

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Traitement d'antenne appliqué aux mesures en soufflerie: Prise en compte des effets de l'écoulement sur la propagation au moyen d'un modèle numérique

Thomas Padois, Christian Prax et Vincent Valeau

Institut Pprime, Université de Poitiers, Ensma, CNRS, Poitiers , thomas.padois@lea.univ-poitiers.fr

Avril 2010

Une méthode de localisation classique et robuste de sources sonores est le traitement d'antenne microphonique associé à la formation de voies (beamforming). L'application de cette technique à des mesures en soufflerie permet ainsi de localiser des sources de bruits dans un écoulement, mais les effets de l'écoulement sur la propagation doivent être pris en compte pour une localisation optimale. Dans cette étude, nous utilisons dans un premier temps un modèle analytique géométrique développé par Amiet [1] permettant de corriger la position de la source estimée par l'antenne. Cette correction est validée expérimentalement par des estimations de la position d'une source monopolaire placée dans un écoulement au sein d'une soufflerie anéchoïque, à diverses fréquences. Dans un deuxième temps, afin de pouvoir explorer la validité des corrections utilisées pour d'importants nombres de Mach, nous utilisons un code de propagation acoustique basé sur la résolution des équations d'Euler linéarisées (EEL). Ce code numérique nous permet de simuler la propagation acoustique d'un monopole rayonnant dans un écoulement uniforme séparé de l'air au repos par une couche de cisaillement, puis d'obtenir la pression acoustique sur une antenne microphonique. Cette étude montre que le modèle géométrique reste valide sur une plage importante de nombres de Mach, et que les effets de l'écoulement sur la propagation sont indépendants de la longueur d'onde acoustique.

1 Introduction

Dans le domaine des transports, les trente dernières années ont vu une réduction importante du niveau de bruit des moteurs. Ainsi, l'attention s'est recentrée sur les sources de bruit aérodynamique, et la localisation de sources aéroacoustiques est devenue un enjeu considérable. Une méthode de localisation classique et robuste est le traitement d'antenne microphonique associé à la formation de voies (Beamforming, noté *BF* dans la suite de ce document).

Une antenne acoustique est un réseau de microphones répartis de manière uniforme ou aléatoire. Elle peut être en une, deux ou trois dimensions. Les avantages du BF sont sa simplicité de mise en œuvre et sa robustesse. En revanche sa résolution en basse fréquence est mauvaise. L'idée du BF est la suivante : une source *S* émet une onde acoustique arrivant avec un certain retard de propagation sur les différents microphones. Le BF consiste à compenser les retards entre chaque signal pour une direction d'intérêt, et à les sommer de telle manière que la sommation multiplie l'amplitude du signal d'un facteur bien plus important que le facteur d'amplification du bruit.

Dans le cas de sources aéroacoustiques, l'onde acoustique traverse un écoulement qui peut être décomposé en deux parties. D'une part, l'onde acoustique est convectée dans la zone où l'écoulement est uniforme, puis réfractée dans la couche de mélange. Ces deux phénomènes mo-

difient le temps de propagation entre la source et les microphones et par conséquent altèrent l'estimation de la position de la source par le BF. Un modèle décrivant le temps de propagation entre l'onde et l'antenne en fonction des caractéristiques de l'écoulement est alors nécessaire. Amiet [1] propose un système à trois équations reliant le trajet de l'onde acoustique sans et avec écoulement. La résolution de ce système par un processus itératif donne accès à un temps de propagation modifié qui a été implémenté dans le BF par Humphreys et al. [5]. Cependant cette correction n'a été appliquée que dans le cadre d'une application ponctuelle. Le but de cette étude est de valider cette technique expérimentalement et numériquement et d'évaluer ces capacités en fonction des caractéristiques de l'écoulement, en terme de nombre de Mach et d'épaisseur de la couche de mélange.

