HAL open science

Effet des modes de propagation non plan dans les guides d'ondes a section variable

Rémi Blandin, Xavier Pelorson, Annemie van Hirtum, Rafael Laboissière, Oriol Guasch, Marc Arnela

To cite this version:

Rémi Blandin, Xavier Pelorson, Annemie van Hirtum, Rafael Laboissière, Oriol Guasch, et al.. Effet des modes de propagation non plan dans les guides d'ondes a section variable. CFA 2014 - 12ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2014, Poitiers, France. hal-01065001

HAL Id: hal-01065001

https://hal.science/hal-01065001v1

Submitted on 17 Sep 2014

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.

Effet des modes de propagation non plan dans les guides d'ondes à section variable

R. Blandin[a], X. Pelorson[a], A. Van Hirtum[a], R. Laboissière[b], O. Guasch[c] et M. Arnela[c]
[a]GIPSA-lab UMR 5216, 11 rue des mathématiques, BP 46, 38402 Saint-Martin-D'Hères, France
[b]Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, Université Pierre Mendès-France BP47, 38040 Grenoble, France
[c]La Salle R&D - Universitat Ramon Lull, Quatre camins 2, 08022 Barcelona, Espagne
remi.blandin@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Les modèles de conduit vocal actuellement utilisés en synthèse et en analyse de la parole sont basés sur une approximation basse fréquence (ondes planes). Celle-ci peut être justifiée dans le cas des sons voisés du fait de la position des cordes vocales et de la nature essentiellement basse-fréquence des sons générés. Ceci n'est pas le cas des plosives et des fricatives pour lesquelles on peut s'attendre à ce que des modes de propagation non plans soient générés. Ceux-ci dominent alors le champ de pression interne et rayonné. Étant donné les dimensions du conduit vocal, ces modes sont susceptibles d'intervenir à partir d'environ 4-5 kHz. On peut donc s'attendre à ce que leurs effets soient perceptibles. Un modèle théorique basé sur une approche modale est présenté comme une alternative aux modèles en ondes planes. Des mesures de pression acoustique ont été effectuées, à l'intérieur et à l'extérieur de différentes maquettes approximant le conduit vocal, au moyen d'une sonde microphonique déplacée par un positionneur 3-D. Des conduits vocaux approximés par un tube de section uniforme et des tubes présentant un changement de section centrée et excentrée sont successivement étudiés. Les résultats expérimentaux sont comparés avec des simulations par éléments finis.

1 Introduction

On peut modéliser de façon simple un guide d'onde à section variable en le découpant en tronçons de section constante en considérant que seules les ondes planes s'y propagent. Cette représentation ne tient pas compte de la forme des sections du guide (circulaire, carrée, quelconques), ni d'une éventuelle excentricité du raccordement de deux tronçons de guide.

Cette formulation n'est plus valide lorsque la fréquence devient proche de la fréquence de coupure des modes de propagation non plans. Une modélisation tenant compte de ces modes doit alors être utilisée. Plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs notamment [10], [8], [9], [7] et [5] pour résoudre ce problème.

Afin d'étudier des géométries plus complexes (comme un conduit vocal) des méthodes numériques telles que les éléments finis, les différences finies ou la méthode TLM (Transmission Line Matrix) peuvent être employées.

L'objet de cet article est de s'intéresser plus particulièrement à l'effet de l'excentricité d'un raccordement entre deux tronçons de guide d'onde de section constante. Ce cas de figure présente un intérêt particulier pour la modélisation du conduit vocal car les modèles d'ondes planes couramment utilisés ne tiennent pas compte du fait que le conduit vocal n'a pas une géométrie axisymétrique.

Pour cela des maquettes ayant des dimensions du même ordre de grandeur que celles du conduit vocal humain ont été réalisées. Des mesures de fonctions de transfert et de pression sur des surfaces ont ensuite été réalisées et comparées à des simulations par éléments finis (EF).

2 Éléments de théorie

Les champs de pression et de vitesse acoustique dans un guide d'onde de section constante peuvent être décrit comme la somme des contributions de différents modes de propagation :

$$\begin{cases} p &= \sum_{n=0}^{\infty} \psi_n(x_1,x_2)\left(A_n e^{jk_n x_3} + B_n e^{-jk_n x_3}\right) e^{j\omega t} \\ v_{x3} &= \frac{1}{\omega\rho}\sum_{n=0}^{\infty} k_n \psi_n(x_1,x_2)\left(B_n e^{jk_n x_3} - A_n e^{-jk_n x_3}\right) e^{j\omega t} \end{cases} \tag{1}$$

