HAL
open science

Etude théorique et expérimentale de l'influence d'une constriction sur le mouvement vibratoire des cordes vocales par application de modèles mécaniques

Lucie Bailly, Nicolas Ruty, Claire Brutel, Xavier Pelorson, Nathalie Henrich Bernardoni

To cite this version:

Lucie Bailly, Nicolas Ruty, Claire Brutel, Xavier Pelorson, Nathalie Henrich Bernardoni. Etude théorique et expérimentale de l'influence d'une constriction sur le mouvement vibratoire des cordes vocales par application de modèles mécaniques. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03360462

HAL Id: hal-03360462

https://hal.science/hal-03360462

Submitted on 30 Sep 2021

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.

Etude théorique et expérimentale de l'influence d'une constriction sur le mouvement vibratoire des cordes vocales par application de modèles mécaniques

Lucie Bailly, Nicolas Ruty, Claire Brutel, Xavier Pelorson & Nathalie Henrich

ICP, Département Parole et Cognition de GIPSA-lab
46, avenue Félix Viallet, 38 031 Grenoble Cedex 1, France
Lucie.Bailly@icp.inpg.fr

Résumé :

Nous présentons une modélisation théorique visant à quantifier la perturbation aérodynamique induite par une constriction du conduit vocal sur la vibration des cordes vocales. Nous simulons le comportement mécanique des cordes vocales par un modèle distribué tenant compte de cette perturbation. L'étude est menée suivant deux approches : une approche statique pour estimer, par une analyse linéaire de stabilité du système, le déplacement des seuils d'oscillation des cordes vocales du fait de la présence d'une constriction en aval; une approche dynamique pour estimer en amplitude et en phase l'influence de la constriction sur l'évolution temporelle des oscillations des cordes vocales. Un banc expérimental 'in-vitro' comprenant une maquette auto-oscillante des cordes vocales à laquelle est adjointe en aval soit une constriction statique, soit une constriction oscillante est utilisée. L'influence de ces structures avales est alors mesurée et comparée aux prédictions théoriques.

Abstract :

We present a theoretical modelling to quantify the aerodynamic impact involved by a constriction located in the vocal tract on the vocal folds oscillations. We simulate the mechanical behaviour of the vocal folds by a distributed model accounting for this impact. The work is divided in two steps: a static study aiming at estimating the impact on the phonation threshold pressures of the vocal folds due to the constriction, by applying a linear stability analysis to the mechanical model; a dynamic study aiming at estimating the influence of the constriction on the evolution of the glottal oscillations with time, in terms of phase and amplitude. An 'in-vitro' experimental set-up consisting of a self-oscillating vocal-folds replica and a downstream static constriction or a downstream oscillating constriction is used. The influence of these downstream structures are then measured and compared to the model outcome.

Mots-clefs : cordes vocales ; constriction ; maquette in-vitro

1 Introduction

L'étude de l'influence physique d'une constriction dans le conduit vocal est principalement motivée par deux axes de recherche dans la modélisation de la production de parole humaine : le rôle joué par les « fausses » cordes vocales, ou bandes ventriculaires (*cf.* FIG 1a.), en phonation pathologique (Pinho *et al.* (1999)) ou en voix chantée (Fuks *et al.* (1998)); la réalisation des consonnes plosives non voisées, comme celle du son [p] nécessitant une occlusion du conduit vocal au niveau des lèvres (*cf.* FIG 1b.).

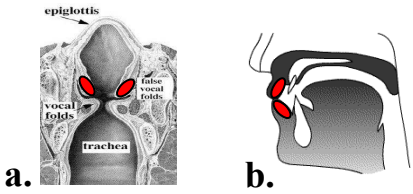

FIG. 1 – **a.** Coupe frontale du larynx (« fausses » cordes vocales colorées); **b.** Coupe sagittale des articulateurs supra laryngés lors de la production d'une consonne bilabiale (lèvres colorées).