Le traitement BF ainsi que la correction des effets de l'écoulement sont présentés dans la première partie (section 2). Puis cette technique est testée dans une soufflerie anéchoïque (section 3). La source acoustique est un haut-parleur encastré dans une planche reliant le convergent au collecteur. L'écoulement sépare le haut-parleur de l'antenne microphonique qui est situé dans le milieu au repos. Des mesures acoustiques sont effectuées pour trois positions de l'antenne, avec et sans écoulement. Le signal source est un son pur, quatre fréquences sont étudiées. Puis, cette expérience est simulée grâce aux équations d'Euler linéarisées afin de

s'affranchir des limitations physiques imposées par le dispositif expérimental (section 4), afin d'augmenter le nombre de Mach.

2 Traitement d'antenne appliqué à une source en écoulement

2.1 Principe du Beamforming

Le principe du BF associé à une antenne de microphone est le suivant. Considérons une source acoustique ponctuelle et monochromatique en champ libre. Le champ rayonné par cette source est monopolaire. La pression acoustique, notée $p(r, t)$, en un point de l'espace situé à une distance r de la source, s'écrit

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (1)$$

où A est l'amplitude de l'onde acoustique, ω la pulsation et k le nombre d'onde. Considérons maintenant une antenne constituée de N microphones répartis uniformément sur une ligne. L'onde acoustique (sphérique) est captée par les différents microphones avec un certain retard dû au temps de propagation. La pression acoustique mesurée par le $n^{\text{ième}}$ microphone est donnée par

$$p_n(r, t) = \frac{A}{r_n} e^{j\omega(t - \frac{r_n}{c_0})}, \quad (2)$$

r_n étant la distance entre la source et le $n^{\text{ième}}$ microphone et c_0 la célérité de l'onde acoustique. Ainsi, chaque microphone mesure l'onde acoustique avec un retard ($\frac{r_n}{c_0}$) dépendant de la distance source-microphone et de la célérité du milieu. Le but de la formation de voies consiste à compenser ce retard de propagation, puis sommer tous les signaux microphoniques afin d'obtenir un seul signal en sortie d'antenne. Ainsi l'antenne est orientée suivant différents points de focalisation, notés F , afin de localiser la source. Quand l'énergie du signal de sortie de l'antenne est maximale, la position de la source est localisée.

Le signal de sortie de l'antenne peut ainsi s'écrire comme la somme des signaux microphoniques multipliés par une fonction compensant les retards. Dans le domaine de Fourier, le signal de sortie de l'antenne, noté $Y(f, F)$, s'écrit

$$Y(f, F) = \sum_{n=1}^N P_n(f) e^{j\omega(\frac{r_n}{c_0})}, \quad (3)$$

$P_n(f)$ étant la transformée de Fourier de $p_n(r, t)$. Ainsi, l'antenne joue le rôle d'un filtre spatial adapté qui déphase (dans le domaine de Fourier) les signaux microphoniques en fonction du point de focalisation. Quand le point source et le point de focalisation coïncident, le signal de sortie de l'antenne est maximale et la position retrouvée.

2.2 Le Beamforming en écoulement : correction des effets de convection et réfraction

En aéroacoustique, les sources sont situées dans des écoulements, et les microphones sont généralement

placés en dehors de l'écoulement. Le trajet de l'onde acoustique subit donc une déviation due à l'écoulement. Or nous venons de montrer que le principe du BF reposait sur la différence de chemin de propagation entre la source initiale et le point de focalisation. Par conséquent, il est nécessaire de connaître les effets de l'écoulement sur le trajet des ondes acoustiques.

Les développements suivants résument succinctement le modèle géométrique bi-dimensionnel proposé par Amiet [1]. Considérons une source placée au centre d'un écoulement uniforme de nombre de Mach noté M (Figure 1). Nous faisons l'hypothèse que l'écoulement uniforme et l'air au repos (au sein duquel est placé un récepteur microphonique) sont séparés par une couche de mélange infiniment mince. Sans écoulement, la source émet une onde acoustique formant un angle θ' avec l'axe du jet. En présence d'écoulement, l'onde acoustique est convectée dans la zone d'écoulement moyen (angle θ_c) et réfractée par la couche de mélange (angle θ_0). Ainsi, un nouveau chemin de l'onde acoustique peut être défini, composé du chemin r_1 (de la source à la couche de mélange) et r_2 (de la couche de mélange au microphone). La distance et l'angle entre la source et le microphone sont notés respectivement R_m et θ_m .

