \frac{\sqrt{(WX)^2 + (WY)^2 + (WZ)^2}}{\rho c}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right), \quad \delta = \tan^{-1}\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right)$$

Où  $\theta$  et  $\delta$  représentent l'azimut et le site respectivement. De même, la densité d'énergie instantanée  $E$  peut être exprimée par :

$$E = \frac{W^2 + X^2 + Y^2 + Z^2}{2\rho c^2}$$

## 2.2 Diffusivité

La diffusivité  $\Psi$  d'un champ sonore est calculée à partir du rapport entre la magnitude de l'espérance du vecteur de l'intensité acoustique active et l'espérance de la densité d'énergie acoustique :

$$\Psi = 1 - \frac{\|\mathcal{E}[I]\|}{c\mathcal{E}[E]}$$

où  $\mathcal{E}[\ ]$  représente l'espérance. Lorsque  $\Psi$  tend vers 0, le flux d'énergie est unidirectionnel. Au contraire quand la diffusivité s'approche de 1, cela indique que le champ sonore est diffus. On notera que pour le SoundField ST250, les signaux des microphones correspondants aux canaux X, Y et Z sont augmentés de 3 dB par rapport à celui du canal W.

## 3 Directivité du SoundField ST250

Des mesures ont eu lieu dans la chambre anéchoïque du LNE. La salle a pour dimensions utiles 9x8x7 mètres avec un volume total de 500 m<sup>3</sup> et une fréquence de coupure de 70 Hz. Le microphone était disposé sur un mât rotatif. La source sonore utilisée est une source omnidirectionnelle Outline GRS et son pré-amplificateur avec un caisson de basse Tannoy VS10. Le système de mesure est constitué d'un ordinateur muni de la carte son Motu.

La technique d'obtention des réponses impulsionnelles est celle de l'émission d'un sinus glissant exponentiel et la déconvolution du signal enregistré par l'inverse du signal émis, car cette technique est reconnue comme la plus efficace en ce qui concerne l'élimination des distorsions harmoniques de la source sonore. Le sinus glissant est un signal de 1 seconde balayant le spectre de 22 à 22000 Hz avec une fréquence d'échantillonnage de 44100 Hz. Chaque réponse impulsionnelle a été mesurée une fois avec une résolution angulaire de 5 degrés dans trois orientations différentes, pour obtenir les diagrammes de directivités selon les trois directions de l'espace. La réponse en fréquence du microphone mesuré est indiquée sur la figure 2.

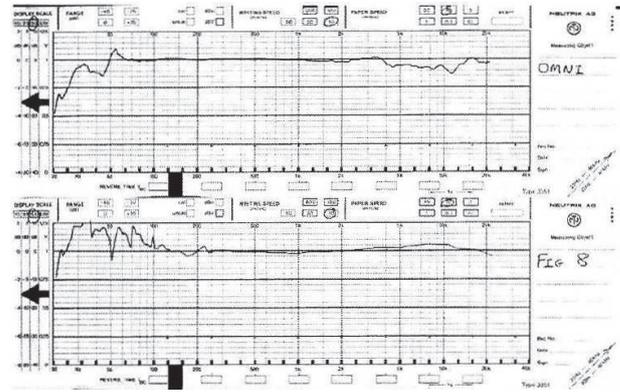


FIGURE 2 – Réponse fréquentielle du microphone SoundField ST250.

Les 72 séquences obtenues pour chaque position sont ensuite traitées à l'aide du logiciel Matlab. Les figures 3, 4 et 5 superposent à celui du canal de pression les diagrammes de directivité du microphone ST250 correspondants aux axes X, Y et Z respectivement. Toutes ces figures sont normalisées par la valeur maximale de la pression, au facteur  $\sqrt{2}$  près indiqué à la section 2.2. Comparés à [Far01], les diagrammes ont une allure similaire, mais difficilement comparable parce que les tracés sont linéaires.

La réjection est due à la résolution angulaire de la mesure. Lorsque l'angle correspond, elle atteint au moins 30 dB (figure 4, à 0.5 et 2 kHz). Une vérification systématique en optimisant manuellement l'orientation du microphone a confirmé une annulation de -30 dB pour les fréquences moyennes. Par contre, la réjection est moins bonne, en hautes fréquences à cause de la taille des capsules et aux déphasages réduits aux basses fréquences. La différence observée entre avant et arrière nécessite plus de recherche. Elle peut être due au matricier générique, et à des différences de sensibilités entre capsules.