Quelle perturbation physique une constriction en aval de la glotte induit-elle sur l'oscillation des cordes vocales ? L'hypothèse d'une conduction mécanique par propagation d'ondes de Rayleigh a été analysée par Tsai *et al.* (2004). D'autres études menées sur des maquettes rigides du larynx (Agarwal *et al.* (2004), Pelorson *et al.* (1995)) se sont attachées à la description des phénomènes aérodynamiques engendrés par la présence de la constriction dans le conduit vocal. Agarwal *et al.* (2004) a observé une diminution de la chute de pression dans le conduit laryngé. Pelorson *et al.* (1995) a constaté un recouvrement de pression significatif associé au rattachement du jet aux parois de la constriction.

Faisant suite aux travaux présentés dans Bailly *et al.* (2006), ce papier explore l'impact acoustique et aérodynamique généré sur la vibration glottique, en utilisant une maquette de cordes vocales capable de produire des oscillations auto-entretenues à laquelle est adjointe en aval une constriction rigide statique ou oscillante. Les paramètres de contrôles de cette étude sont la hauteur de constriction et sa position dans le conduit vocal. L'influence de ces structures avales est évaluée quantitativement grâce à des mesures de pression et comparée aux prédictions théoriques de modèles physiques de phonation.

2 Modélisation théorique

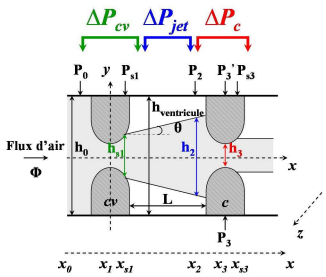

FIG. 2 – Géométrie du conduit vocal (***cv***: cordes vocales, ***c***: constriction).

2.1 Modèle d'écoulement d'air

La distribution de pression à travers le larynx est décrite dans l'approximation d'un écoulement laminaire, unidimensionnel, incompressible, quasi-stationnaire, divisé en trois sous-systèmes couplés (*cf.* FIG 2) :

- la chute de pression à la glotte: ΔP_{cv},
- le jet d'air plan confiné entre les cordes vocales et la constriction, caractérisé par une dissipation d'énergie cinétique: ΔP_{jet},
- la chute de pression à la constriction: ΔP_c.

La chute de pression totale ΔP_{tot} régissant la dynamique de l'écoulement d'air le long du conduit vocal est donc estimée par :

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{cv} + \Delta P_{jet} + \Delta P_c \tag{1}$$

Les chutes de pression ΔP_{cv} et ΔP_c sont évaluées à partir de la loi de Bernoulli combinée à un modèle de séparation basé sur le critère ad-hoc de 'Liljencrants'. Dans le cadre de cette étude, on suppose que P_{s3}=0, ΔP_{jet}=0 et que le jet suit une évolution géométrique linéaire selon *x,* de pente tan 4°. Le détail des estimations théoriques est rapporté dans Bailly *et al.* (2006).

La modélisation suppose une pression P_0 en amont de la maquette contrôlée par l'expérimentateur, et à ce titre, parfaitement déterminée. Elle permet une estimation théorique de h_{s1}, h_{s3} et Φ, dont découlent les prédictions de P_{s1}, P_2 et P_3.

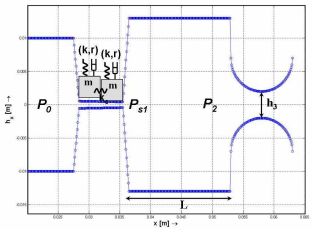

FIG. 3 – Modèle à deux masses combiné à une constriction avale

2.2 Modèle des auto-oscillations des cordes vocales

Les propriétés mécaniques des cordes vocales sont simulées par une variation du modèle à deux masses symétrique proposé par Ruty *et al.* (2007). Le mouvement des cordes vocales est contrôlé par des paramètres mécaniques de masse (m), de raideur (k, k_c) et d'amortissement (r) (*cf.* FIG 3).

Le modèle d'écoulement est estimé suivant les descriptions de fluide parfait et de séparation exposées au 2.1. La pression en sortie des cordes vocales, communément approchée par la pression atmosphérique, est remplacée par l'estimation de P_{s1} à la séparation glottique. Ainsi, le modèle aérodynamique quantifie le recouvrement de pression induit par la constriction.