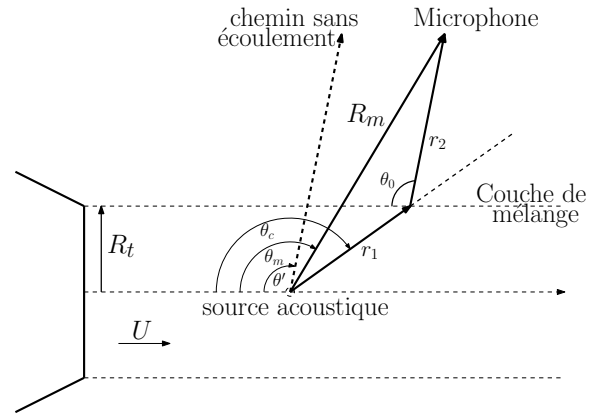


FIG. 1 – Schéma de la propagation d'une onde acoustique en écoulement cisaillé. Les angles présentés sont utilisés pour la correction de l'écoulement.

D'après la géométrie du problème, les angles décrivant le chemin acoustique à travers l'écoulement sont liés par la relation

$$R_m \cos \theta_m = R_t \cot \theta_c + (R_m \sin \theta_m - R_t) \cot \theta_0, \quad (4)$$

R_t étant la hauteur de l'écoulement moyen. De plus, l'angle convecté et l'angle d'émission sont reliés grâce à la relation

$$\tan \theta_c = \frac{\sin \theta'}{\cos \theta' - M}. \quad (5)$$

Enfin, la dernière relation est obtenue en appliquant la loi de Snell-Descartes entre l'angle d'émission et l'angle réfracté et s'écrit

$$M = \frac{1}{\cos \theta'} - \frac{c_0/c_t}{\cos \theta_0}, \quad (6)$$

c_t étant la célérité du son dans l'écoulement.

Les équations 4 à 6 sont résolues par un processus itératif afin de déterminer les angles convectés et réfractés. La connaissance de ces deux angles donne accès aux deux rayons r_1 et r_2 . Sans la prise en compte de ce nouveau chemin acoustique dans le processus de BF, la localisation de la source est erronée. En effet, pour une source située dans un écoulement, le BF localise la source en aval de sa position réelle en raison des effets de transport dus à l'écoulement. Ainsi, la correction apportée au BF pour une source en écoulement revient à considérer un nouveau temps de parcours, noté t_{SL} , dépendant des nouveaux chemins acoustiques r_1 et r_2

$$t_{sl} = \frac{r_1}{c_t} + \frac{r_2}{c} \quad (7)$$

Ce temps de parcours t_{sl} remplace le temps de parcours $\frac{r_n}{c_0}$ utilisé pour le modèle classique décrit dans la section précédente.

3 Localisation de source acoustique en écoulement : mesures expérimentales

3.1 Description du dispositif expérimental et caractérisation de l'écoulement

Des mesures expérimentales ont été réalisées afin de valider le traitement d'antenne associé à une correction des effets de l'écoulement. Ces expériences ont été menées dans la soufflerie anechoïque de type Eiffel de l'Institut Pprime à Poitiers (Figure 2). Le convergent a une section carrée de $(0,46 \times 0,46)\text{m}^2$. La longueur de la veine d'essai est de 1,32m. La vitesse maximale de la soufflerie est de 40m/s, soit $M = 0,12$. Le convergent et le collecteur sont reliés par une planche de bois où est encastré un haut-parleur. Le haut-parleur se situe à 43cm de la sortie du convergent, et a une réponse en fréquence plate dans la gamme $[250 - 15000]\text{Hz}$. L'antenne est composée de 17 microphones de type Brüel&Kjaer modèle 4957. La distance inter-captur est de 1,7cm, ce qui correspond à une demi longueur d'onde à 10kHz et permet une étude sur la gamme fréquentielle $[1,25 - 10]\text{kHz}$. L'antenne est fixée sur un système de déplacement à trois dimensions afin d'obtenir une position précise de l'antenne par rapport au haut-parleur. L'antenne est placée en dehors de l'écoulement ($H = 1,41\text{m}$) et est parallèle à l'axe du jet. Le microphone central (le neuvième) est placé juste au-dessus du haut-parleur. L'antenne peut-être déplacée de 25cm en amont ou en aval. Des tests sans écoulement ont été réalisés pour la calibration de l'antenne. Enfin, x représente l'axe du jet et y la direction verticale.

