



**HAL**  
open science

## Précision et limites des mesures de résonance d'un conduit vocal par excitation acoustique aux lèvres : simulation numérique et étude sur maquettes

Timothée Maison, Baptiste Allain, Fabrice Silva, Philippe Guillemain,  
Nathalie Henrich Bernardoni

### ► To cite this version:

Timothée Maison, Baptiste Allain, Fabrice Silva, Philippe Guillemain, Nathalie Henrich Bernardoni. Précision et limites des mesures de résonance d'un conduit vocal par excitation acoustique aux lèvres : simulation numérique et étude sur maquettes. CFA 2022 - 16ème Congrès Français d'Acoustique, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03847782

**HAL Id: hal-03847782**

**<https://hal.science/hal-03847782>**

Submitted on 10 Nov 2022

**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.



16<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique  
11-15 Avril 2022, Marseille

Précision et limites des mesures de résonance d'un conduit vocal  
par excitation acoustique aux lèvres :  
simulation numérique et étude sur maquettes

T. Maison<sup>a</sup>, B. Allain<sup>b</sup>, F. Silva<sup>a</sup>, P. Guillemain<sup>a</sup>, and N. Henrich Bernardoni<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Aix-Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marseille, France

<sup>b</sup>Centrale Marseille, Marseille, France

<sup>c</sup>Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, GIPSA-lab, Grenoble, France



La caractérisation des résonances du conduit vocal est indispensable pour comprendre l'acoustique de la voix. Les méthodes de mesure s'appuyant sur un signal d'excitation à large bande et une mesure de pression au niveau des lèvres offrent un bon compromis entre précision, rapidité et intrusivité. Nous abordons ici quelques aspects pratiques pour réaliser de telles mesures et obtenir des estimations précises des fréquences de résonance et des facteurs de qualité. La méthode de mesure est validée en comparant des modèles numériques (lignes de transmission avec pertes visco-thermiques et rayonnement) avec différentes mesures, tout d'abord sur un simple tube métallique puis sur des maquettes simplifiées de voyelles. Les modes (fréquences et facteurs de qualité) sont analysés avec la méthode des cercles de Kennelly exploitant à la fois l'amplitude et la phase des réponses en fréquence, robuste face au problème de proximité entre résonances et anti-résonances. D'autre part, étant donné les niveaux sonores émis par les chanteurs, nous expérimentons la possibilité d'éloigner le microphone (l'excitation restant au niveau des lèvres). Nous montrons que le microphone peut être placé n'importe où dès lors que le rapport signal/bruit est suffisamment bon : sous hypothèse de rayonnement monopolaire, le modèle de mesure reste valable mais les estimations deviennent plus sensibles aux possibles interférences d'autres sources acoustiques. Les fréquences de résonance et les facteurs de qualité obtenus à partir de mesures avec un microphone éloigné jusqu'à 30 cm des lèvres s'écartent de moins de 0.2% et 10% respectivement des valeurs de référence (mesure aux lèvres), validant le principe d'une caractérisation avec un microphone éloigné des lèvres. Enfin, les limites de la mesure avec excitation aux lèvres pour des configurations vocaliques avec constriction forte du conduit vocal sont discutées.

## 1 Introduction

Les résonances du conduit vocal sont essentielles pour la communication orale et peuvent avoir une grande influence sur la voix chantée [1]. La nécessité de leur caractérisation a conduit au développement de plusieurs dispositifs avec un compromis entre intrusivité et précision. Les méthodes indirectes basées sur l'analyse des formants dans le signal vocal (comme le codage prédictif linéaire) ont montré de sérieuses limitations pour les fréquences fondamentales élevées [2]. Nous nous concentrons ici sur un dispositif non invasif basé sur un signal d'excitation à large bande au niveau des lèvres, proposé initialement par Epps et al. [3].

Ce type de dispositif a connu plusieurs développements et variations tels que l'utilisation de sweep (sinus balayé en fréquence) [4], une excitation avec un buzzer de smartphone [5], ou l'estimation directe de la pression et de la vitesse [6]. Récemment, le modèle de mesure de cette approche a été explicité, montrant également ses limites physiques [7]. La mise en œuvre est assez simple, mais l'estimation précise des fréquences de résonance et des facteurs de qualité exige quelques précautions. Du choix du système matériel jusqu'à l'estimation des paramètres modaux, chaque étape nécessite des ajustements.