L'influence du résonateur acoustique de longueur L cm séparant les cordes vocales de la constriction est prise en compte suivant la modélisation détaillée dans Ruty *et al.* (2007).

3 Dispositif expérimental

3.1 Réplique du larynx

Le dispositif expérimental comprend une maquette déformable des cordes vocales à l'échelle 3 :1 (*cf.* FIG 4a.) à laquelle est adjointe une constriction de géométrie ajustable (Bailly *et al.* (2006)). Cette constriction reste statique dans un premier temps, à L (*cf.* FIG 4b.) et h_3 (*cf.* FIG 4c.) fixés, puis entre en oscillations forcées via l'utilisation d'un moteur à excentrique permettant un contrôle de l'amplitude de la vibration. La tension appliquée permet un contrôle de la vitesse. La fréquence d'oscillation maximale autorisée par le moteur s'élève à 30Hz.

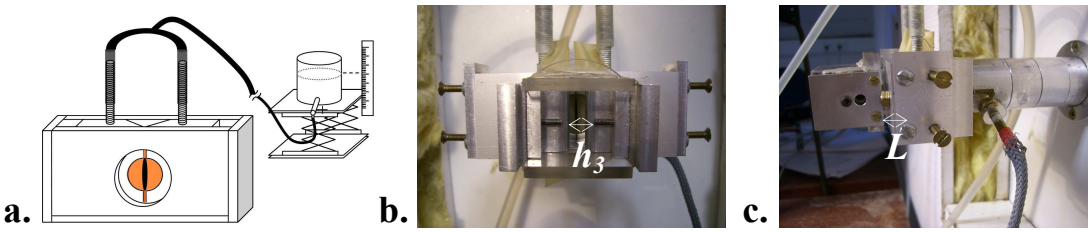

FIG. 4 – **a.** Schéma de la réplique auto-oscillante des cordes vocales; **b.**Vue de face de la réplique du larynx; **c.** Vue de profil de la réplique du larynx.

L'espace séparant les cordes vocales de la constriction est représenté par un tube cylindrique de section uniforme ($h_{ventricle}$=26mm) et de longueur L variable. Les mesures sont effectuées pour différentes configurations géométriques, avec h_3 variant de 0.35mm à 25mm pour la série de mesures statiques et h_3 oscillant entre 0.035mm et 0.96mm puis entre 1.70mm et 2.50mm pour les mesures en régime d'oscillations forcées. L prend les valeurs 19mm/150mm pour l'étude statique et est fixé à 150mm pour l'étude dynamique. Le choix de ces longueurs (19mm/150mm) décrit deux réalités physiologiques distinctes, correspondant respectivement à l'étude des fausses cordes vocales et celle des consonnes non voisées. Leurs analyses présentent tout leur intérêt en confrontation l'une avec l'autre pour mieux appréhender la différence des phénomènes physiques impliqués dans chaque configuration.

3.2 Procédure

La maquette est alimentée par un flux d'air à débit contrôlé, Φ, provenant d'un réservoir de pression alimenté par un compresseur. Le volume du réservoir assure une pression P_0 constante à l'entrée de la maquette des cordes vocales. Un système de capteurs de pression (Kulite XCS-0.93-0.35-Bar-G) permet de mesurer la pression d'écoulement et la modulation acoustique en amont des cordes vocales (P_0), entre les cordes vocales et la constriction (P_2), et à la hauteur de constriction minimale (P_3). Les capteurs sont disposés aux endroits spécifiés sur la figure 2.

Un système optique détaillé dans Ruty *et al.* (2007), constitué d'un faisceau laser aligné avec une photodiode, permet de quantifier l'accolement minimal de la maquette de cordes vocales pendant l'oscillation, soit $min(\, h_1(y, t))$. L'oscillation de la constriction est enregistrée.

La réponse mécanique de la maquette déformable de cordes vocales est obtenue selon un protocole expérimental exposé dans Ruty *et al.* (2007). Les résonances et facteurs de qualité extraits sont directement reliés aux paramètres d'entrée mécaniques du modèle à deux masses.