Les signaux imposés à l'entrée du haut-parleur sont des sons purs, quatre fréquences sont étudiées $[4; 8; 10; 12]\text{kHz}$. La fréquence d'échantillonnage est huit fois supérieure à la fréquence de jeu, la durée de l'acquisition est de 30 s. Puis la moyenne des signaux est soustraite et un filtre passe-bande autour de la fréquence de jeu est appliqué. Finalement, les signaux sont passés dans le domaine de Fourier et le traitement de BF est appliqué.

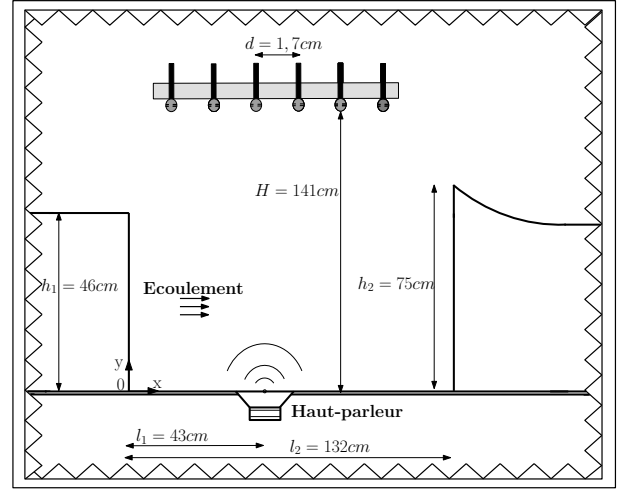


FIG. 2 – Schéma de la soufflerie anechoïque où les mesures acoustiques et velocimétriques sont réalisées.

Dans le but de caractériser l'écoulement, des mesures de fil chaud ont été menées. Après étalonnage du fil chaud, les profils de l'écoulement moyen sont mesurés pour sept positions (trois en amont, trois en aval, et une au-dessus du haut-parleur). Un profil est défini sur 0,7m avec 78 points de mesures. Le nombre de points augmente dans les zones où le gradient de vitesse est important. Ces mesures sont comparées avec un profil analytique de couche de mélange proposé par Candel [3]

$$U(x, y) = \frac{U_0}{2} \left(1 - \tanh \left(\frac{2(y - y_c)}{\delta} \right) \right), \quad (8)$$

où δ est l'épaisseur de la couche de mélange, y_c le point d'inflexion du profil et U_0 la vitesse maximale dans l'écoulement. La Figure 3 présente la comparaison du profil analytique (trait plein) et les mesures expérimentales. Le résultat montre un bon accord dans l'ensemble. L'écoulement moyen peut-être décomposé en trois parties : une couche limite (dont les effets ne sont pas pris en compte dans cette étude) se développe sur la plaque et atteint quelques centimètres près du collecteur ; puis, une large zone (40cm) où l'écoulement est uniforme ; enfin, la couche de mélange sépare l'air au repos de l'écoulement sur une dizaine de centimètres. Ce modèle de profil est utilisé dans la simulation numérique basée sur les équation d'Euler linéarisées.

3.2 Résultats du traitement d'antenne pour la localisation de source acoustique en écoulement

Les résultats du traitement d'antenne associé à un traitement de BF avec et sans correction sont présentés dans cette section. Les signaux acoustiques acquis par l'antenne microphonique (décrite dans la section 3) sont passés dans le domaine de Fourier et le traitement d'antenne est appliqué. Le résultat obtenu est appelé "figure de directivité", et représente l'amplitude du signal de sortie de l'antenne (normalisée par la valeur maximale) en fonction de la position du point de focalisation. La Figure 4 présente une figure de directivité sans

