

Etude expérimentale de l'écoulement d'air au travers de glottes asymétriques

X. Pelorson et J. Haas

GIPSA-lab UMR 5216, 11 rue des mathématiques, BP 46, 38402 Saint-Martin-D'Hères, France
xavier.pelorson@gipsa-lab.fr

Les théories actuellement utilisées en modélisation de la phonation supposent un écoulement symétrique au travers de cordes vocales également symétriques (du point de vue mécanique et géométrique). Certains auteurs, sur la base de simulations numériques ou de mesures sur maquettes, rapportent cependant la présence d'un écoulement asymétrique ceci même pour une glotte à géométrie symétrique. D'autre part, les cordes vocales humaines ne sont jamais parfaitement identiques et peuvent même présenter, dans le cas de pathologies, une asymétrie considérable. Ce travail évalue, sur la base de mesures systématiques sur des maquettes de cordes vocales, l'importance quantitative de ces effets. Des mesures en régime stationnaire puis instationnaire sur des cordes vocales statiques mais présentant une asymétrie géométrique sont tout d'abord présentées et discutées. L'effet d'une asymétrie mécanique est ensuite simulé au moyen d'une maquette auto-oscillante dont l'élasticité de chaque corde vocale peut être contrôlée de manière indépendante.

1 Introduction

Pour produire des sons voisés l'être humain dispose de deux cordes vocales, ou plis vocaux, qui, sous l'action de l'écoulement d'air provenant des poumons peuvent entrer en auto-oscillation. Les observations cliniques rapportent fréquemment que les cordes vocales ne vibrent pas toujours de manière strictement symétrique. Cet effet est encore plus évident dans le cas de certaines pathologies de la voix où il peut même être observé des phénomènes de dédoublement de fréquence, chaque corde vocale vibrant à une fréquence différente de l'autre (par exemple [1]). L'origine de ce comportement asymétrique peut être varié, lié par exemple à une affection interne d'une corde vocale, à la présence d'une masse supplémentaire (kyste, polype ...), à une rigidité locale ou étendue... Les conséquences sur la production vont de la gêne à l'aphonie en passant par des irrégularités de fréquence fondamentale ou d'intensité souvent reliés à une voix qualifiée de rauque.

La modélisation physique de ces phénomènes est très difficile du fait de la complexité des interactions entre l'écoulement d'air et les structures élastiques des cordes vocales. Les travaux de Steinecke et al. [2], par exemple, tentent de simuler l'effet d'une asymétrie mécanique entre les deux cordes vocales au moyen d'un modèle mécanique simple. Les simulations obtenues présentent des configurations pour lesquelles les deux cordes vocales ne sont plus en phase, la glotte formant alors un canal asymétrique. Cependant, il est implicitement supposé que l'écoulement d'air n'est pas affecté par ce changement de géométrie, ce qui est une hypothèse forte. De la même manière, des efforts importants portent sur la modélisation d'écoulements asymétriques [3], [4], [5] mais l'impact de cette asymétrie sur la dynamique des tissus et donc sur la production de son reste encore mal connue.

Dans cette communication, nous cherchons à évaluer l'importance d'asymétries en découplant l'interaction fluide-structure. Ainsi, en utilisant des maquettes de cordes vocales rigides l'influence d'une géométrie asymétrique sur l'écoulement peut être quantifiée. Dans une seconde expérience, c'est l'élasticité de cordes vocales cylindriques qui sera affectée. L'objectif est d'obtenir des données quantitatives fiables destinées à valider un modèle théorique complet de la phonation normale et pathologique.

2 Effet d'une asymétrie géométrique

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'effet d'une asymétrie géométrique de la glotte. Le banc expérimental comprend un réservoir de pression auquel est connecté un tube cylindrique (diamètre intérieur 2.5 cm) au bout duquel se trouve placée une maquette de cordes vocales. Celle ci,

illustré sur la figure 1, est composée de deux cordes vocales rigides réalisées en Dural et présentant un profil divergent. Le rayon de courbure de l'entrée est 0.5 cm.