Où (x_1, x_2, x_3) est un système de coordonnées généralisé, x_3 étant la direction de propagation. Les nombres d'ondes k_n sont donnés par la relation :

$$k^2 = k_{x1}^2 + k_{x2}^2 + k_n^2 \,, \tag{2}$$

où $k = \omega/c$ est le nombre d'onde. Les fonctions ψ_n forment une base orthogonale et vérifient la condition de normalisation suivante :

$$\int_S \psi_n^* \psi_n dS = S \tag{3}$$

L'expression 1 peut être écrite de façon plus succincte en utilisant une notation vectorielle et en omettant le facteur $e^{j\omega t}$:

$$\begin{cases} p &= {}^t\vec{\psi}\vec{P} \\ v_{x3} &= \frac{1}{S}\,{}^t\vec{\psi}\vec{V} \end{cases} \tag{4}$$

où $\vec{\psi_n} = \psi_n(x_1, x_2)$, $\vec{P_n} = \left(A_n e^{jk_n x_3} + B_n e^{-jk_n x_3}\right)$ et $\vec{V_n} = \left(B_n e^{jk_n x_3} - A_n e^{-jk_n x_3}\right)$.

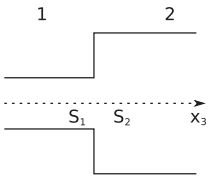


Figure 1 – Discontinuité de section

Au niveau d'une discontinuité de section, les conditions d'égalité de la pression et de la vitesse acoustique conduisent aux relations suivantes :

$$\begin{cases} \vec{P_1} &= F\vec{P_2} \\ \vec{V_2} &= G\vec{V_1} \end{cases} \tag{5}$$

Où $\vec{P_1}$ et $\vec{V_1}$ correspondent aux amplitudes modales dans le guide 1 et $\vec{P_2}$ et $\vec{V_2}$ aux amplitudes modales dans le guide 2 au niveau de la jonction. Les matrices F et G sont définies de la manière suivante [10] :

$$\begin{cases} F_{ij} &= \frac{1}{S_1}\int_{S_1} \psi_{2j}\psi_{1i}^* dS_1 \\ G_{ij} &= \frac{1}{S_2}\int_{S_1} \psi_{2i}^*\psi_{1j} dS_1 \end{cases} \tag{6}$$

Les conditions aux limites aux extrémités du guide d'onde peuvent être prise en compte sous forme d'une vitesse acoustique imposée à l'entrée et d'une matrice d'impédance de rayonnement à la sortie. Celle ci peut être obtenue analytiquement dans le cas d'un guide d'onde à section circulaire débouchant dans un écran infini [13] et dans le cas d'un guide d'onde à section rectangulaire [7].

La matrice d'impédance peut être déterminée à une distance d de l'extremité d'un tronçon de guide d'onde de section constante grace à la relation :

$$Z_0 = (Z_1 + jD_3 Z_c)(jD_3 Z_c^{-1} Z_1 + I)^{-1} \tag{7}$$

Où Z_1 est la matrice d'impedance à l'extrémité de la section de guide, D_3 est une matrice diagonale dont les termes sont $\tan(k_n d)$, Zc est la matrice d'impedance caractéristique de la section (pour une section circulaire il s'agit d'une matrice diagonale dont les termes sont $k\rho c/k_n S$) et I est la matrice identité.

Au niveau d'une jonction, si $S_2 > S_1$, les relations suivantes sont vérifiées [8] :

$$\begin{cases} \vec{P_1} &= F\vec{P_2} \\ \vec{V_2} &= G\vec{V_1} \\ Z_1 &= FZ_2G \end{cases} \tag{8}$$

Les vecteurs $\vec{P_1}$, $\vec{V_1}$ et la matrice Z_1 correspondent au tronçon 1 et $\vec{P_2}$, $\vec{V_2}$ et Z_2 au tronçon 2 de la figure 1. La matrice d'impedance peut ainsi être calculée au niveau de chaque jonction à partir de l'impédance de rayonnement à l'extrémité. La condition aux limites à l'entrée permet ensuite de déduire les vecteurs d'amplitudes modales $\vec{P}$ et $\vec{V}$ en tout point du guide d'onde grâce à la relation :

$$\vec{U_1} = (-D_2 Z_c^{-1}(Z_0 - Z_c) + e^{-jk_n d})\vec{U_0} \tag{9}$$

Où D_2 est une matrice diagonale dont les termes sont $j\sin(k_n d)$, et $\vec{U_0}$ est le vecteur correspondant aux amplitudes modales à la source.

3 Méthodes expérimentales et numériques

3.1 Dispositif expérimental

Afin de mesurer la pression acoustique à l'intérieur et à l'extérieur de différentes maquettes de conduit vocal, un dispositif expérimental approprié est utilisé. Un schéma de ce dispositif est présenté dans la figure 2. Il est constitué d'un microphone (B&K 4182 équipé d'une sonde de 1 mm de diamètre et de 200 mm de long) placé sur un positionneur 3D (OWIS PS35) permettant de le déplacer à l'intérieur et à l'extérieur des maquettes.

Afin de pouvoir balayer l'ensemble de la plage fréquentielle importante pour l'étude de la parole (0 à 10 kHz), deux sources ont été utilisées. Une chambre de compression Monacor KU-916T pour les basses fréquences (50 Hz - 2kHz) et une chambre de compression Eminence PSD :2002S-8 pour les hautes fréquences. Elles sont reliées aux maquettes par l'intermédiaire d'une pièce d'addaptation.