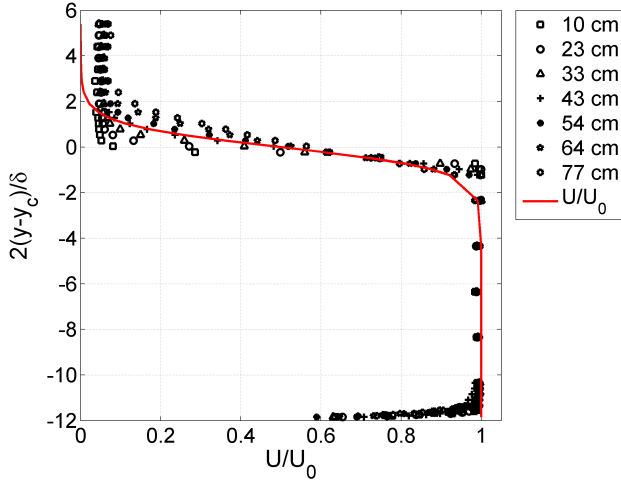


FIG. 3 – Comparaison entre un modèle analytique d'écoulement moyen (trait plein) et des mesures expérimentales. 43cm est la position du centre du haut-parleur, 10, 23 et 33 cm sont des positions en amont, et 54, 64 et 77 cm sont des positions en aval.

et avec écoulement ($M=0,12$) pour une source, située en $x = 0$, émettant un son pur à 10 kHz. La figure de directivité est composée d'un lobe principal et de lobes secondaires. Le lobe principal indique la position de la source. Dans le cas sans écoulement la figure de directivité indique que la position de la source est en $x = 0$. Dans ce cas le traitement d'antenne permet de localiser la source. En revanche dans le cas avec écoulement, la figure de directivité présente un lobe principal à $x = 5,7$ cm situé vers l'aval, indiquant un décalage erroné de la source. La présence d'écoulement entre la source et l'antenne fausse donc la localisation car l'onde acoustique traversant l'écoulement est convectée. Par conséquent, une correction est nécessaire pour localiser une source acoustique en présence d'écoulement.

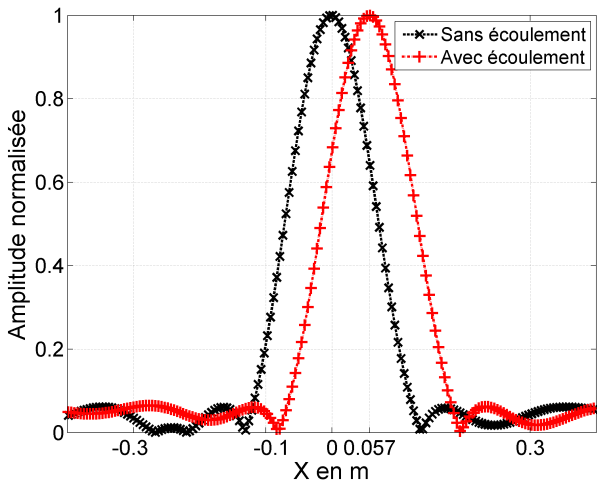


FIG. 4 – Figure de directivité pour une source située en $x = 0$ et émettant un son pur à 10kHz. La courbe noire ($\times$) est obtenue sans écoulement, la courbe rouge (+) avec écoulement.

La Figure 5 présente une figure de directivité pour un son pur à 10 kHz en présence d'écoulement ($x = 0$).

Un traitement BF avec et sans correction est appliqué aux signaux microphoniques. Dans le cas sans correction, nous retrouvons le résultat précédent, la source étant déviée de $x = 5,7$ cm. Avec la correction la figure de directivité est déplacée vers l'amont et le lobe principal indique la position réelle de la source. L'introduction du modèle proposé par Amiet dans la technique de BF permet donc une localisation satisfaisante de la source.