4 Résultats et discussion

L'objectif de cette étude est de quantifier la perturbation induite par la constriction sur le mouvement vibratoire des cordes vocales, en comparant les données expérimentales aux prédictions théoriques. Ces données correspondent concrètement aux mesures de pression P_0, P_2, P_3, aux signaux des ouvertures h_1, h_3, aux pressions de seuils d'oscillation des cordes vocales P_{seuils} et à leurs fréquences fondamentales F_0 de vibration. Les résultats ci-dessous représentent l'influence sur ces signaux d'une constriction statique puis oscillante.

4.1 Constriction statique

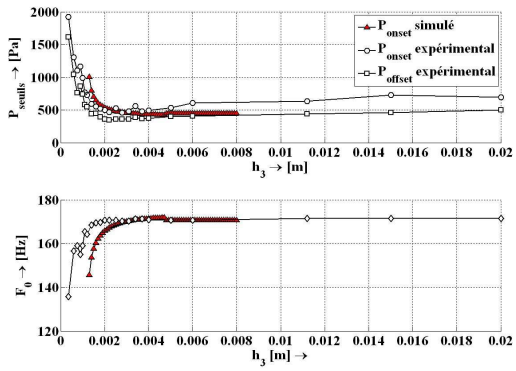

FIG. 6 – Pressions de seuils d'oscillation et fréquences mesurées comparées aux simulations théoriques correspondantes pour 0.35mm ≤ h_3 ≤ 25mm, L = 19mm.

La figure 6 illustre l'évolution de P_{seuils} et F_0 mesurées pour L = 19mm en fonction de h_3. L'ouverture glottique h_1 est ici maintenue à environ 0.95mm au repos. La détection de P_{seuils} et de F_0 s'effectue sur le signal de pression P_0 par auto-corrélation et seuillage.

L'influence de h_3 sur P_{seuils} et F_0 est divisée en trois zones exposées dans Bailly *et al.* (2006) : une zone où la constriction n'induit aucun effet sur le comportement vibratoire des cordes vocales; une zone où P_{seuils} est détecté plus bas que dans la configuration sans constriction, suggérant des oscillations favorisées; une zone où P_{seuils} augmente et F_0 diminue, montrant des oscillations gênées puis stoppées.

Ces résultats expérimentaux sont comparés aux prédictions théoriques du modèle à deux masses exposé au 2.2 (*cf.* FIG 6). Les valeurs des paramètres de raideur et d'amortissement se déduisent directement de la réponse mécanique effectuée sur la maquette de cordes vocales ; le paramètre de masse est multiplié d'un facteur 5 par rapport à l'estimation dérivée de la réponse mécanique, afin d'obtenir une valeur proche des paramètres usuels du modèle à deux masses. Les prédictions de P_{seuils} et F_0 sont effectuées grâce à une analyse linéaire de stabilité du modèle mécanique, tenant compte de l'interaction aérodynamique avec la constriction (Ruty *et al.* (2007)). On constate que les prédictions s'accordent globalement avec les données expérimentales de manière quantitative en illustrant les trois zones d'influence selon h_3.

4.2 Constriction oscillante

Les exemples présentés ici illustrent environ deux périodes d'oscillation de la constriction pour L=150mm, h_3 oscillant de façon sinusoïdale entre 0.035mm et 0.96mm avec une fréquence de 1.30Hz et h_1 fixée à 1.53mm au repos (*cf.* FIG 7). La fréquence d'oscillation de la constriction est choisie parmi celles reproduisant des transitions voyelle/plosive/voyelle stabilisées. Une fréquence trop élevée induit une interruption du débit telle que les oscillations glottiques ne peuvent s'installer entre deux cycles d'oscillation de la constriction.