Le signal du microphone est transmis par l'intermédiaire d'un conditionneur et d'un connecteur BNC à une carte d'acquisition (PCI-MIO 16XE) installée sur un ordinateur. Cette même carte permet de générer le signal correspondant au son à générer qui est transmis à un amplificateur puis à la source.

L'acquisition des mesures et la génération des signaux d'entrée de la source sont gérés par un programme Labview.

La sortie de la maquette, le microphone et le positionneur sont placés dans une chambre anéchoïque (1.92x1.95x1.99 m, Vol = 7.45 m^3) [12] et de la mousse acoustique est placée sur la table supportant le positionneur afin d'éviter les perturbations liées aux réflexions. La source est placée à l'extérieur de la chambre anéchoïque pour éviter les interférences avec le son diffusé par la maquette. Un écran en plexiglas est fixé à la sortie de la maquette afin de se placer dans des conditions proches de l'encastrement dans un écran infini.

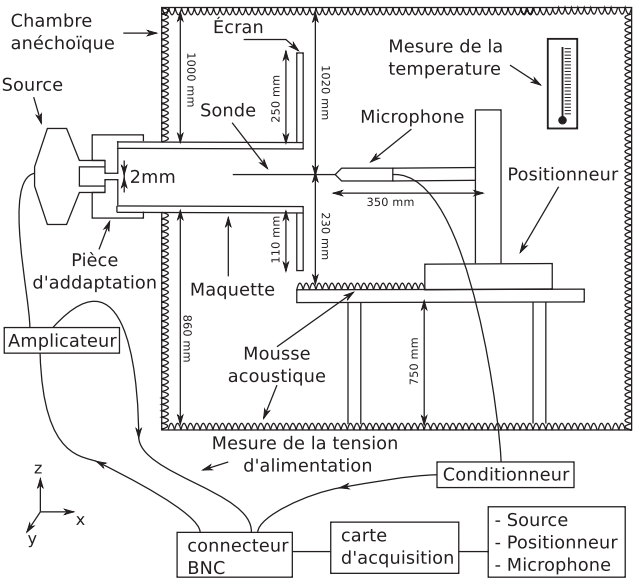


FIGURE 2 – Schéma du dispositif experimental.

Pour cette étude trois maquettes ont été utilisées :

- une maquette constituée d'un seul tube de 170 mm de long et 30 mm de diamètre.
- deux maquettes constituées de deux tubes longs chacun de 85 mm de respectivement 15 mm et 30 mm de diamètre. Pour l'une d'elles les deux tubes partagent le même axe et pour l'autre l'axe est différent (voir figure 6).

3.2 Simulations numériques

Pour réaliser les simulations numériques la méthode des éléments finis (EF) a été utilisée pour résoudre l'équation d'onde dans le domaine temporel. Pour modéliser la propagation en champ libre et utiliser un domaine de taille raisonnable, ce dernier a été entouré d'une couche absorbante parfaitement adaptée (PML pour Perfectly Matched Layer) ce qui permet d'éviter les réflexions aux frontières du domaine. La formulation PML développée dans [4] a été addaptée à la méthode des EF et l'équation d'onde ainsi modifiée a été résolue en utilisant un schéma temporel explicite (se référer à [1] pour les détails de l'implémentation).

Chaque géométrie simulée se termine dans un écran rigide de dimensions 0,25 m x 0,25 m. Cet écran constitue une surface d'un volume rectangulaire de 0,25 m x 0,25 m x 0,1 m qui permet aux ondes émanant du conduit vocal de se propager à l'infini. Ce volume est entouré par une couche de PML de 0,1 m d'épaisseur ayant un coefficient de réflexion relatif de 10^{-4}. En ce qui concerne les conditions aux limites, une admittance aux parois indépendante de la fréquence $\mu = 0,0025$ a été imposée pour prendre en compte les pertes. Pour les mesures de fonctions de transfert une impulsion gaussienne a été imposée à l'entrée du guide d'onde, et pour les calculs de pression en différents points à fréquence fixe, une sinusoïde ayant la fréquence du formant à analyser a été utilisée.

Le domaine computationnelle résultant a été maillé en respectant le critère de précision de 10 nœuds par longueur d'onde [6]. Les pas temporel ont été choisis afin de satisfaire

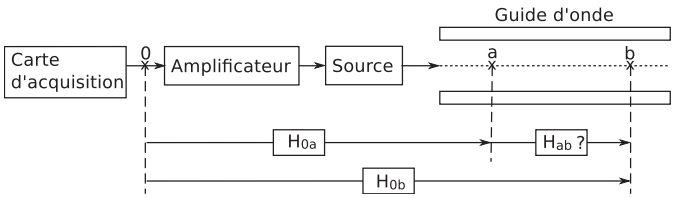


FIGURE 3 – Méthode de mesure de fonctions de transfert.