Nous détaillons d'abord la méthodologie complète et quelques recommandations pratiques pour effectuer de telles mesures dans les meilleures conditions possibles (Sec. 2), en laissant de côté pour le moment la question de l'estimation en temps réel. Motivés par le niveau élevé de la voix au niveau des lèvres qui peut saturer et endommager le microphone, nous explorons la possibilité de délocaliser la mesure de pression de l'excitation (traditionnellement toutes deux effectuées au niveau des lèvres), au moyen d'expériences et modèle de rayonnement (Sec. 3). Nous étudions ici le cas sans phonation. Tous les résultats resteraient valables dans le cas où la voix serait superposée à la mesure, en supposant que l'on sache séparer le signal de caractérisation et le signal de phonation.

## 2 Méthodes

### 2.1 Dispositif et contexte théorique

Le dispositif se compose d'un capillaire flexible (diamètre 4 mm) connecté à un adaptateur d'impédance sur un haut-parleur (Beyma CP850Nd) avec un amplificateur (Flying Mole DAD-M100 proII BB) et une carte son (Focusrite 6i6). L'extrémité du capillaire est positionné à l'entrée d'un modèle de conduit vocal idéalisé (un guide d'onde cylindrique ouvert-fermé de 15 cm de long et 21 mm de diamètre pour la validation). Le capillaire flexible est recouvert par un tuyau plus épais afin de supprimer son rayonnement latéral (voir Fig. 1) : la seule source acoustique est ainsi la sortie du capillaire au niveau des lèvres - sinon des interférences peuvent se produire. Le haut-parleur et l'adaptateur d'impédance avec le tube sont isolés acoustiquement pour la même raison.



FIGURE 1 – Photo du capillaire d'excitation et du guide d'ondes.

Classiquement dans la littérature [1, 3, 4, 6, 7], le microphone est placé à côté du point d'excitation au niveau des lèvres (ce placement est discuté dans la Sec. 3). Il enregistre la réponse à un signal large bande dans une condition de calibration (bouche fermée) et dans une condition de mesure (bouche ouverte). La fermeture aux lèvres est obtenue avec une feuille de latex rigide de 1 mm d'épaisseur découpée au diamètre du guide d'ondes.

Le modèle de mesure de la réponse du conduit vocal au niveau des lèvres, valable pour tous les types de signaux d'excitation, a été décrit dans [7]. Le spectre de la pression bouche ouverte  $P_{open}(\omega)$  rapporté au spectre en bouche fermée  $P_{closed}(\omega)$  donne accès à une réponse en fréquence  $H_{lips}(\omega)$  caractérisant l'acoustique du conduit vocal, rayonnement compris (Eq. 1). Le capillaire d'excitation est suffisamment petit (haute impédance) pour être supposé indépendant de la charge acoustique (c'est-à-dire que le débit source fourni est le même pour un conduit vocal ouvert ou fermé).

$$H_{lips}(\omega) = \frac{P_{open}(\omega)}{P_{closed}(\omega)} = \frac{Z_{VT}}{Z_{VT} + Z_R} \quad (1)$$

avec  $Z_{VT}$  l'impédance d'entrée du conduit vocal vue depuis lèvres et  $Z_R$  l'impédance de rayonnement du conduit vocal. Les résonances de  $H_{lips}(\omega)$  sont identiques à la fonction de transfert couramment exhibée du conduit vocal : pression aux lèvres sur débit à la glotte ( $H_{voice} = P_{lips}/U_{glottis}$ ). Le rayonnement des lèvres est inclus, ces résonances correspondent ainsi à l'acoustique du conduit vocal rayonnant.

## 2.2 Signal d'excitation et méthode d'analyse

Un sinus à modulation de fréquence exponentielle (sweep) synchronisée est utilisée (plage fréquentielle 0.1 à 5.5 kHz, durée de 1 s, avec fade-in et fade-out de 50 ms). La méthode de déconvolution dans le domaine de Fourier détaillée dans la Ref. [8] est appliquée, ce qui permet de séparer correctement les contributions issues des non linéarités de la chaîne d'excitation (et de mesure) de la réponse impulsionnelle linéaire du guide d'ondes. En pratique, chaque mesure de pression (conditions de bouche fermée et ouverte) est convoluée dans le domaine de Fourier avec le sweep inverse, puis l'impulsion linéaire est fenêtrée dans le domaine temporel. Pour le guide d'ondes cylindrique utilisé ici, l'étendue temporelle de l'impulsion linéaire est d'environ 120 ms. Une fenêtre à sommet plat ("top-flat") suffisamment longue est utilisée pour minimiser la distorsion de la réponse impulsionnelle. Enfin, la réponse en fréquence corrigée  $H_{lips}(\omega)$  est calculée (Eq. 2) avec une inversion de spectre régularisée (paramètre  $\epsilon(\omega)$ ) comme indiqué dans [9].