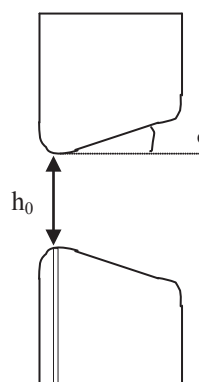


Figure 1. Maquette de cordes vocales rigide

Deux paramètres peuvent être variés: l'écartement, h_0 , entre les deux cordes vocales et l'angle de divergence, α qui peut varier de 0° à 30° . L'alimentation en pression est assurée par un compresseur et est contrôlée par une vanne manuelle. La pression d'alimentation est fixée à 800 Pa.

En associant deux maquettes de cordes vocales d'angles différents on peut ainsi imposer une asymétrie géométrique à l'écoulement. L'effet de cette asymétrie est mesuré au moyen de capteurs de pression (Kulite XCS093) disposé à l'intérieur de chaque corde vocale en son point de constriction minimum. Les capteurs de pression sont calibrés au moyen d'un manomètre à colonne de liquide avec une précision de ± 0.5 Pa.

Les figures 2 et 3 présentent deux exemples typiques de résultats obtenus. Le premier correspond à une géométrie asymétrique, l'angle de divergence de chaque corde vocale étant respectivement de 10° et de 20° . Le second exemple correspond à une géométrie symétrique chaque corde vocale ayant le même angle de divergence, $\alpha = 10^\circ$. Dans les deux cas l'écart entre les cordes vocales est $h_0 = 0.7$ mm.

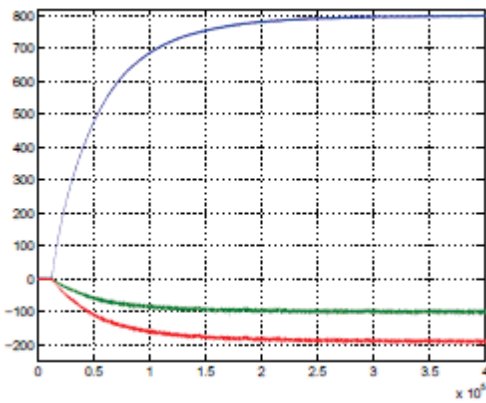


Figure 2: mesures de pression en fonction du temps, sur une maquette de cordes vocales asymétrique ($10^\circ, 20^\circ$). Courbe bleue: pression imposée, courbes verte et rouge: pression mesurée à l'intérieur de chaque corde vocale.

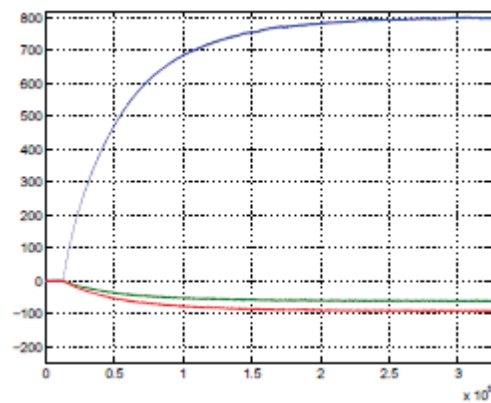


Figure 3: mesures de pression en fonction du temps, sur une maquette de cordes vocales symétrique ($10^\circ, 10^\circ$). Courbe bleue: pression imposée, courbes verte et rouge: pression mesurée à l'intérieur de chaque corde vocale

On constate que même pour une configuration symétrique un écoulement asymétrique est observé. Ce phénomène, appelé l'effet Coanda, est discuté en détail dans [3] et [4] et est illustré sur la figure 4.

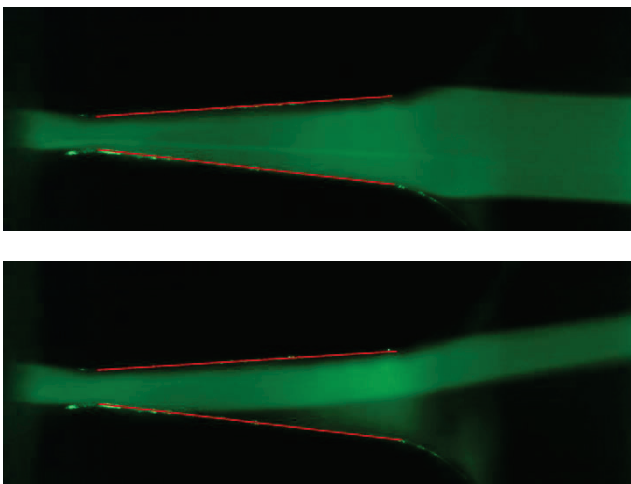


Figure 4: Visualisation par injection de fumée de l'écoulement au travers d'une maquette symétrique de cordes vocales. Photo du haut : écoulement sous faible pression, photo du bas écoulement à pression élevée et apparition d'une asymétrie de l'écoulement (effet Coanda).