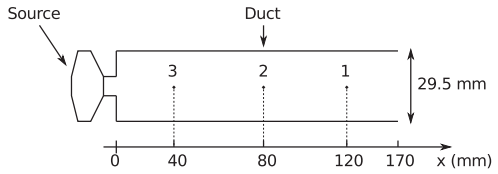


FIGURE 4 – Positions des points de mesures à l'intérieur de la maquette à un seul tube.

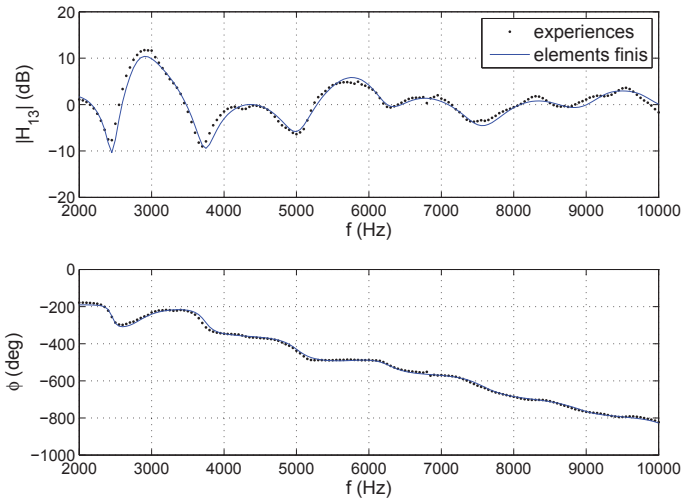


FIGURE 5 – Module et phase de la fonction de transfert entre les points 1 et 3 (voir figure 4) situés à 120 mm et 40 mm de l'entrée d'un tube de 170 mm de long et 30 mm de diamètre.

une condition de stabilité de type Courant-Friedrichs-Lewy. La vitesse du son a été calculée en utilisant la température moyenne à laquelle les expériences ont été réalisées. Une simulation numérique durant 25 ms a été réalisée pour chaque cas analysé. La pression acoustique a été calculée à l'intérieur du guide d'onde et en champ proche sur une grille prédéterminée pour permettre une comparaison avec les expériences. L'amplitude de la pression à chaque point de la grille a été calculé à partir des 5 dernières millisecondes des simulations numériques.

4 Mesures de fonctions de transfert

4.1 Méthode de mesure des fonctions de transfert

Afin de mesurer des fonctions de transfert entre deux points, une méthode par balayage fréquentiel discret est utilisée. Un signal sinusoïdal de fréquence fixe est généré durant environ une seconde pour chaque fréquence à étudier.

Un seul microphone est utilisé pour éviter d'avoir recours à un calibrage absolue. La mesure est réalisée en deux étapes : la pression s_a est d'abord mesurée pour chaque fréquence au premier point de coordonnée a puis au second point de coordonnée b (voir figure 3). Durant chaque mesure la tension d'alimentation s_0 est mesurée simultanément. Les signaux acquis sont donc :

$$\begin{cases} s_0 = A_0 e^{j\phi_0} \quad et \quad s_a = A_a e^{j\phi_a} \\ s_0 = A_0 e^{j\phi_0} \quad et \quad s_b = A_b e^{j\phi_b} \end{cases} \tag{10}$$

Les fonctions de transfert H_{0a} et H_{0b} entre la tension d'alimentation et la pression aux points de mesure sont ensuite estimées. Pour cela l'amplitude du signal mesuré par le microphone est divisée par la tension d'alimentation pour calculer le module. La phase est obtenue en calculant le déphasage entre le signal mesuré par le microphone et la tension d'alimentation. Les fonctions de transfert sont donc :

$$\begin{cases} H_{0a} = \frac{A_a}{A_0} e^{j(\phi_a - \phi_0)} \\ H_{0b} = \frac{A_b}{A_0} e^{j(\phi_b - \phi_0)} \end{cases} \tag{11}$$

La fonction de transfert H_{0a} correspond au produit des fonctions de transfert de la chambre de compression, du guide d'onde entre la source et le point de mesure, de la sonde du microphone et du conditionneur du microphone. Si les conditions expérimentales sont exactement les mêmes lors de la mesure de la pression au point b, la fonction de transfert H_{0b} est le produit de H_{0a} par H_{ab}. On a donc :

$$H_{ab} = \frac{H_{0b}}{H_{0a}} \tag{12}$$

La fonction de transfert de l'ensemble du système de mesures est ainsi éliminée. Bien que cette méthode soit un peu lourde, elle présente l'avantage de donner des résultats de bonne qualité car suffisamment d'énergie est fournie à chaque fréquence pour réaliser une bonne mesure. D'autre part elle permet, avec un traitement du signal approprié, de s'affranchir du problème de distortion harmonique due à la source.