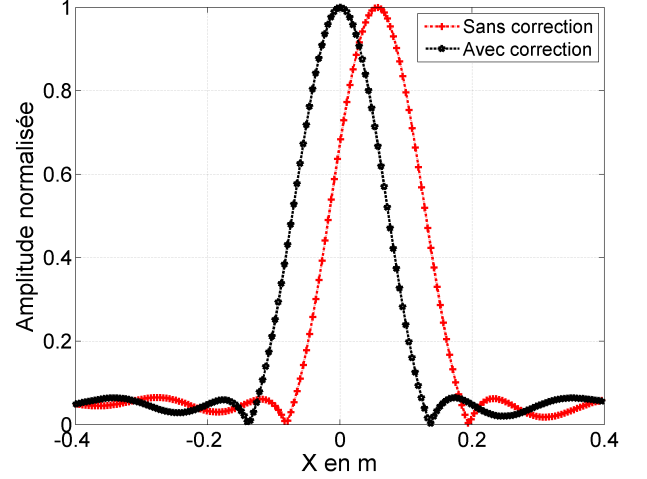


FIG. 5 – Figure de directivité pour une source située en $x = 0$ et émettant un son pur à 10kHz. La courbe noire (*) est obtenue avec une correction de la propagation acoustique. La courbe rouge (+) est obtenue sans correction.

Des mesures acoustiques avec et sans écoulement pour les fréquences [4; 8; 10; 12] kHz ont été réalisées. De plus, l'antenne a été déplacée de 25cm en amont et en aval. Le traitement BF avec et sans correction est appliqué à toutes les configurations. Les résultats sont représentés à la Figure 6. L'abscisse représente la position réelle de la source (référéncée par rapport au micro central de l'antenne, de -25 à +25 cm), et l'ordonnée les positions estimées par le traitement BF, avec et sans correction. Pour la position $x = 0$, le traitement BF sans correction indique la même déviation pour chaque fréquence. Une fois la correction appliquée, la position initiale est bien retrouvée. Pour les cas où l'antenne a été déplacée en amont ou aval, l'erreur obtenue avec le BF sans correction augmente légèrement, mais la correction permet de retrouver les bonnes positions. Ainsi les mesures expérimentales ont permis de montrer qu'un traitement d'antenne associé au BF avec une correction basée sur un modèle géométrique et prenant en compte les effets de convection et réfraction par l'écoulement, permet de localiser de manière satisfaisante une source en écoulement.

D'autre part, il faut noter que dans le cas où la source est placée en face du microphone central de l'antenne (position $x = 0$), la déviation est similaire pour les quatre fréquences considérées. Ainsi dans ce cas, la longueur d'onde n'influe pas sur le décalage apparent de la source. En revanche, lorsque la source est décalée vers l'amont ou l'aval par rapport au microphone central, les erreurs effectuées sans correction dépendent plus sensi-

blement de la fréquence, et il est plus difficile de conclure sur l'effet de ce paramètre. On peut cependant noter que la correction étant basée sur un modèle géométrique, la correction appliquée ne dépend pas de la fréquence, et les estimations de position après correction subissent donc malgré tout de légères erreurs, variables selon la fréquence.

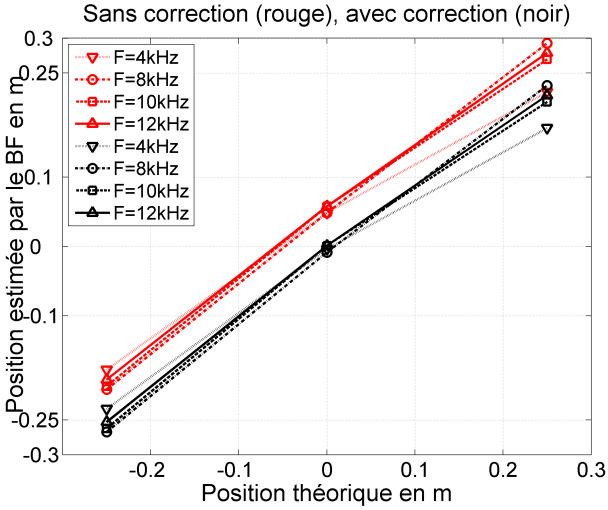


FIG. 6 – Position réelle de la source en fonction de la position estimée par le BF, avec (courbes noires) et sans correction (courbes rouges).