L'ensemble des résultats obtenus est synthétisé sur la figure 5 où l'on représente l'écart moyen entre la pression mesurée dans chaque corde vocale, normalisée par la pression d'alimentation, en fonction de l'écartement des cordes vocales et de la configuration géométrique.

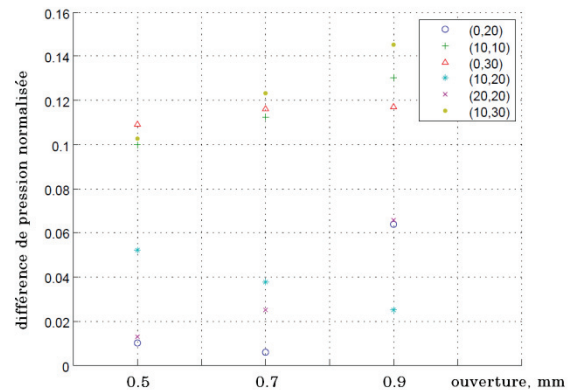


Figure 5. différence de pression entre chaque corde vocale normalisée en fonction de l'ouverture de la maquette et pour différentes configurations géométriques.

Les résultats obtenus montrent que la différence de pression mesurée peut atteindre 15 % de la pression ce qui est considérable. Cette différence de pression est une fonction sensible de l'ouverture et de la configuration géométrique. On peut noter que pour un angle total de divergence donné, les résultats diffèrent selon que la configuration géométrique est symétrique ou non. Il semble donc bien y avoir un effet lié à l'asymétrie.

Les résultats comprenant un angle $\alpha = 0^\circ$ sont à considérer avec précaution. Une visualisation de l'écoulement par injection de fumée met en effet en évidence un phénomène complexe possiblement lié à la présence d'une arête vive à l'extrémité de la maquette. Ce phénomène est illustré sur la figure 6.

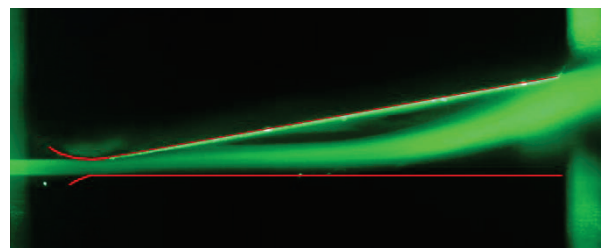


Figure 6. Visualisation de l'écoulement au travers d'une maquette de glotte asymétrique ($0^\circ, 10^\circ$).

3 Effet d'une asymétrie mécanique

3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est décrit sur la figure 7. Il comprend un réservoir de pression alimenté par un compresseur auquel est connecté la maquette de cordes vocales via un tube cylindrique de section constante. Un second tube cylindrique, simulant le conduit vocal, est disposé en aval de la maquette.

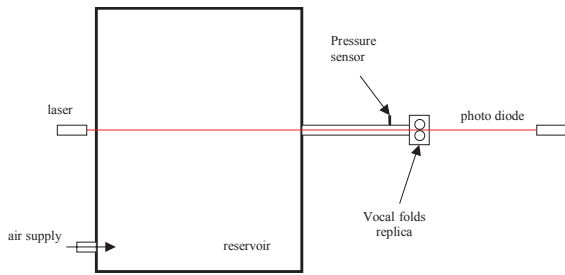


Figure 7: Dispositif expérimental utilisé pour les mesures en régime dynamique.

Un faisceau laser traverse le réservoir de pression et la maquette de cordes vocales. L'intensité du faisceau laser est mesurée par une photodiode. Après calibration, en utilisant des fentes de dimensions connues, ce système permet la mesure de l'écartement entre les cordes vocales avec une précision de l'ordre de +/- 0.01 mm.