## 4 Mesures de la diffusivité

### 4.1 Cas de l'onde plane

La mesure a été faite dans la salle anéchoïque du LNE en installant une enceinte directionnelle Tannoy System 600 à une distance de 5m du microphone SoundField. Pour simuler l'onde plane, le même sinus glissant que dans la section 3 a été utilisé. L'analyse a été faite sur la partie de la réponse impulsionnelle correspondant au son direct. La figure 6 montre la diffusivité estimée pour trois tailles de fenêtres de moyennage par bande d'octave.

### 4.2 Cas de l'onde sphérique

Un champ diffus quasi-sphérique a été simulé dans la chambre sourde de l'Institut, une construction flottante de petites dimensions (2,77x3,24x3,62 m). Il a été créé par 12 enceintes Studer A1 disposées autour du centre de la chambre (6 à mi-hauteur sur un hexagone, 3 à hauteur du plafond sur un triangle équilatéral et 3 au sol sur un autre triangle équilatéral alterné). Douze bruits gaussiens décorrélés de 2 secondes ont été générés et émis par chaque haut-parleur. Le microphone SoundField a été installé au centre de la salle.

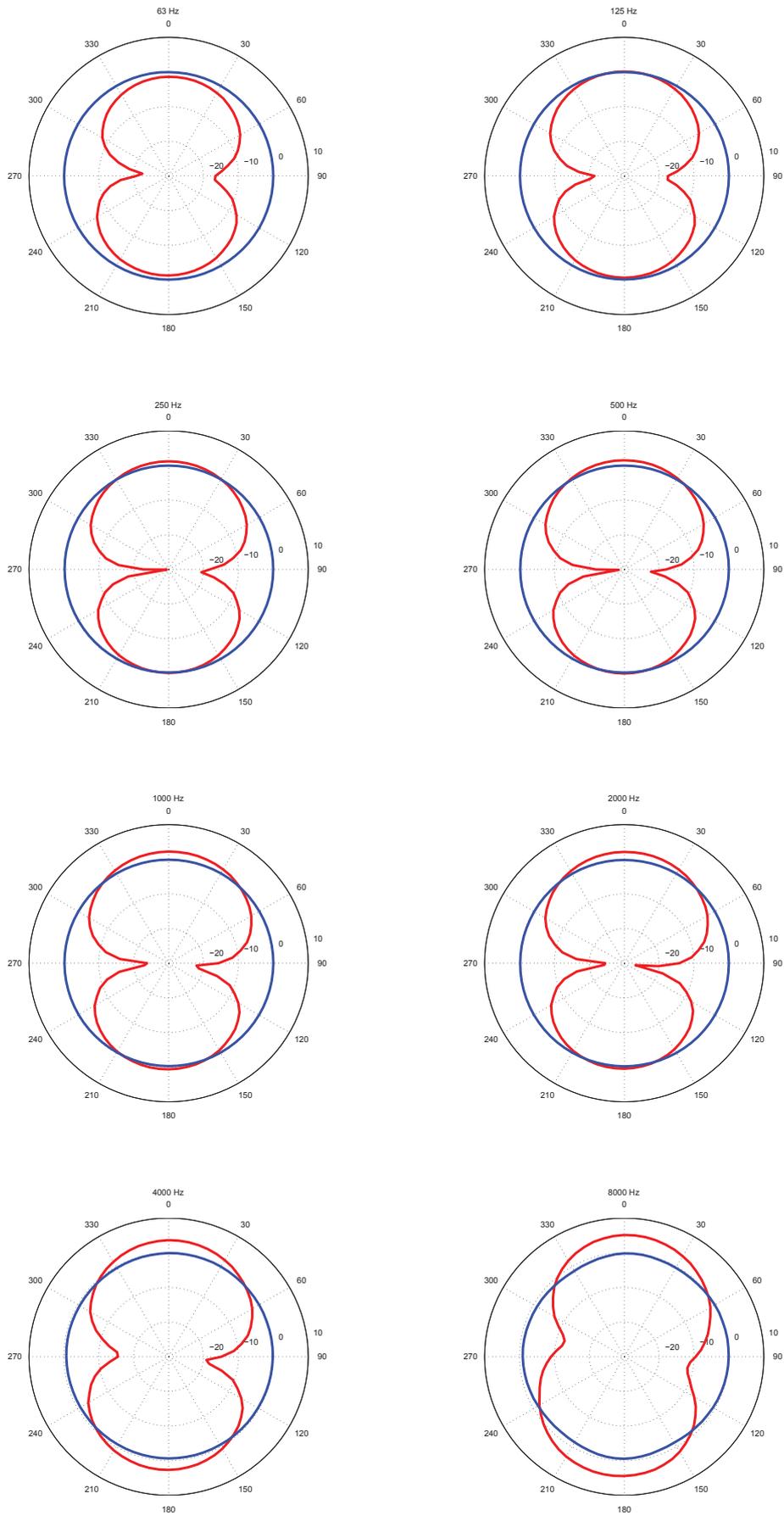


FIGURE 3 – Directivité du SounField ST250 sur l’axe X dans le plan XY. Pression en bleu, vitesse particulière en rouge