4 Localisation de source acoustique en écoulement : simulations numériques

Dans cette étude, les équations d'Euler linéarisées sont utilisées pour simuler la propagation d'une onde acoustique dans un écoulement cisaillé. Ce jeu d'équations offre une description satisfaisante des phénomènes de convection et de réfraction des ondes en prenant en compte les interactions linéaires entre l'écoulement moyen et les perturbations qui s'y propagent. Les EEL sont obtenues à partir des équations d'Euler (qui négligent les effets visqueux), en décomposant la masse volumique, la pression et les composantes de la vitesse, en quantités moyennes et fluctuantes. Pour plus de détail, nous invitons le lecteur à consulter l'article de Bailly et Juvé [2]. On obtient finalement un système linéaire d'équations différentielles du premier ordre qui peut se présenter sous la forme suivante

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \mathbf{S} = 0, \quad (9)$$

le vecteur $\mathbf{U}$ contenant les inconnues du système, les vecteurs $\mathbf{E}$ et $\mathbf{F}$ contenant tous les effets de réfraction et de convection sur la propagation acoustique. $\mathbf{S}$ est dit terme de forçage ou terme source.

Au cours de cette étude, la discrétisation en espace est assurée par un schéma centré du quatrième ordre (DRP de Tam et Web [4]) et l'intégration temporelle est donnée par un schéma du quatrième ordre de type Runge-Kutta. Pour simuler les conditions de la chambre

anéchoïque, c'est-à-dire le champ libre, les conditions de non réflexions de Tam et Web sont utilisées [4].

Une onde acoustique, générée par une source ponctuelle, se propageant dans un écoulement cisaillé est simulée. Le profil de l'écoulement moyen est décrit par l'équation 8. La longueur d'onde à 10kHz est prise pour longueur de référence et le maillage numérique assure huit points par longueur d'onde. Toutes les autres distances sont déduites de cette similitude. La pression acoustique est enregistrée sur 17 points du maillage espacés d'une demi longueur d'onde et positionnés en dehors de la zone d'écoulement. La première simulation se place précisément dans les conditions de l'expérience, c'est-à-dire $M = 0,12$, $F = 10\text{kHz}$ et $x = 0$. La figure de directivité obtenue avec et sans la correction d'Amiet est présentée sur la figure 7. Sans correction, la position de la source obtenue par formation de voie subit une déviation vers l'aval par rapport à la position de la source originale, dans des proportions tout à fait similaires aux observations expérimentales. Avec la correction d'Amiet, le lobe principal indique de nouveau la bonne position de la source en $x = 0$. L'outil numérique de résolution des EEL conjugué au procédé de traitement d'antenne, validé par cette confrontation expérimentale, est capable de simuler correctement la localisation d'une source acoustique placée au sein d'un écoulement. On peut à présent s'affranchir des limitations physiques liées au dispositif expérimental, et envisager une étude exploratoire pour simuler les effets de nombres de Mach plus élevés.

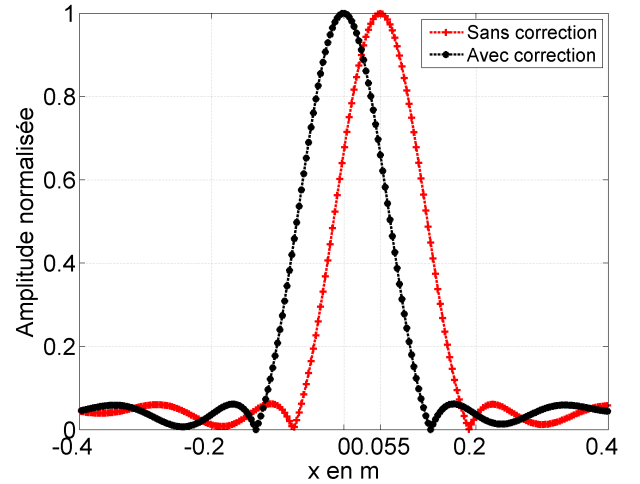


FIG. 7 – Figure de directivité pour une source située en $x = 0$ et émettant un son pur à 10kHz. La courbe noire (*) est obtenue avec une correction de la propagation acoustique. La courbe rouge (+) est obtenue sans correction. Les signaux sont simulés numériquement.