La maquette de cordes vocales utilisée est décrite dans [6]. Elle comprend deux cylindres en latex, simulant chaque corde vocale, remplis d'eau sous pression. En faisant varier la pression d'eau dans l'un ou l'autre corde vocale on peut ainsi en modifier l'élasticité. Par la suite, on notera Q le facteur d'asymétrie défini comme le rapport entre la pression d'eau dans chaque corde vocale. La valeur $Q = 1$ correspond donc à une configuration mécaniquement symétrique, les deux cordes vocales étant soumises à la même pression d'eau. Un tube en latex inséré entre les cordes vocales connecte la section amont et aval du dispositif.

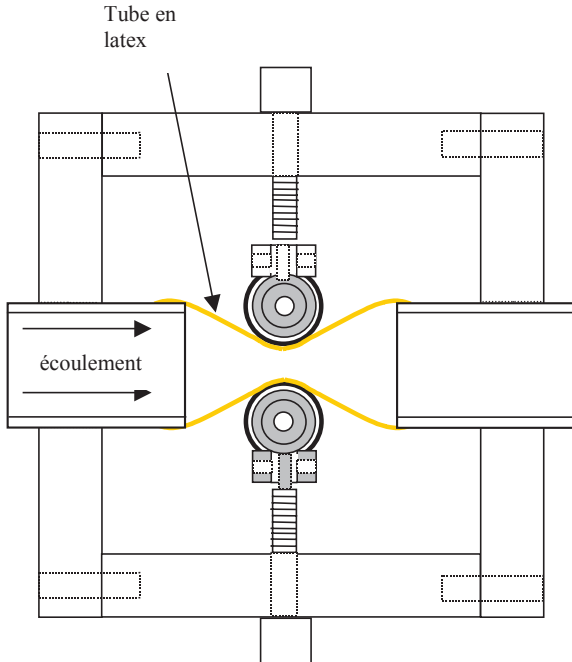


Figure 8: maquette auto-oscillante des cordes vocales. Vue de profil.

Au moyen de vis micrométriques disposées à chaque extrémités des deux plis vocaux on peut contrôler de manière précise l'écartement entre les deux cordes vocales. Afin de s'affranchir de ce paramètre, celui-ci sera en effet maintenu constant durant toutes les expériences.

3.2 Pressions de seuil

Les pressions de seuil d'oscillation et les fréquences fondamentales associées sont présentées sur la figure 9.

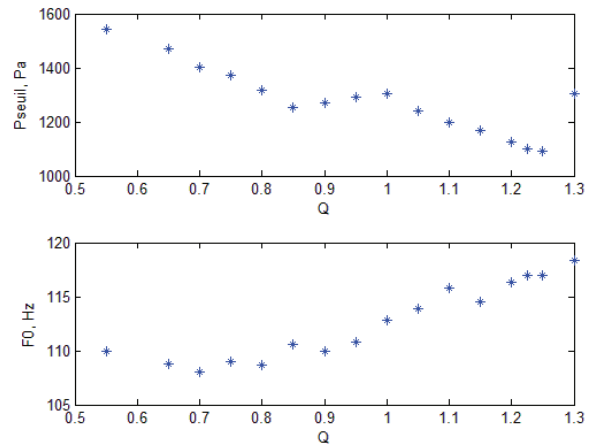


Figure 9: pression de seuil, en haut, et fréquence fondamentale de vibration, en bas, en fonction du paramètre d'asymétrie, Q .

Tels quels ces résultats sont difficiles à analyser puisqu'en variant la pression d'eau dans l'une des répliques de cordes vocales, on affecte également l'élasticité de l'ensemble de la maquette. Afin d'évaluer l'effet de l'asymétrie par rapport à celui de la variation d'élasticité, nous comparons sur la figure 10 les résultats obtenus à ceux mesurés en faisant varier conjointement la pression d'eau dans les deux cordes vocales artificielles. Les deux séries de mesures provenant de deux maquettes qui n'étaient pas parfaitement identiques, nous avons, par soucis de lisibilité, normalisé les résultats par rapport à la position de référence correspondant à $Q = 1$.