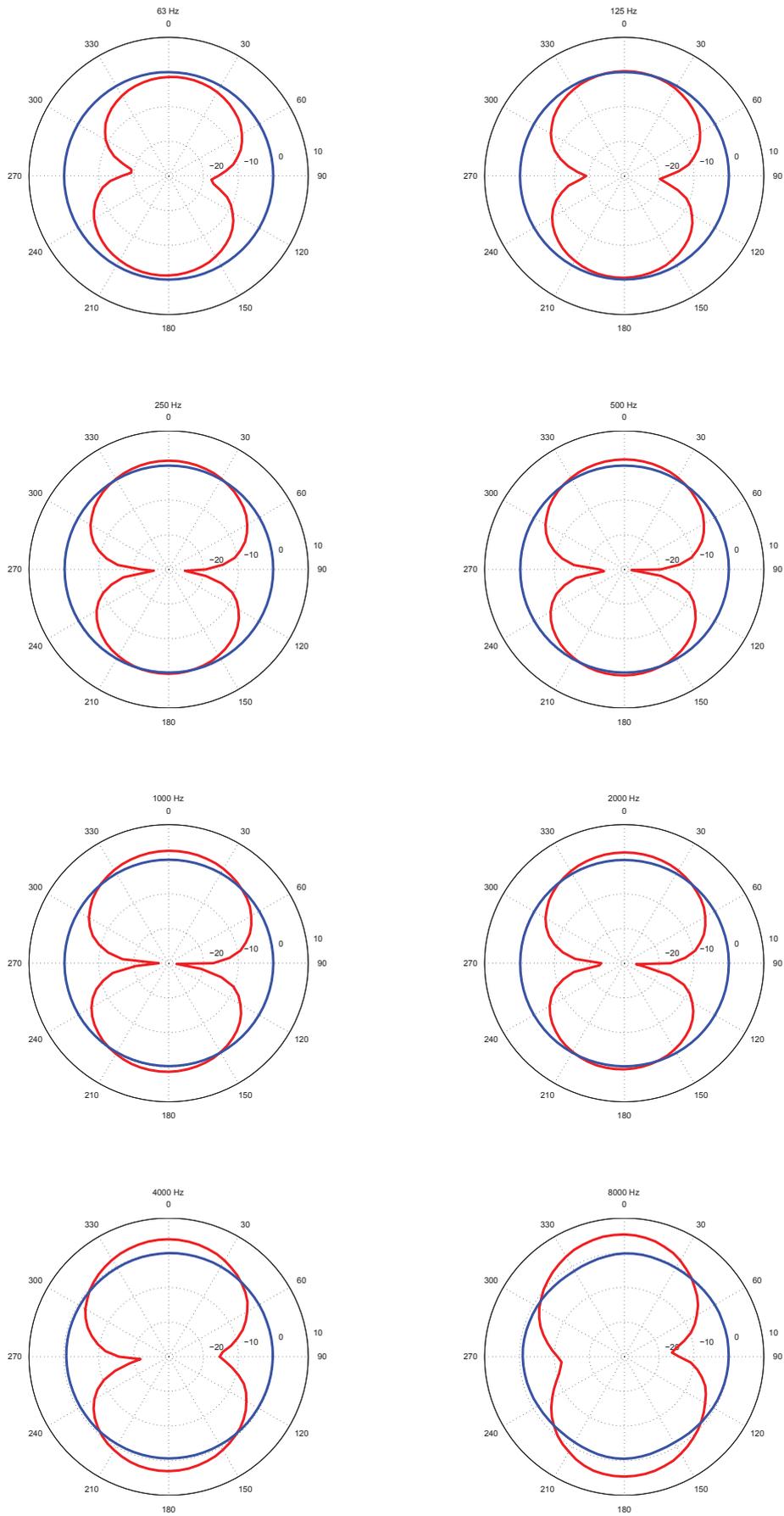


FIGURE 4 – Directivité du SounField ST250 sur l’axe Y dans le plan XY. Pression en bleu, vitesse particulière en rouge