$$H_{lips}^{meas}(\omega) = \frac{P_{open}(\omega) \cdot P_{closed}(\omega)^*}{|P_{closed}(\omega)|^2 + \epsilon(\omega)} \quad (2)$$

Les signaux dans le domaine temporel sont échantillonnés à 44 100 Hz, les transformées de Fourier sont effectuées avec 65 538 points (puissance de 2 supérieure à la longueur du signal pour optimiser le calcul avec un remplissage de zéros). La résolution fréquentielle finale de  $H_{lips}^{meas}(\omega)$  est inférieure à 1 Hz. Le niveau de pression acoustique du signal d'excitation mesuré avec un dBmètre (Nor131) atteint environ 86 dB (LAFmax) à 9 cm de la source (sortie du capillaire et entrée du guide d'onde). Toutes les mesures ont été effectuées dans une chambre anéchoïque du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique.

## 2.2.1 Simulation numérique

Dans le but de pouvoir comparer les mesures, l'acoustique des guides d'ondes utilisés par la suite est modélisée numériquement en ligne de transmission en fonction de leur géométrie, avec des pertes visco-thermiques (température des mesures : 22 °C) de parois rigides [10] et un rayonnement non bafflé [11]. Les sections géométriques coniques sont approximées par une concaténation de cylindres de 0.1 mm de longueur. Les réponses en fréquence modélisées seront notées  $H_{voice}^{num}$  pour la fonction de transfert du conduit vocal et  $H_{lips}^{num}$  pour la fonction de réponse aux lèvres.

## 2.3 Estimation modale

La fonction de transfert du conduit vocal  $H_{voice}$  ne contient pas d'anti-résonance contrairement à  $H_{lips}$  (voir exemple Fig. 8). La méthode choisie pour déterminer une fréquence de résonance et un facteur de qualité doit être robuste au bruit et à la proximité d'anti-résonances (voir Fig. 6). La fréquence du maxima d'amplitude est peu biaisée (quelques Hertz), mais l'estimation du facteur de qualité peut souffrir de l'asymétrie du pic d'amplitude : la largeur de bande à -3 dB des résonances  $H(\omega)$  s'écarte de la largeur de bande réelle des résonances du conduit vocal.

La méthode proposée consiste tout d'abord à délimiter les zones de fréquences des maxima d'amplitude (voir Fig. 2 pour le cas de la première résonance). Les valeurs de  $H(\omega)$  dans la gamme de fréquences considérée sont représentées dans le plan complexe. L'ajustement d'un cercle géométrique paramétré en fréquence (dit cercle de Kennelly) sur ces données permet ensuite d'évaluer la fréquence de résonance et son facteur de qualité [12].

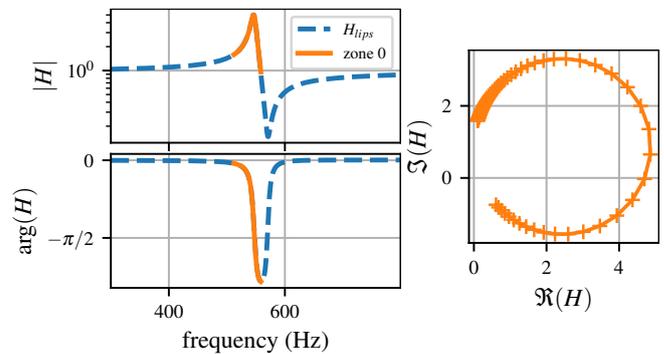


FIGURE 2 – Définition de la zone de la première résonance et cercle de Kennelly associé pour le modèle numérique  $H_{lips}^{num}$ .

Si on compare l'estimation modale de la fonction de transfert du guide d'onde  $H_{voice}^{num}$  et celle de la fonction mesurée aux lèvres  $H_{lips}^{num}$ , les résultats sont quasiment identiques (Table 1). Cela montre la robustesse de la méthode d'estimation modale vis-à-vis de la proximité de zéros proches des résonances, ainsi qu'une bonne caractérisation acoustique à partir de la méthode d'excitation aux lèvres pour un conduit vocal idéalisé.

TABLEAU 1 – Estimations des fréquences de résonance  $f$  (Hz) et des facteurs de qualité  $Q$  des modèles numériques.