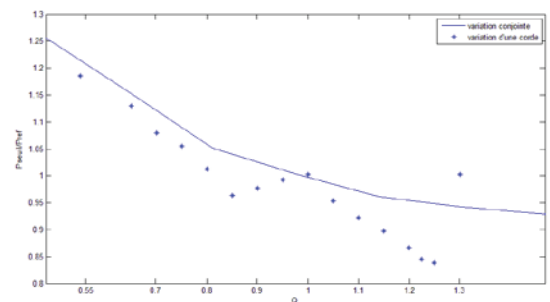


Figure 10 : Symboles : pression de seuil d'oscillation en fonction du facteur d'asymétrie et trait plein : résultats obtenus en faisant varier la pression d'eau conjointement dans les deux cordes vocales.

S'il apparait donc que pour les asymétries $Q < 1$, l'effet observé semble essentiellement gouverné par la variation d'élasticité globale. Au delà, un effet de l'asymétrie mécanique devient plus important..

3.4 Analyse dynamique

L'analyse des signaux a également été réalisée dans le domaine temporel au moyen du logiciel Praat [7].

L'analyse est réalisée sur une durée d'environ une seconde pour une pression d'alimentation supérieure à 10 % de la pression de seuil d'oscillation. Paramètres importants de la stabilité de la voix le jitter local et le shimmer sont calculés [8]. Ces deux quantités mesurent respectivement les fluctuations, exprimées en %, cycle à cycle de la fréquence fondamentale et de l'amplitude du signal. Les figures 11 et 12 présentent les valeurs calculées en fonction du facteur d'asymétrie, Q .

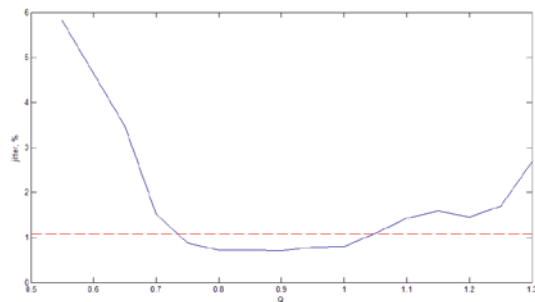


Figure 11: Evolution du jitter en fonction du paramètre d'asymétrie, Q . La ligne en tiret correspond à la valeur seuil pathologique.

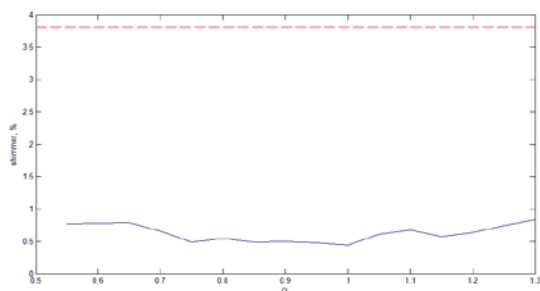


Figure 12: Evolution du shimmer en fonction du paramètre d'asymétrie, Q . La ligne en tiret correspond à la valeur seuil pathologique.

Comme on pouvait s'y attendre, une augmentation de l'asymétrie conduit à une augmentation du jitter et, dans une moindre mesure, du shimmer. De manière plus précise, jitter et shimmer varient peu dans la zone $0.75 < Q < 1$ puis augmentent très rapidement au delà. Même si elles doivent être utilisées avec prudence [9], les valeurs seuils de comportement pathologiques, matérialisées par les lignes en tirets sur les figures 11 et 12, sont respectivement de 1.04 % pour le jitter et 3.84 % pour le shimmer. Si ces valeurs sont dépassées dans le cas du jitter, elles restent bien en deçà dans le cas du shimmer. Ce résultat n'est pas surprenant car ce paramètre est essentiellement influencé par le contrôle du souffle qui, dans le cas de la maquette, est régulé par un compresseur.

Enfin, l'apparition d'un second régime d'oscillation a pu être observée pour les fortes asymétries. Un exemple est présenté sur les figures 13 et 14 dans le cas d'un facteur d'asymétrie $Q = 1.3$.