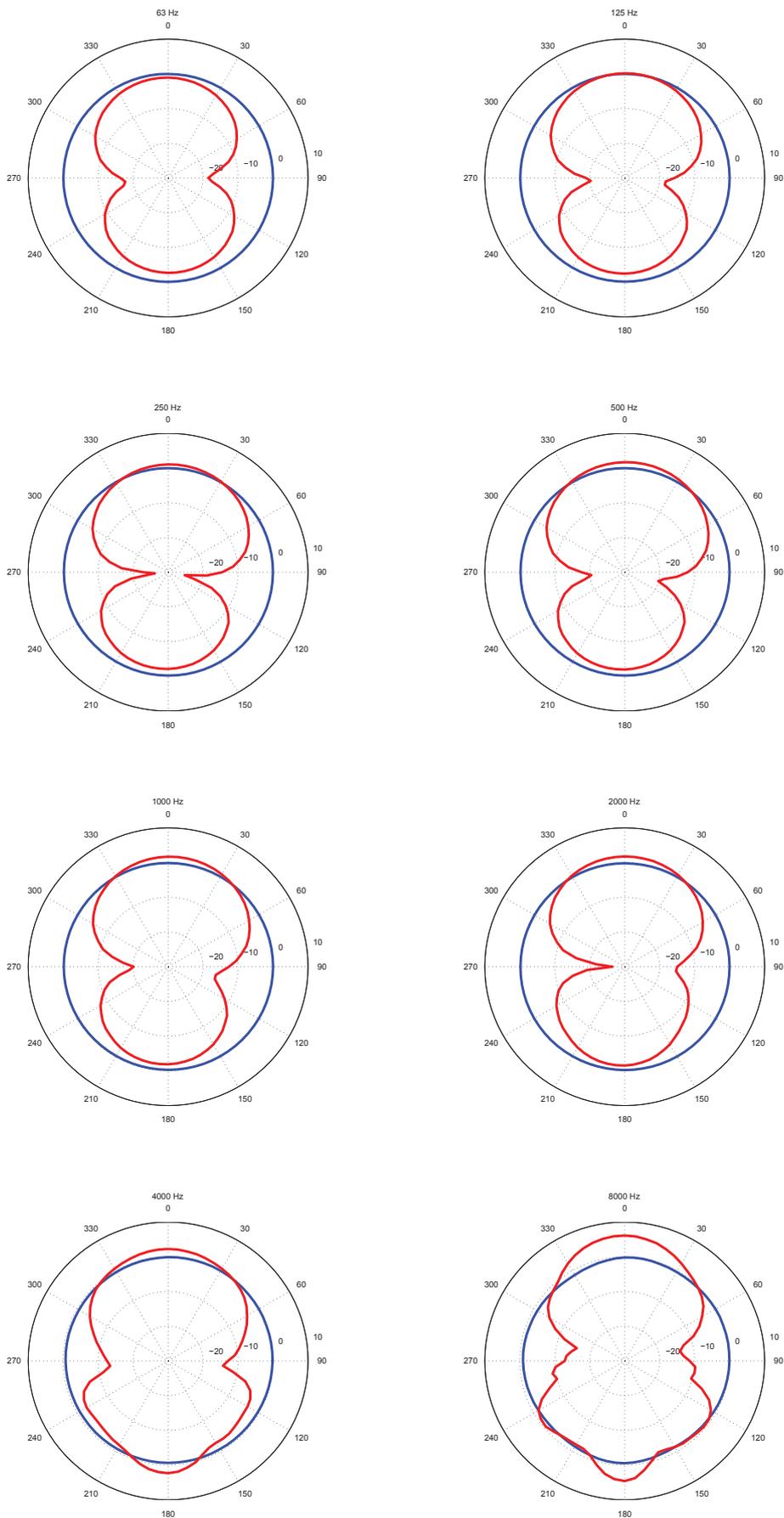


FIGURE 5 – Directivité du SounField ST250 sur l'axe Z dans le plan XZ. Pression en bleu, vitesse particulière en rouge

La figure 7 montre la diffusivité moyenne estimée pour trois tailles de fenêtres de moyennage par bande d'octave.