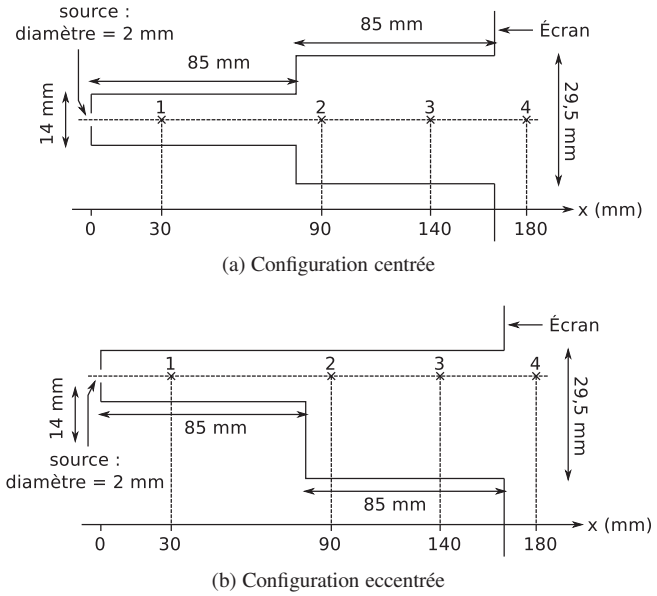
4.2 Fonctions de transfert mesurées

La méthode précédemment décrite a permis de mesurer des fonctions de transfert entre différents points à l'intérieur et à l'extérieur des maquettes constituées d'un tube et de deux tubes. Les mêmes fonctions de transfert ont été obtenues par simulations numériques avec la méthode des EF.

4.2.1 Tube unique

Pour la maquette constituée d'un tube unique, la pression a été mesurée en trois points sur l'axe du tube. Leur localisation à l'intérieur de la maquette est présenté sur la figure 4. Cela a permis de mesurer 3 fonctions de transfert entre ces 3 points pour des fréquences variant de 2 kHz à 10 kHz et de les comparer avec les simulations numériques.

Le module et la phase de la fonction de transfert entre les points 1 et 3 sont présentés sur la figure 5. On peut voir que les valeurs obtenues avec la méthode des EF sont très proches des valeurs expérimentales même si un léger décalage entre les deux courbes s'accroissant vers les hautes fréquences est observable. Les résultats de simulations sont donc en accord avec les mesures.



(a) Configuration centrée

(b) Configuration eccentrée

FIGURE 6 – Dimensions des maquettes à deux tubes et localisation des points de mesures des fonctions de transfert.

4.2.2 Maquettes à deux tubes

Le même type de mesures a été effectué sur les maquettes à deux tubes en quatre points. Les positions des points de mesures sont présentées sur les figures 6a et 6b. Six fonctions de transfert ont donc pu être mesurées et comparées aux simulations par EF.

À titre d'exemple la fonction de transfert entre les points 1 et 2 est présenté dans la figure 7. Pour les 2 configurations les simulations par EF correspondent bien avec les mesures. On remarque cependant comme pour le tube unique un léger décalage qui s'accroît vers les hautes fréquences.

Les fonctions de transfert des deux configurations sont assez semblables à basse fréquence (jusqu'à environ 5 kHz). Ce n'est plus le cas en hautes fréquences. La différence la plus flagrante est la présence de maxima (par exemple à 7060 Hz et 7510 Hz) et de minima (par exemple à 7220 Hz et 7910 Hz) pour la configuration excentrée qui ne sont pas présents pour l'autre configuration.

Cette différence peut être expliquée par le fait que la configuration excentrée permet à certains modes de propagation transverses d'êtres générés alors que dans l'autre configuration ces modes sont quasiment inexistants. Quand la fréquence est supérieure à la fréquence de coupure de ces modes transverses, ils peuvent se propager. D'autres résonances que celles dues à la propagation des ondes planes existent alors et sont à l'origine des maxima supplémentaires observés sur les fonctions de transfert.

On peut donc supposer que la modélisation en onde plane est appropriée pour les basses fréquences (jusqu'à environ 5 kHz), mais qu'elle ne l'est plus pour les hautes fréquences.

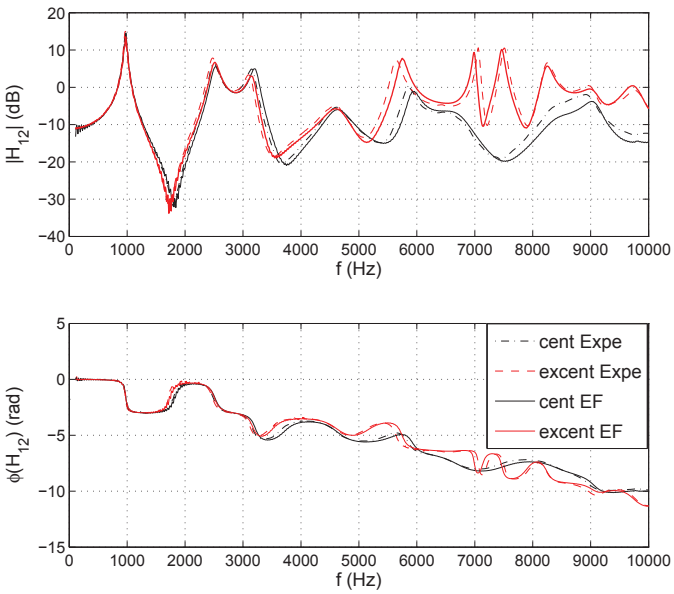


FIGURE 7 – Module et phase des fonctions de transfert entre 2 points (notés 1 et 2 sur les figures6a et 6b) situés à 30 mm et 90 mm de la source dans deux maquettes de conduit vocal constituées de 2 tubes de 85 mm de long et respectivement 14 mm et 29,5 mm de diamètre raccordés de façon centrée et excentrée.