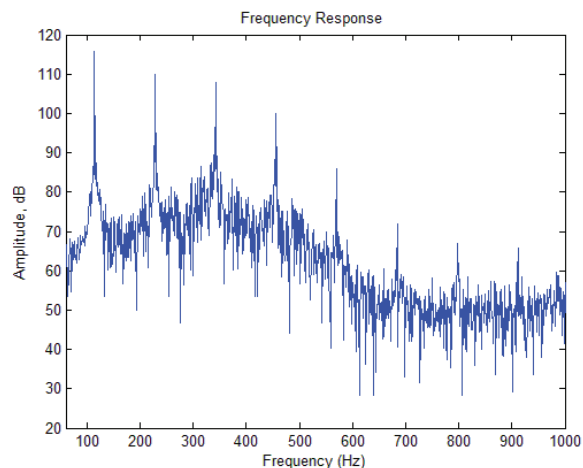


Figure 13. Spectre mesuré pour un facteur d'asymétrie $Q = 1.3$ et une pression d'alimentation supérieure à 10 % de la pression de seuil.

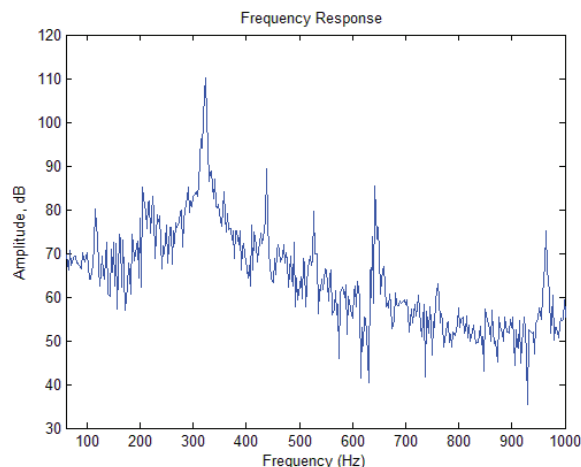


Figure 14. Spectre mesuré pour un facteur d'asymétrie $Q = 1.3$ et une pression d'alimentation supérieure à 20 % de la pression de seuil.

4. Conclusions

Dans cette étude nous avons essayé d'isoler puis de quantifier les effets de deux types d'asymétries pouvant intervenir lors de la production de sons voisés.

Une asymétrie géométrique conduit à une différence mesurable sur la pression intra-glottique. De même que pour l'effet Coanda, l'impact de cette perturbation sur l'auto-oscillation des cordes vocales et sur la perception des sons produits reste à démontrer.

L'asymétrie mécanique conduit à des perturbations qui sont détectables sur les seuils d'oscillation mais qui ont surtout un fort impact sur la stabilité du signal généré. Ceci s'illustre par l'apparition d'un second régime d'oscillation ou une fluctuation importante de la fréquence fondamentale pour les asymétries les plus importantes.

Références

- [1] Woodson G.E. Configuration of the glottis in laryngeal paralysis. i . clinical study. *Laryngoscope*, 103, 1227-1234, (1993).

- [2] Steinecke I. and Herzel H. Bifurcations in an asymmetric al vocal fold model. The Journal of the Acoustical Society of America, 97, 1874-1884, (1995)
- [3] B. D. Erath and S. D. Peterson and M. Zanartu and G. R. Wodicka and K. C. Stewart and M. W. Plesniak, Response to Comments on "A theoretical model of the pressure field arising from asymmetric intraglottal flows applied to a two-mass model of the vocal folds"[J.Acoust.Soc.Am.130,389-403(2011)]
J.Acoust.Soc.Am. 134, 913-916(2013).
- [4] J. Haas, X. Pelorson, A.Hirschberg, "The Coanda effect and asymmetries in vocal fold models during phonation", Congrès Français d'Acoustique 2014, Poitiers 22-25 Avril 2014.
- [5] A. Hirschberg, J. Haas, X. Pelorson, "Asymmetry in lateral forces on vocal folds due to the Coanda effect", Congrès Français d'Acoustique 2014, Poitiers 22-25 Avril 2014.
- [6] X. Pelorson, X. Laval, Une réplique expérimentale des cordes vocales pour étudier les pathologies de la voix, Acoustique et Techniques, 68, p. 58-62, (2012).
- [7] <http://www.praat.org>
- [8] Baken R.J., Orlikoff R.F., Clinical Measurement of Speech and Voice. San Diego, CA, USA : Singular Publ. Group, Inc., 2e édition, 2000, 604.
- [9] Teston B., L'évaluation instrumentale des dysphonies : État actuel et perspectives In Giovanni A., "Le bilan d'une dysphonie : État actuel et perspectives", Solal, Marseille, (2004), 244 p.