$f // Q$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$
$H_{voice}^{num}$	546.8	1645.4	2746.1	3849.5	4955.8
$H_{lips}^{num}$	546.8	1645.4	2746.5	3851.2	4960.7
$H_{voice}^{num}$	59.1	55.5	45.0	37.9	33.0
$H_{lips}^{num}$	59.1	55.6	45.4	38.9	35.0

### 3 Positionnement du microphone

#### 3.1 Modèle de rayonnement

Afin d’explorer la possibilité d’écarter le microphone des lèvres, un microphone (GRAS 40PR/PL avec conditionneur MMF M108) est déplacé horizontalement entre 0.4 cm et 38 cm de l’entrée du guide d’ondes à 1 mm près (voir Fig. 3). Pour chaque position du microphone, deux enregistrements sont effectués avec 1) la condition de bouche ouverte et 2) la condition de bouche fermée. La valeur moyenne quadratique du niveau de pression est calculée sur de courtes fenêtres temporelles (dix périodes) le long du sweep, en fonction de la distance. Elle est comparée à un modèle de rayonnement monopolaire en champ lointain (décroissant comme l’inverse de la distance), et les deux conditions sont comparées entre elles.

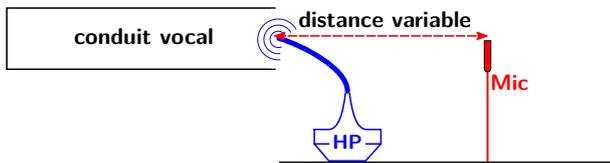


FIGURE 3 – Schéma de l’antenne avec 1 microphone déplacé pour chaque mesure.

La Figure 4 montre un exemple (fréquence moyenne de 587 Hz) de la valeur de pression efficace sur dix périodes des signaux enregistrés en fonction de la distance de l’entrée du guide d’ondes pour des conditions de bouche ouverte et fermée. Les courbes sont normalisées par la valeur de référence du microphone aux lèvres (0.4 cm). Elles sont comparées au modèle de champ lointain. Le niveau de pression acoustique diminue globalement comme l’inverse de la distance, ce qui équivaut à un modèle de rayonnement monopolaire en champ lointain sur les gammes de fréquences considérées, dès que la distance est supérieure à 2 cm de l’entrée. Pour les autres fréquences étudiées, peu de variations sont observées : la diminution de la pression reste proportionnelle à l’inverse de la distance. Le comportement de la pression avec la distance est similaire entre les conditions fermée et ouverte, ce qui indique que la méthode compense la position du microphone. Par conséquent, le modèle de mesure (Eq. 1) reste le même pour un microphone placé à distance des lèvres.

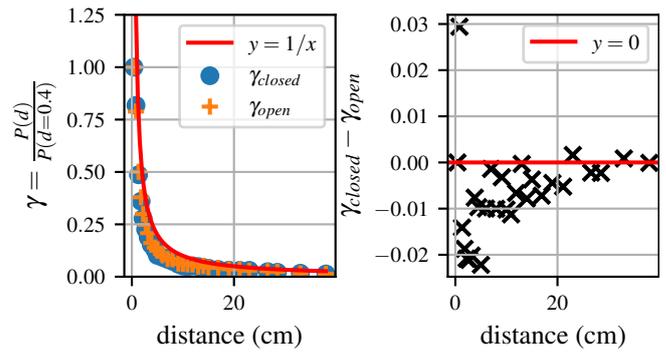


FIGURE 4 – Valeur moyenne quadratique de la pression normalisée à 587 Hz en fonction de la distance, et différence entre condition bouche ouverte et bouche fermée.

#### 3.2 Effet du point de mesure sur les estimations modales

Pour étudier l’influence de la distance du microphone sur la caractérisation acoustique du guide d’ondes, 4 microphones (M1, M2, M3, M4) montés sur une antenne (aux distances fixes  $d = 0.5, 10, 20$  et 30 cm) mesurent simultanément (voir Fig. 5) la réponse en fréquence à l’entrée du guide d’ondes, sur 20 répétitions (calibration et mesure). Les fréquences de résonance et les facteurs de qualité estimés par chaque microphone sont comparés entre eux, ainsi qu’avec ceux estimés par les modèles numériques (voir Sec. 2).

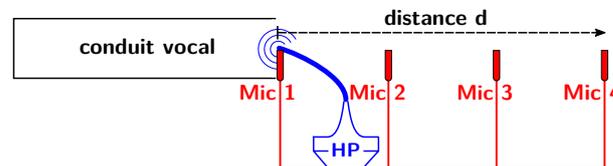


FIGURE 5 – Schéma de l’antenne avec 4 microphones (M1, M2, M3, M4) à 0.5, 10, 20 et 30 cm respectivement.

Les mesures à différentes distances sont très similaires et proches du modèle numérique (voir Fig. 6). Les effets de la propagation entre les lèvres et le microphone sont bien compensés entre la calibration et la mesure. Le rapport signal à bruit diminue pour les positions les plus éloignées du microphone en raison de la baisse d’amplitude du signal avec la distance. La réponse mesurée  $H_{M1}$  au niveau des lèvres (M1) a une amplitude plus faible, probablement en raison du biais introduit par le bouchon (1 mm) utilisé pour la condition de bouche fermée : le changement de distance entre le microphone et le guide d’ondes n’est plus négligeable devant la distance du microphone aux lèvres.