Configuration centrée	EF	Expériences
F3	2570 Hz	2550 Hz
F8	6980 Hz	6940 Hz
Configuration excentrée		
F3	2570 Hz	2550 Hz
F8	7080 Hz	7150 Hz

TABLEAU 1 – Fréquences des formants utilisées pour comparer les expériences et les simulations réalisées sur les maquettes à deux tubes.

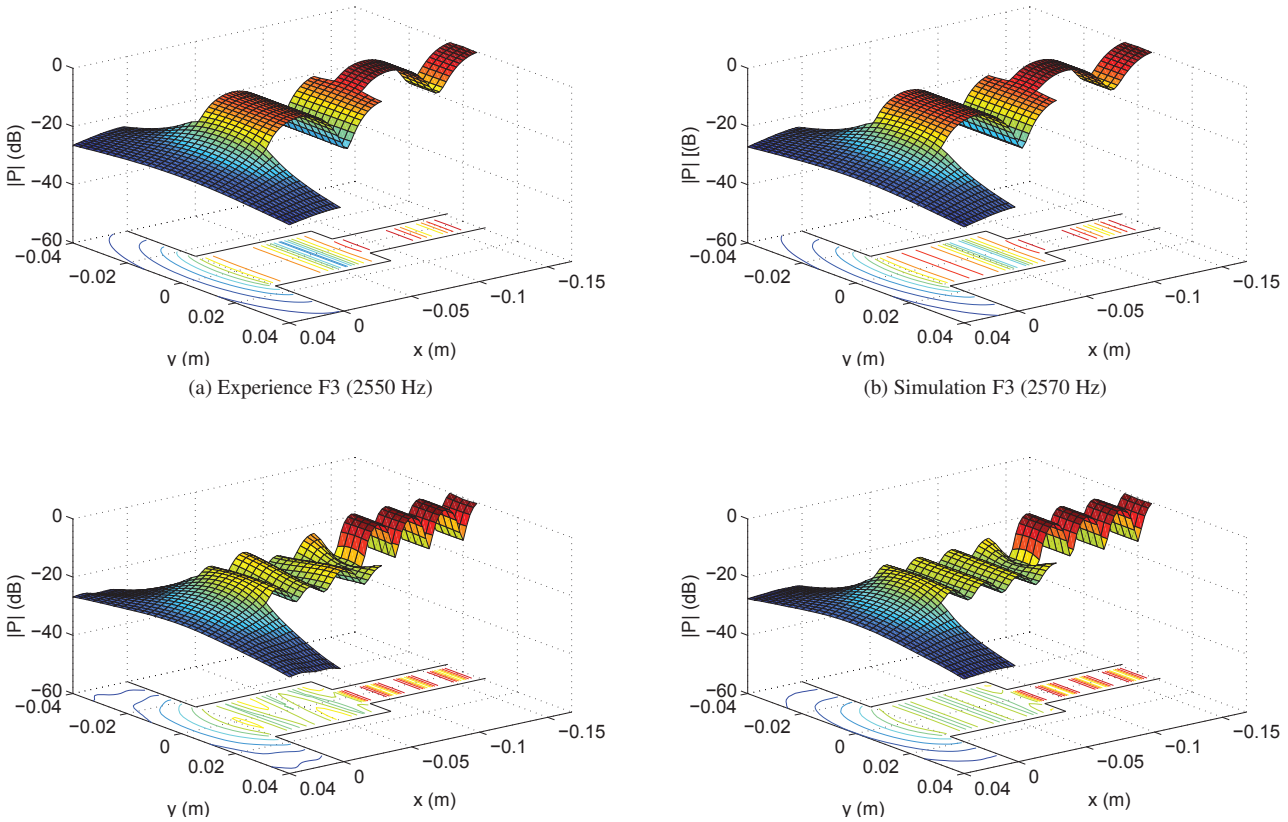
5 Mesures de pression en différents points sur les maquettes à deux tubes

5.0.3 Comparaison des deux configurations

Afin d'observer les modes de propagations générés, des mesures de pression sur des surfaces ont été effectuées à des fréquences correspondant à deux formants (F3 et F8) pour les deux types de configurations des maquettes à deux tubes. Des simulations EF ont été effectuées pour ces mêmes surfaces aux fréquences correspondant aux mêmes formants. Les fréquences des formants utilisés pour la comparaison sont présentées dans le tableau 1.