La figure 7 montre que la pression P_2 augmente avec la sévérité de la constriction : la chute de pression, $\Delta P_{cv} = P_0 - P_2$, mesurée aux cordes vocales diminue donc, altérant en conséquence l'oscillation des cordes vocales jusqu'à leur extinction. L'arrêt de la modulation acoustique de l'écoulement ne s'effectue pas de manière synchrone sur les signaux P_0, P_2 et P_3, caractérisant les effets d'inertie dans le fluide. La pression P_3 mesurée négative traduit un « effet Bernoulli » à la constriction. Le sonogramme de la figure 7 indique une baisse de la fréquence fondamentale et des harmoniques à l'extinction des oscillations, déjà observée dans l'étude statique au 4.1.

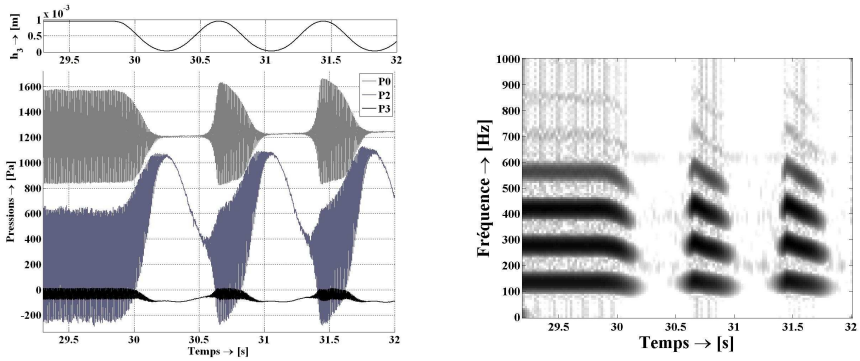

FIG. 7 – Evolutions temporelles de h_3, P_0, P_2, P_3 mesurées pour L=150mm et sonogramme de P_0.

Nous nous attachons dans la suite à quantifier le recouvrement de pression P_2 et la pression au col de la constriction P_3 observés sur cette séquence. Nous nécessitons pour cela d'une estimation de l'ouverture à la glotte h_1. Les mesures optiques acquises grâce à la photodiode pour quantifier h_1 combinent les mouvements oscillants des cordes vocales et de la constriction, ce qui les rend inexploitables dans cette configuration. Nous proposons donc de simuler le comportement vibratoire des cordes vocales en présence d'une constriction avale en estimant h_1 par le modèle à deux masses, puis d'en déduire les estimations théoriques de P_2 et P_3. Quels paramètres mécaniques choisir pour simuler le comportement des cordes vocales via ce modèle?

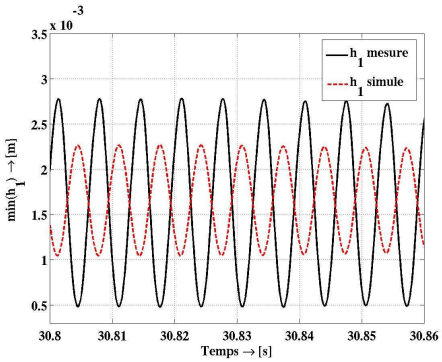

FIG. 8 – Evolution temporelle de h_1 mesurée sans constriction avale et signal théorique.

La seule mesure optique viable correspond au cas de référence sans constriction. La fréquence des oscillations de référence mesurées valant F_0=152Hz, nous choisissons, pour une masse de corde vocale estimée à m=0.17g, une constante de raideur k de l'ordre de $(2\pi F_0)^2 m/2$, soit environ 77N.m^{-1}. La constante d'amortissement r est choisie de sorte que le modèle simule une estimation de h_1 la plus proche possible en amplitude de l'ouverture mesurée dans la configuration de référence. Sous ces conditions, le modèle à deux masses fournit une estimation quantitative satisfaisante de la fréquence mesurée, à défaut d'un calage en amplitude et en phase de la vibration (*cf.* FIG 8).