Pour toutes les distances étudiées, la moyenne sur 20 répétitions des estimations des fréquences de résonance (voir Table 2) s’écarte de moins de 0.2 % par rapport à la mesure de référence à 0.5 cm (M1). Elle est sous-estimée de moins de 0.6 % par rapport au modèle numérique. L’écart-type des estimations de fréquence augmente légèrement avec la distance et avec la fréquence de résonance.

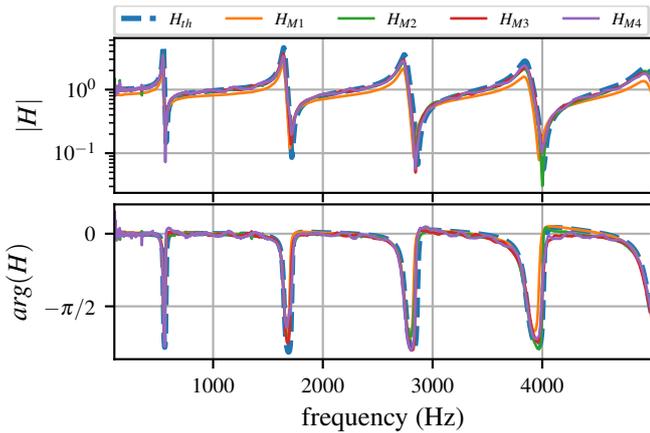


FIGURE 6 – Exemple de mesures simultanées de  $H_{lips}$  pour 4 distances du microphone, et modèle numérique  $H_{lips}^{num}$ .

TABLEAU 2 – Moyennes et écart-types sur 20 mesures des estimations des fréquences de résonance du microphone le plus proche (M1) au plus loin (M4), et estimations du modèle numérique.

$f$ (Hz)	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$
$H_{lips}^{num}$	546.8	1645.4	2746.5	3851.2	4960.7
$H_{M1}$	543.8 ±0.1	1641.3 ±0.4	2736.8 ±0.5	3846.5 ±1.0	4947.1 ±1.6
$H_{M2}$	543.9 ±0.1	1641.7 ±0.4	2737.3 ±0.8	3845.6 ±1.7	4951.1 ±2.0
$H_{M3}$	544.0 ±0.1	1642.1 ±0.4	2737.2 ±1.1	3851.8 ±3.0	4947.4 ±3.4
$H_{M4}$	543.5 ±0.2	1641.2 ±0.7	2735.1 ±1.8	3847.8 ±3.1	4950.4 ±3.3

TABLEAU 3 – Moyennes et écart-types sur 20 mesures des estimations des facteurs de qualité de résonance du microphone le plus proche (M1) au plus loin (M4), et estimation du modèle numérique.

$Q$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$
$H_{lips}^{num}$	59.1	55.6	45.4	38.9	35.0
M1	46.7 ±0.2	45.5 ±1.2	40.0 ±0.4	32.5 ±1.2	30.8 ±0.5
M2	46.9 ±0.6	46.1 ±1.2	39.9 ±1.1	31.8 ±1.7	32.0 ±1.4
M3	47.0 ±0.5	46.7 ±1.1	39.1 ±1.9	32.5 ±3.0	31.7 ±3.5
M4	47.2 ±1.1	48.9 ±0.7	38.8 ±2.1	36.0 ±3.3	31.9 ±4.1

Pour tous les microphones, la moyenne sur 20 répétitions des estimations des facteurs de qualité (voir Table 3) s'écarte de moins de 10 % par rapport à la mesure de référence (M1). Elle est sous-estimée par rapport aux résultats du modèle, notamment pour la première résonance : le bouchon glottique

n'étant pas en métal, il y a davantage de pertes que dans le modèle numérique. L'écart-type augmente légèrement avec la fréquence et la distance.

## 4 Maquettes vocaliques

### 4.1 Profils géométriques

Des maquettes de conduit vocal correspondant à différentes configurations vocaliques sont exploités pour évaluer les limites de la méthode et les comparer avec les résultats numériques. D'après [4] les voyelles fermées (par exemple /i/ dans "lit") seraient plus difficiles à caractériser à cause de la forte constriction du conduit. Les maquettes des voyelles /a/, /e/, /i/, /o/ et /u/ (comme dans "chat", "blé", "si", "haut" et "loup" respectivement) sont réalisées à l'imprimante 3D avec des profils linéaires adaptés de ceux de Arai [13], par concaténation de sections coniques (voir Fig. 7).

