

Une réplique expérimentale des cordes vocales pour étudier les pathologies de la voix

An experimental replica of the vocal folds to study normal and pathological voice

Xavier Pelorson, Xavier Laval

Grenoble Images Parole Signal Automatique

Gipsa-lab

961, rue de la houille blanche

BP 46

38402 Grenoble CEDEX

E-mail : xavier.pelorson@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Résumé

Dans le but de tester la précision et la pertinence des modèles théoriques pour la production de parole, la validation grâce à des dispositifs expérimentaux contrôlés est essentielle. Depuis les travaux fondateurs de Van Den Berg (1957), de nombreuses maquettes mécaniques ont été construites dans le souci croissant de s'approcher de la complexité des plis vocaux humains. Dans cet article, nous présentons un nouveau dispositif expérimental basé sur une maquette de plis vocaux fait de plusieurs couches successives de liquide et de latex. Comparée avec les modèles mécaniques existants, cette maquette permet à des paramètres essentiels comme le degré d'abduction, la charge acoustique, la pression en amont et l'élasticité d'être contrôlés et ajustés individuellement. De plus, des configurations pathologiques, y compris une altération locale des plis vocaux comme des kystes ou polypes, peuvent être facilement simulées en ajoutant des excroissances de tailles et masses connues.

Des exemples typiques de mesures effectuées avec cette maquette seront présentés pour des configurations normales et pathologiques.

Abstract

In order to test the relevance and accuracy of theoretical models for speech production, validation on in-vitro controlled set-ups is needed. Since the pioneer work of Van Den Berg (1957) numerous mechanical replicas have been built in an increasing effort towards rendering the complexity of the human vocal folds. In this paper we present a new experimental set-up based on a replica of the vocal folds made of several successive layers of liquids and latex. Compared with existing mechanical models, this replica allows that essential parameters such as the degree of abduction, the acoustical loading, the upstream pressure and the elasticity of the replica can be controlled and varied individually. Further, pathological configurations, involving a local alteration of the vocal folds, such as polyps and cysts, can be easily simulated by adding growths of known masses and shapes. Typical examples of measurements performed on this replica will be presented for normal and pathological configurations.



Les pathologies de la voix sont très fréquentes et peuvent prendre diverses formes, d'un simple altération temporaire aux pathologies sévères nécessitant une intervention chirurgicale. Par exemple, les cas rencontrés dans le corps enseignant sont très représentatifs. [1]. En France, une étude récente menée par la mutuelle générale de l'éducation nationale (MGEN) a révélé que 50% des enseignants et 26% des enseignants souffraient «souvent ou en permanence» de troubles de la voix [2]. L'impact économique est conséquent en raison des arrêts maladie plus ou moins long qui en découlent.

La modélisation physique a pour objectif de fournir des outils d'analyse et diagnostique [3] pour la prédiction d'événements chirurgicaux ou pour la fabrication de prothèses de plis vocaux [4]. De nombreux modèles physiques ont été proposés dans la littérature, se focalisant sur le débit à travers la glotte, le comportement élastique des plis vocaux ou le couplage acoustique avec le conduit vocal [5]. Etant donné que le but de la modélisation physique

est, non seulement d'expliquer les auto-oscillations des plis vocaux, mais aussi d'en prédire quantitativement les caractéristiques, la validation expérimentale est cruciale. Même si les simulations numériques peuvent être des outils intéressants pour certains aspects spécifiques, elles sont limitées par la complexité des phénomènes impliqués. Les maquettes du larynx humain sont donc très utilisées pour tester la pertinence et la précision des modèles physiques théoriques. Les objectifs de cette approche expérimentale sont 1) d'imiter avec une précision suffisante les plis vocaux humains (géométrie, comportement normal ou anormal) et 2) d'avoir un contrôle quantitatif des différents paramètres (aire glottique, pression sous-glottique, élasticité).

Dans cet article, nous présentons une réplique mécanique du larynx conçue dans le but d'étudier les perturbations induites par certaines pathologies (asymétrie, kystes, polypes, ...). Comme le montreront les exemples présentés plus loin, cette maquette a l'avantage de permettre le contrôle de chaque paramètre indépendamment.

Maquette expérimentale

Dispositif

Le dispositif expérimental général est décrit sur la figure 1.