L'amplitude de la pression obtenue à ces fréquences pour les expériences et les simulations est représentée sous forme de surfaces dans les figures 8 et 9. Des lignes iso pression ont également été tracées afin de mieux identifier les modes de propagation solicités.

Pour le formant F3, l'amplitude de la pression est quasiment similaire pour les deux configurations étudiées. On observe dans les deux cas que les courbes iso amplitude (tracées en dessous des surfaces) sont des lignes droites



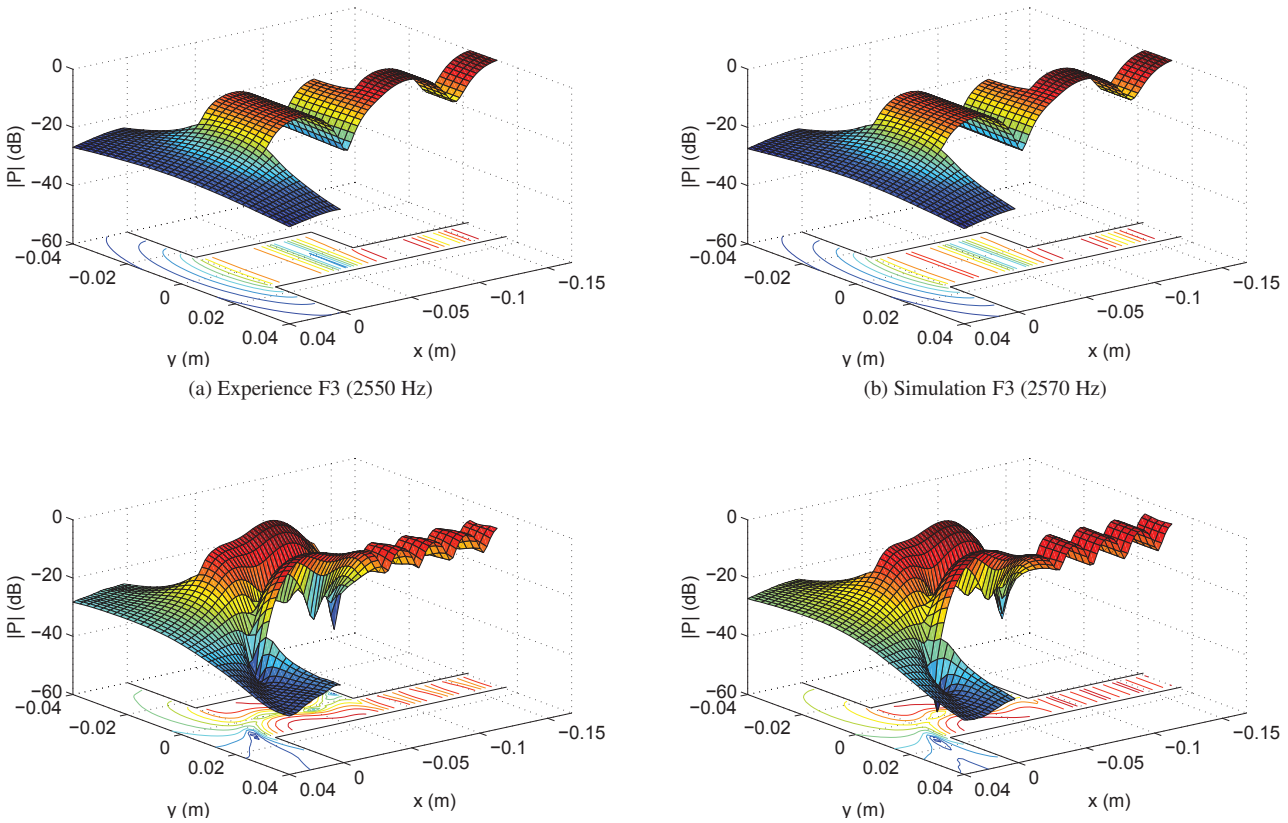
(a) Experience F3 (2550 Hz)

(b) Simulation F3 (2570 Hz)

(c) Experience F8 (6980 Hz)

(d) Simulation F8 (6940 Hz)

FIGURE 8 – Amplitude de la pression mesurée sur une surface à l'intérieur et à l'extérieur d'une maquette de conduit vocale constituée de deux tubes de 85 mm de long et respectivement 14 mm et 29,5 mm de diamètre partageant le même axe.



(a) Experience F3 (2550 Hz)

(b) Simulation F3 (2570 Hz)

(c) Experience F8 (7080 Hz)

(d) Simulation F8 (7150 Hz)

FIGURE 9 – Amplitude de la pression mesurée sur une surface à l'intérieur et à l'extérieur d'une maquette de conduit vocale constituée de deux tubes de 85 mm de long et respectivement 14 mm et 29,5 mm de diamètre raccordés de façon excentrée.