La pression P_0 mesurée expérimentalement est choisie comme pression d'alimentation du modèle. La figure 9 présente les simulations de P_2 et P_3 ainsi obtenues, confrontées aux données mesurées. On constate que ces estimations reproduisent qualitativement les fluctuations du recouvrement de pression et l'effet Bernoulli à la constriction. Le démarrage et l'extinction des oscillations mesurées et estimées concordent également. Néanmoins, le modèle surestime le recouvrement de pression, ainsi que la chute de pression ΔP_c. Cet écart découle de la succession

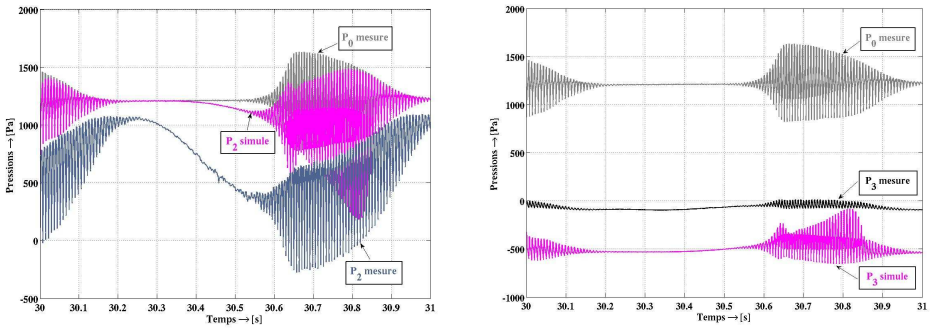

FIG. 9 – Evolutions temporelles de P_0, P_2, P_3 par la mesure et estimations théoriques de P_2, P_3.

d'approximations théoriques effectuées dans le modèle mécanique et dans le modèle d'écoulement qui néglige la dissipation d'énergie par turbulence dans le développement du jet.

5 Conclusions

Un modèle physique de phonation tenant compte de l'impact, sur la distribution de pression, de la hauteur d'une constriction et de sa situation dans le conduit vocal a été proposé. Cette théorie a été intégrée dans un modèle à deux masses pour quantifier l'influence sur l'oscillation des cordes vocales. Un banc expérimental comprenant un oscillateur auto-entretenu couplé à une constriction statique ou oscillante a permis la validation de ce modèle.

Les résultats avec une constriction statique montrent par la mesure et par une analyse de stabilité du modèle mécanique les modifications engendrées sur la vibration glottique, altérant ou favorisant les auto-oscillations selon la configuration géométrique.

Les résultats avec une constriction oscillante montrent une interaction forte entre la constriction et les cordes vocales dans une étude expérimentale reproduisant des transitions voyelle/plosive/voyelle. La théorie concorde qualitativement avec la mesure du recouvrement de pression induit par la constriction. L'écart quantitatif entre la théorie et l'expérience montre l'importance pour la suite d'une meilleure estimation des pertes dissipatives dans le jet.

Références

Agarwal M., Scherer R.C. &.D.W. 2004 The effects of the false vocal folds on translaryngeal airflow resistance. Proc. ICVPB.

Bailly L., Ruty N., Van Hirtum A., Cisonni J., Pelorson X. & Henrich N. 2006 Aerodynamic interaction between the vocal folds and the ventricular bands. 7th International Conference Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research.

Fuks L., Hammarberg B. & Sundberg J. 1998 A self-sustained vocal-ventricular phonation mode: Acoustical, aerodynamic and glottographic evidences. KTH TMH-QPSR. 3, 49-59

Pelorson X., Liljencrants J. & Kroeger B. 1995 On the aeroacoustics of voiced sound production. 15th International Congress on Acoustics.

Pinho, S.M.R., Pontes P.A.L., Gadelha M.E.C. & Biasi N. 1999 Vestibular vocal fold behaviour during phonation in unilateral vocal fold paralysis. Journal of Voice. 13, 36-42

Ruty N., Pelorson X., Van Hirtum A., Lopez-Arteaga I. & Hirschberg A. 2007 An 'in-vitro' setup to test the relevance and the accuracy of low-order vocal folds models. Journal of the Acoustical Society of America. 121(1), 479-490

Tsai C., Shau Y. & Hsiao T 2004 False vocal fold surface waves during Sygyt singing: A hypothesis. Proc. ICVPB.