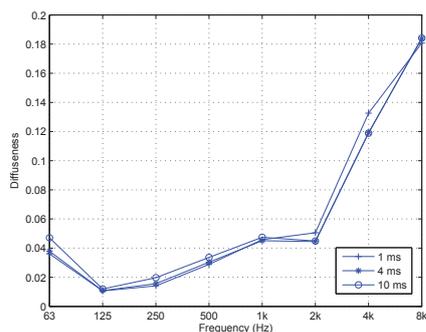


FIGURE 6 – Diffusivité estimée : cas de l'onde plane avec une taille de fenêtre d'analyse de 1, 4 et 10 ms

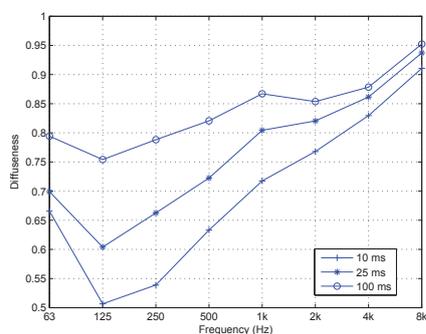


FIGURE 7 – Diffusivité estimée : cas de l'onde sphérique avec une taille de fenêtre d'analyse de 10, 25 et 100 ms

### 4.3 Discussion

Dans le cas d'une onde plane, on observe qu'entre 63 Hz et 2 kHz, l'estimation de la diffusivité est inférieure à 0,05. A partir de 2 kHz l'estimation augmente jusqu'à 0,18 pour 8 kHz. Cela nous permet de confirmer nos hypothèses sur la diffusivité, bien qu'elle soit sur-estimée pour les fréquences basses et hautes. En dessous de 70 Hz, nous entrons dans la zone où l'hypothèse de champ libre de la salle anéchoïque du LNE n'est plus respectée, et où la réponse du microphone n'est plus satisfaisante. Aux hautes fréquences, cela peut s'expliquer par la directivité du microphone aux bandes de fréquences concernées, notamment pour la composante Z.

Dans le cas d'une faible diffusivité (cas de l'onde plane), on observe qu'il n'y a pas de différence majeure entre les résultats en fonction des tailles des fenêtres d'analyses. Cela n'est pas le cas en haute diffusivité (cas de l'onde sphérique) où plus la fenêtre est grande et moins l'estimation est sous-évaluée. On observe aussi qu'il est nécessaire d'utiliser une taille de fenêtre plus grande pour que l'estimation soit plus précise dans les basses fréquences.

Pour le champs diffus, à chaque instant on peut considérer que le son ne vient que d'une seule direction. Donc plus la fenêtre temporelle est longue plus le nombre de directions prises en compte augmente. Il est donc logique d'observer une diffusivité qui augmente avec la fenêtre. Cela est cohérent avec les résultats de [DGTT<sup>+</sup>12].

## 5 Conclusion

Notre étude vient confirmer et compléter les mesures de directivité du microphone SoundField trouvées dans la littérature. Elles soulignent la nécessité d'aligner le point d'annulation avec la direction de référence pour bien le prendre en compte et vérifier qu'elle est la même pour toutes les fréquences. Elles montrent que la plage utile de mesure s'étend de 125Hz à 2kHz.

Les mesures de diffusivité viennent compléter l'étude de la directivité, et confirment la plage utile de 125 Hz à 2 kHz en ce qui concerne, en particulier pour une onde plane. Le cas du champ diffus nécessite des mesures complémentaires.

## Références

- [Dan01] Jérôme Daniel. *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia*. PhD thesis, Pierre et Marie Curie, 2001.
- [DGTT<sup>+</sup>12] Giovanni Del Galdo, Maja Taseska, Oliver Thiergart, Jukka Ahonen, and Ville Pulkki. The diffuse sound field in energetic analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131 :2141, 2012.
- [EHPW13] Juan Pablo Espitia Hurtado, Jean-Dominique Polack, and Olivier Warusfel. Improving sound incidence reproduction from b-format impulse responses for auralization of concert halls. In *Proceedings of 44th Spanish Congress on Acoustics*, Valladolid, September 2013.
- [Far01] Angelo Farina. Anechoic measurement of the polar plots of a soundfield ST-250 b-format microphone. Technical report, Technical Report, Department of Environmental Technical Physics, University of Parma, 2001.
- [FPD10] Fabio Figueiredo, Jean-Dominique Polack, and Hugo Djourdy. Salles à l'acoustique variable : étude des cas à paris. In Société Française d'Acoustique- SFA, editor, *10ème Congrès Français d'Acoustique*, pages –, Lyon, France, 2010.
- [Ger75] Michael A. Gerzon. Ambisonics. part two : Studio techniques. *Studio Sound*, 17(8), October 1975.
- [MI86] Philip McCord Morse and K. Uno Ingard. *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, 1986.
- [MP05] Juha Merimaa and Ville Pulkki. Spatial impulse response rendering i : Analysis and synthesis. *Journal of the Audio Engineering Society*, 53(12) :1115–1127, 2005.