à l'intérieure des maquettes. Cela confirme donc que l'hypothèse d'ondes planes décrit assez bien la réalité physique dans les guides d'ondes à basse fréquence. On peut remarquer toutefois les rayonnements de la source à l'entrée du petit tube, du petit tube dans le grand tube et du grand tube vers l'extérieur qui sont à l'origine de la nécessité d'utiliser des corrections de longueur dans un modèle basé sur l'hypothèse d'onde plane [11].

En haute fréquence une différence très nette apparaît entre les deux types de configurations. Alors que les modes de propagations transverses sont très peu excités dans la configuration centrée, ils prédominent dans le plus grand tube pour la configuration excentrée. Cela génère des variations importantes d'amplitude suivant l'axe y. Le rayonnement issu de cette configuration est alors très directif.

5.0.4 Comparaison des simulations avec les expériences

On peut remarquer que les amplitudes mesurées et obtenues par simulations sont dans l'ensemble très semblables. Il y a toutefois une différence en haute fréquence pour le formant F8 dans la configuration centrée. L'amplitude mesurée dans le plus grand tube présente des variations suivant l'axe y, ce qui n'est pas le cas pour l'amplitude obtenue par simulation. Cela peut s'expliquer par le fait que contrairement au maillage EF, la maquette utilisée pour les mesures n'est pas parfaitement symétrique. Les modes de propagation transverse sont donc tout de même un peu excités.

Les amplitudes mesurées étant connues à un facteur multiplicatif près, leurs valeur en dB a été décalée afin que le maximum de chaque surface soit identique à celui de la surface obtenue par simulation. La comparaison point par point des amplitudes a ensuite montré que, à l'exception du cas du formant F8 dans la configuration centrée et de certaines zones particulières correspondant à des minima de pression, l'écart entre simulations et expériences est de l'ordre de 1 dB. Les simulations par EF permettent donc d'obtenir une bonne estimation de la pression en différents endroits à l'intérieur et à l'extérieur des maquettes.

6 Conclusion

La comparaison des simulations avec les expériences a permis de valider le code EF utilisé. L'étude de géométries plus complexes difficiles à modéliser analytiquement est alors validée [3] [2].

Les expériences et simulations présentées ont permis de montrer l'importance et l'intérêt de la prise en compte des modes de propagation non plans dans la modélisation du conduit vocal. Il a été ainsi observé que l'excentricité du raccord entre deux tronçons de guide d'onde permet à certains modes de propagation non plans de se développer. Cela a pour conséquence de modifier considérablement le rayonnement du son issu de la maquette. Il est donc important de prendre en compte ce paramètre si l'on souhaite réaliser une synthèse de parole reproduisant la directivité du son émis.

Ce phénomène apparaissant en haute fréquence, on s'attend à ce qu'il soit perceptible essentiellement pour les fricatives et les plosives étant donné que le spectre des sons voisés est limité aux basses fréquences.

7 Remerciements

Ce travail a été soutenu par la subvention EU-FET EUNISON 308874.

Références

[1] M Arnela and O Guasch. Finite element computation of elliptical vocal tract impedances using the two-microphone transfer function method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(6) :4197–4209, 2013.

[2] M Arnela and O Guasch. Two-dimensional vocal tracts with three-dimensional behavior in the numerical generation of vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1) :369–379, 2014.

[3] M Arnela, O Guasch, and F Alías. Effects of head geometry simplifications on acoustic radiation of vowel sounds based on time-domain finite-element simulations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(4) :2946–2954, 2013.

[4] M Grote and I Sim. Efficient pml for the wave equation. *Global Science Preprint, arXiv : math.NA/1001.0319v1*, 2010.

[5] T Hélie. Unidimensional models of acoustic propagation in axisymmetric waveguides. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(5) :2633–2647, 2003.

[6] F Ihlenburg. *Finite element analysis of acoustic scattering*, volume 132. Springer, 1998.

[7] JA Kemp, DM Campbell, and N Amir. Multimodal radiation impedance of a rectangular duct terminated in an infinite baffle. *Acta Acustica united with Acustica*, 87(1) :11–15, 2001.

[8] J Kergomard, A Garcia, G Tagui, and JP Dalmont. Analysis of higher order mode effects in an expansion chamber using modal theory and equivalent electrical circuits. *Journal of Sound and Vibration*, 129(3) :457–475, 1989.

[9] V Pagneux. Propagation acoustique dans les guidesa section variable et effets d'écoulement, these de doctorat. *Université du Maine*, 1996.

[10] A Roure. *Propagation guidée. Etude des discontinuités*. PhD thesis, 1976.

[11] A Selamet and ZL Ji. Circular asymmetric helmholtz resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(5) :2360–2369, 2000.

[12] A Van Hirtum and Y Fujiso. Insulation room for aero-acoustic experiments at moderate reynolds and low mach numbers. *Applied Acoustics*, 73(1) :72–77, 2012.

[13] W Zorumski. Generalized radiation impedances and reflection coefficients of circular and annular ducts. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 54 :1667, 1973.