Le profil interne réel de chaque maquette a été vérifié par microtomographie. La différence moyenne de diamètre interne est inférieure à 1.13 mm dans le pire cas (moyenne 0.45 mm). La précision est ainsi suffisante pour considérer directement les données géométriques théoriques dans les modèles numériques (approximation par concaténation de cylindres de longueur 0.1 mm).

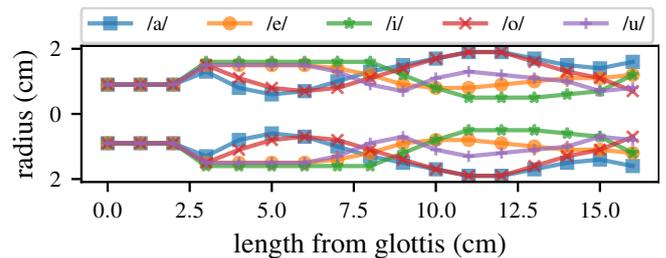


FIGURE 7 – Profils géométriques des maquettes de conduits vocaux représentant les voyelles /a/, /e/, /i/, /o/ et /u/.

Chaque maquette est fermée à la glotte par un bouchon (impression 3D). Leurs résonances sont caractérisées par le dispositif de mesure avec excitation aux lèvres (décrit en Sec. 2) avec un microphone placé à 10 cm de leur ouverture labiale. Ces mesures sont comparées aux résultats des modèles numériques obtenus pour chaque géométrie.

### 4.2 Résultats et limites

Les estimations modales des modèles numériques de la fonction transfert de la voix  $H_{voice}^{num}$  et de la mesure au lèvres  $H_{lips}^{num}$  ainsi que celles de la mesure aux lèvres expérimentale  $H_{lips}^{meas}$  sont comparées (voir Tab. 4), en moyennant les résultats sur les cinq résonances de chaque voyelle. Les différences intra-vocaliques (comportement de chaque résonance) ne sont pas explicitées ici. Un exemple des trois fonctions pour la maquette /i/ est donné Fig. 8.

Les moyennes des différences relatives entre les fréquences de résonance (et les facteurs de qualité) des

TABLEAU 4 – Moyenne des différences relatives des fréquences de résonance (en cents) et des facteurs de qualité (en pourcentage) entre modèles numériques et mesure, pour chaque configuration vocalique.

	$H_{lips}^{num} // H_{voice}^{num}$		$H_{lips}^{meas} // H_{lips}^{num}$	
	f (cents)	Q (%)	f (cents)	Q (%)
/a/	2.0	5.3	-32.8	-52.6
/e/	0.6	2.7	-21.7	-54.5
/i/	-0.4	0.1	-23.8	-42.5
/o/	0.2	0.8	-58.0	-58.0
/u/	0.1	0.2	-32.5	-60.2

modèles numériques  $H_{voice}^{num}$  et  $H_{lips}^{num}$  sont inférieures à 2 cents (et 5.3 % respectivement). La caractérisation modale du conduit vocal est donc possible et robuste en théorie avec une excitation aux lèvres sur les différentes voyelles.

Les fréquences de résonance des maquettes sont sous-estimées (58cents dans le pire cas : environ un quart de ton) avec la mesure aux lèvres  $H_{lips}^{meas}$  vis-à-vis du modèle numérique. Cette sous-estimation est probablement due à un modèle de rayonnement qui n'est pas adapté à la réalité des maquettes. Celles-ci ont un socle en couronne autour des lèvres d'environ 2 cm d'épaisseur (non représenté Fig. 7) nécessaire pour l'impression 3D. La prise en compte de cette géométrie dans l'impédance de rayonnement amènerait une correction de longueur plus grande, des fréquences de résonance plus basses, coïncidant davantage avec les mesures.

Les facteurs de qualité estimés par mesure sont inférieurs à ceux du modèle numérique (environ -50 %). Une cause possible de cet écart est la prise en compte d'un amortissement de type visco-thermiques sur paroi rigide dans le modèle numérique alors que les maquettes sont réalisées en impression 3D avec une porosité relativement importante.