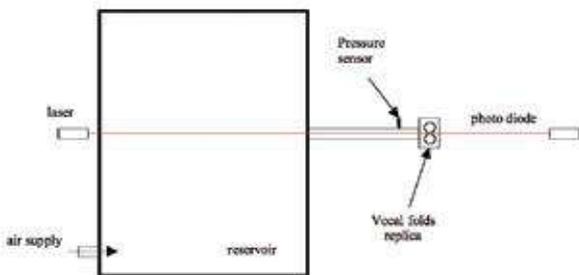


Fig. 1: Vue schématique du dispositif expérimental
Schematic view of the experimental set-up

Ce dispositif expérimental consiste en un compresseur connecté à un grand réservoir rempli de mousse acoustique, dans le but d'amortir les résonances acoustiques. Une maquette de conduit vocal surdimensionnée à l'échelle 3:1 est connectée au réservoir de pression par l'intermédiaire d'un tube uniforme de 10 cm de long. Un faisceau laser traversant le réservoir et la maquette de conduit vocal, son intensité est mesurée par une photodiode. Après calibration, en utilisant des fentes de dimensions connues, ce système permet la mesure des constriction à l'intérieur de la maquette avec une précision de l'ordre de $\pm 0,01$ mm. Des capteurs de pression (Kulite XCS093) sont positionnés le long du tube afin de mesurer la pression à plusieurs emplacements. La calibration de ces capteurs de pression est réalisée grâce à un manomètre à eau, avec une précision de ± 5 Pa.

Maquette de plis vocaux

La maquette de plis vocaux est représentée figure 2.

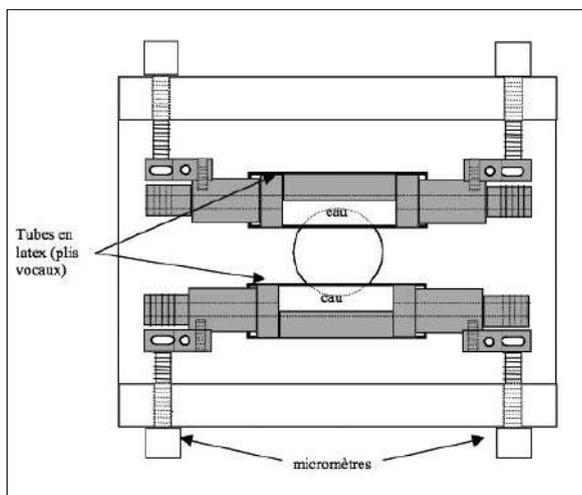


Fig. 2 : Vue de face (perpendiculairement au débit d'air) de la maquette de plis vocaux
Front view (perpendicular to the airflow) of the vocal folds replica

Dans son principe, cette maquette est comparable à la maquette de lèvres de Cullen et al [6] ou à la maquette de plis vocaux de Ruty et al. [7], étant donné qu'elle consiste en des tubes de latex remplis d'eau sous une pression contrôlable. Un tube de latex passe entre chaque pli vocal et connecte les régions amont et aval, comme indiqué sur la figure 3.

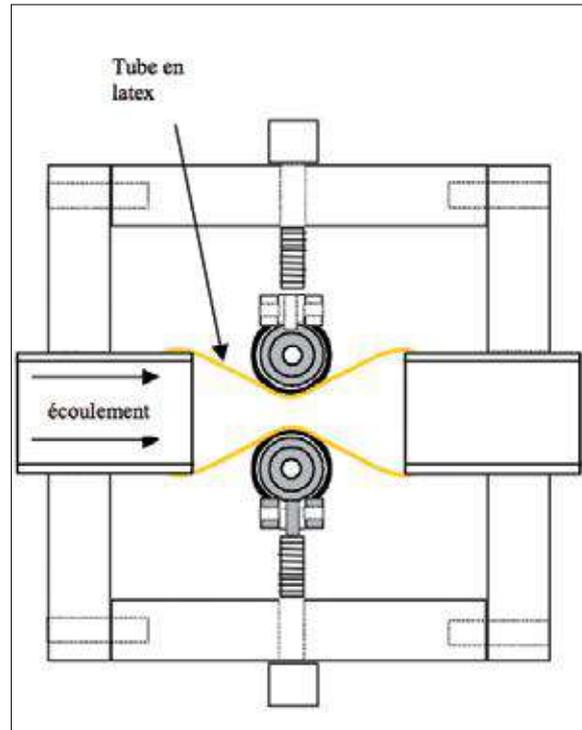


Fig. 3: Vue de côté (parallèle au débit d'air) de la maquette de corde vocale
Side view (parallel to the airflow) of the vocal folds replica