Cinq nombres de Mach sont considérés au cours de cette étude ($M = [0; 0,12; 0,3; 0,5; 0,7]$). La configuration de l'écoulement cisaillé et la position relative de la source et de l'antenne demeurent identiques dans chaque cas, seul change le nombre de Mach. Le traitement BF est appliqué avec et sans correction. Le maximum du lobe principal de chaque figure de directivité est recherché et sa position est reportée sur le graphe de la figure 8 en fonction du nombre de Mach. Pour $M = 0,12$

la déviation numérique, sans correction, est comme il a été précisé plus haut, similaire à la déviation observée expérimentalement. On observe que la déviation obtenue par expérimentation numérique croît linéairement avec le nombre de Mach. On peut voir sur cette figure que le traitement BF avec correction retrouve toujours de façon très précise la position réelle de la source. Ainsi, le traitement BF associé à la méthode de correction de la propagation acoustique en écoulement proposée par Amiet [1] est une méthode suffisamment robuste pour localiser les sources.

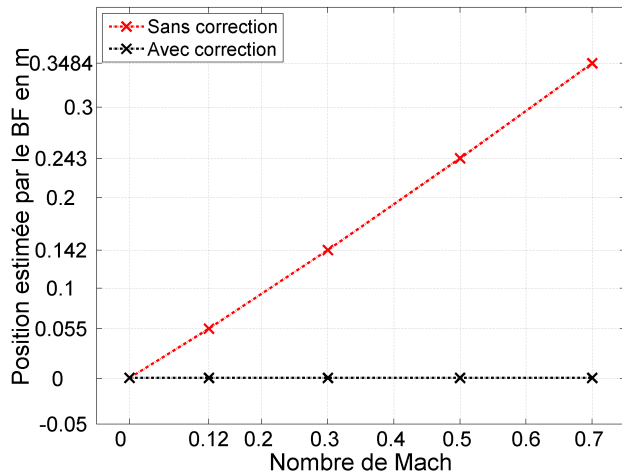


FIG. 8 – Déviation donnée par le BF en fonction du nombre de Mach (avec et sans correction).

5 Conclusions

Le but de cette étude est de vérifier la capacité d'un traitement d'antenne de type BF à localiser une source en écoulement placée dans une soufflerie à veine libre. En associant une correction de la propagation acoustique proposée par Amiet [1], la localisation de la position précise de la source est réalisable. Des expériences réalisées dans la soufflerie anechoïque EOLE de l'institut Pprime pour un nombre de Mach de 0,12 ainsi que des simulations numériques basées sur la résolution des EEL ont montré que le traitement BF en présence d'écoulement indique une position de source apparente décalée en aval par rapport à la source réelle en raison des effets de convection. La correction appliquée au traitement BF permet de corriger parfaitement ce décalage pour la configuration étudiée et pour la plage de nombre de Mach explorée. Par ailleurs, la longueur d'onde ne semble pas influencer la déviation. La simulation de la propagation acoustique en écoulement cisaillé par résolution des équations d'Euler linéarisées a permis d'explorer les effets du nombre de Mach de l'écoulement moyen qui se traduit par un décalage de la position prédite de la source augmentant linéairement avec la vitesse. La correction d'Amiet [1] s'avère tout aussi efficace et précise pour les nombre de Mach les plus élevés ($M = 0,7$) et est parfaitement adaptée et robuste pour la localisation des sources en écoulement.

Références

- [1] R.K. Amiet. Refraction of sound by a shear layer. *Journal of Sound and Vibration*, 58, 1978.
- [2] C. Bailly and D. Juvé. Numerical solution of acoustic propagation problems using linearized euler equations. *AIAA JOURNAL*, 38, 2000.
- [3] S. Candel, A. Guedel, and A. Julienne. Résultats préliminaires sur la diffusion d'une onde acoustique par écoulement turbulent. *Journal de physique*, 37, 1976.
- [4] C.K.W. Tam and J.C. Webb. Dispersion relation preserving finite difference schemes for computational acoustics. *Journal of computational physics*, 107, 1993.
- [5] Jr. W.M. Humphreys, T.F. Brooks, Jr. W.W. Hunter, and K.R. Meadows. Design and use of microphone directional array for aeroacoustic measurement. *36st Aerospace Sciences Meeting & exhibit, AIAA, Reno*, 1998.