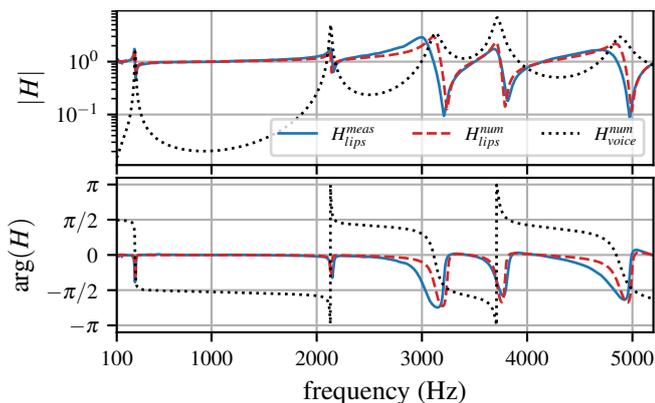


FIGURE 8 – Résultats des modèles numériques  $H_{voice}^{num}$ ,  $H_{lips}^{num}$  et de la mesure  $H_{lips}^{meas}$  pour la maquette /i/.

Si l'estimation modale fonctionne ici pour toutes les résonances, certaines sont peu marquées comme par exemple la première résonance de la maquette /i/ (voir Fig. 8). Dans le

cas d'une mesure bruitée, il serait alors difficile de la détecter et de la caractériser. La mesure et le modèle sont similaires sur ce point, ce qui montre que ce n'est pas tant une difficulté expérimentale (hormis la gestion du rapport signal sur bruit) qu'une limite en soi de la mesure avec excitation aux lèvres. Le modèle de mesure (Eq. 1) revient de fait à comparer l'impédance du conduit vu depuis les lèvres à son rayonnement. À basses fréquences, l'impédance de rayonnement est faible comparée à l'impédance du conduit, donc la méthode de mesure avec excitation aux lèvres ne peut aboutir qu'à une faible signature de la résonance. Ce problème est également relié à la proximité entre résonance et anti-résonance.

Une autre manière de visualiser cette limite est de modéliser les champs de pression dans le conduit en supposant un débit aux lèvres, comme si un microphone était déplacé dans le guide d'onde (voir Fig. 9). Le spectre sur le profil vertical à gauche correspond ainsi à la fonction de transfert du guide d'onde ( $H_{voice}$ ) par réciprocity, celui à droite correspond à l'impédance en parallèle aux lèvres qui peut s'écrire comme  $H_{lips} \cdot Z_R$  donc un équivalent de ce qu'on pourrait mesurer avec la méthode d'excitation aux lèvres. Il est intéressant de voir que si la proximité des zéros avec les résonances limite effectivement la mesure pour la première voire pour la deuxième résonance, un microphone placé à quelques centimètres à l'intérieur du conduit vocal pourrait lever cette limite.

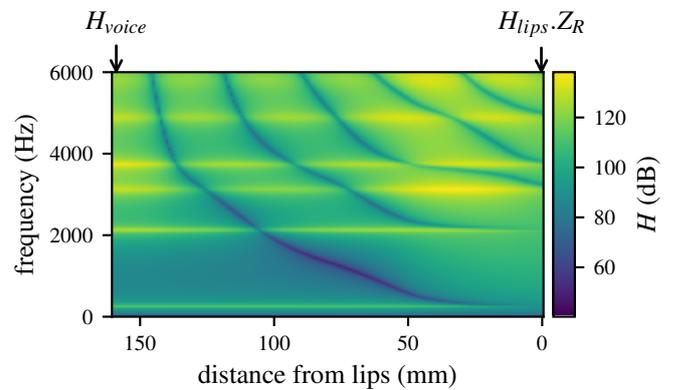


FIGURE 9 – Simulation du champ de pression interne avec une excitation aux lèvres (0) de la maquette /i/.

## 5 Conclusion et discussion

La méthodologie de la caractérisation des résonances du conduit vocal avec une excitation aux lèvres de type chirp a été détaillée. L'analyse modale exploitant à la fois l'amplitude et la phase (cercles de Kennelly) permet d'estimer fréquence mais aussi facteur de qualité des résonances asymétriques sur la réponse en fréquence exhibée du fait de la proximité de zéros, avec des résultats numériques comparable avec ceux de la fonction de transfert du conduit vocal.

Les résultats expérimentaux sur le positionnement du microphone montrent qu'il peut être placé à distance des lèvres. Si l'étude se concentre sur un mouvement horizontal du microphone, la calibration et la mesure sont toujours effectuées à la même position du microphone ce qui implique que le diagramme de rayonnement serait compensé dans toutes les positions. Le microphone peut donc en principe être placé à n'importe quelle distance. Cependant, la fonction de transfert est plus sensible au bruit ambiant lorsque la distance du microphone aux lèvres augmente. Pour réduire l'incertitude de mesure, toute autre source acoustique que l'excitation au niveau des lèvres doit être évitée ou limitée. Les interférences entre les différentes sources apparaîtraient comme du bruit ou des pics sur les mesures.

Un microphone peut être placé à une distance de 30 cm, comme le recommande l'Union des Phoniatries Européens [14] pour des mesures vocales, sans perte de précision si le rapport signal sur bruit est bon. Un placement à 10 cm semble être un bon compromis d'un point de vue pratique. Le dispositif pourrait également être basé sur un microphone serre-tête auquel un système d'excitation serait ajouté. Ces possibilités permettent d'améliorer le confort des participants et encouragent un geste vocal écologique, limitant le biais de la mesure.

Les modélisations et les mesures effectuées sur les maquettes de différentes configurations vocaliques mettent en évidence la robustesse de la méthode d'excitation aux lèvres tout en soulignant ses limites. Les écarts entre modèles et mesures sont majoritairement expliqués par les simplifications prises dans les modélisations numériques (impédance de rayonnement, pertes visco-thermiques) qui ne rendent pas compte du matériau et des géométries réelles des maquettes. Une autre caractérisation acoustique des maquettes pourrait servir de comparaison expérimentale, par exemple avec un capteur d'impédance.

L'analyse modale d'un guide d'ondes par la méthode d'excitation aux lèvres est limitée dans le cas où l'impédance de rayonnement est trop faible devant l'impédance d'entrée vue depuis les lèvres, se traduisant sur la mesure par une proximité entre zéros et résonances qui sont alors peu marquées. Cette limite a été mise en évidence pour les deux premières résonances de la maquette /i/ et la troisième résonance de la maquette /u/. L'utilisation de microphones intra-buccaux en gardant une excitation aux lèvres permettrait de lever cette limite et d'autant mieux caractériser l'acoustique du conduit vocal dans toutes les configurations vocaliques.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Patrick Hoyer pour l'idée originale du positionnement du microphone à distance et ses remarques sur l'étude, ainsi que Marc Pachebat pour ses précieux conseils sur l'analyse modale.

## Références

- [1] N. Henrich, J. Smith, et J. Wolfe. Vocal tract resonances in singing : Strategies used by sopranos, altos, tenors, and baritones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(2) :1024–1035, 2011.
- [2] I. Arroabarren et A. Carlosena. Inverse filtering in singing voice : A critical analysis. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 14(4) :1422–1431, 2006.
- [3] J. Epps, J. Smith, et J. Wolfe. A novel instrument to measure acoustic resonances of the vocal tract during phonation. *Measurement Science and Technology*, 8(10) :1112–1121, 1997.
- [4] B. Delvaux et D. Howard. Sinesweep-Based Method to Measure the Vocal Tract Resonances. Dans C. Manfredi, editor, *Proceedings of the 9th Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications*, volume 8, no10, pages 43–44, Firenze, Sept. 2015. Firenze University Press.
- [5] P. Hoyer et S. Graf. Adjustment of the Vocal Tract Shape via Biofeedback : A Case Study. *Journal of Voice*, 33(4) :482–489, 2019.
- [6] M. Kob et C. Neuschaefer-Rube. A method for measurement of the vocal tract impedance at the mouth. *Medical Engineering & Physics*, 24(7-8) :467–471, 2002.
- [7] T. Maison, F. Silva, C. Vergez, et N. H. Bernardoni. Measuring vocal-tract impedance at the lips : Model, hypotheses and limits. Dans *Proceedings of the 12th International Conference on Voice Physiology and Biomechanics*, page 48, Grenoble, France, Dec. 2020.
- [8] A. Novak, P. Lotton, et L. Simon. Synchronized Swept-Sine : Theory, Application, and Implementation. *Journal of the Audio Engineering Society*, 63(10) :786–798, 2015.
- [9] M. Rébillat, R. Hennequin, É. Corteel, et B. F. G. Katz. Identification of cascade of Hammerstein models for the description of nonlinearities in vibrating devices. *Journal of Sound and Vibration*, 330(5) :1018–1038, 2011.
- [10] A. Chaigne et J. Kergomard. *Acoustique Des Instruments de Musique*. Collection Echelles. Belin, 2008.
- [11] F. Silva, P. Guillemain, J. Kergomard, B. Mallaroni, et A. N. Norris. Approximation formulae for the acoustic radiation impedance of a cylindrical pipe. *Journal of Sound and Vibration*, 322(1-2) :255–263, 2009.
- [12] A. E. Kennelly et K. Kurokawa. Acoustic Impedance and Its Measurement. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 56(1) :3–42, 1921.
- [13] T. Arai. Education system in acoustics of speech production using physical models of the human vocal tract. *Acoustical Science and Technology*, 28(3) :190–201, 2007.
- [14] J. G. Švec et S. Granqvist. Guidelines for Selecting Microphones for Human Voice Production Research. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 19(4) :356–368, 2010.