Quatre vis micrométriques à chaque extrémités des deux plis vocaux permettent un contrôle précis de l'adduction (c'est à dire de l'ouverture de la glotte artificielle). En utilisant le même système, on peut imposer divers angles, de 0° (plis vocaux parallèles, comme représentés sur la figure 2) jusqu'à 20° .

Résultats

Dans cette partie, nous présenterons quelques exemples de résultats obtenus avec cette maquette de plis vocaux. Nous nous concentrerons sur 2 paramètres physiques pertinents : la pression de seuil, P_{seuil} , définie comme la pression d'alimentation minimum nécessaire au déclenchement des auto-oscillations, et la fréquence fondamentale d'oscillation, F , correspondante. A la fois d'un point de vue production et clinique, ces paramètres sont d'un grand intérêt étant donné qu'ils sont corrélés avec respectivement l'aisance de phonation et la hauteur de la voix (« pitch »). On mesure ces paramètres à la fois lors du déclenchement et de l'arrêt des auto-oscillations, leur obtention à partir des mesures expérimentales est décrite en détail dans Ruty et al. [7].

Effet de l'élasticité des plis vocaux

Dans cette expérience, on fait varier la pression de l'eau à l'intérieur des plis vocaux, et donc leur élasticité, tandis que l'ouverture entre les plis est maintenue constante grâce aux vis micrométriques. La figure 4 présente un exemple typique des résultats.

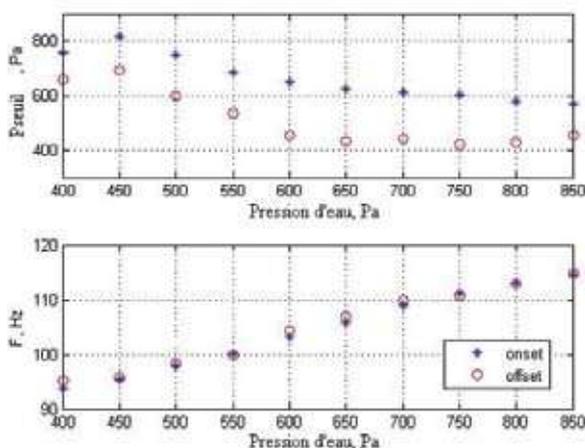


Fig. 4 : Haut : pression de seuil lors de l'initiation (onset) et de l'arrêt des oscillations (offset). Bas : fréquence fondamentale des oscillations correspondantes. Ces courbes sont en fonction de la pression d'eau à l'intérieur de la maquette de plis vocaux. L'ouverture initiale entre les plis est maintenue constante.
 Top curve: onset and offset threshold pressure and bottom curve : corresponding fundamental frequency of oscillation as a function of the pressure of water inside the vocal folds replica. The initial aperture between the two folds is kept constant

La figure 4 illustre un comportement typique qui a été signalé dans d'autres expériences utilisant des maquettes mécaniques différentes [7]. La fréquence fondamentale est proche d'une fonction linéaire de la pression d'eau à l'intérieur de la maquette alors que la pression de seuil décroît rapidement. Pour des pressions d'eau plus grandes, la pression de seuil remonte.

Effet de l'ouverture des plis vocaux

Dans cette expérience, la pression de l'eau à l'intérieur de la maquette de plis vocaux est maintenue constante à 106 cm d'eau tandis que l'ouverture initiale entre les plis vocaux est augmentée jusqu'à 6 mm puis diminuée (afin de tester la répétabilité des mesures). Un exemple de résultats est présenté Figure 5.

L'effet de l'ouverture entre les plis vocaux en tant que paramètre indépendant apparait comme ayant une influence considérable sur les seuils de vibration.

Effet de l'angle glottique

Étant donné que le rapport entre l'ouverture glottique et la largeur des plis vocaux est faible (de l'ordre de 0.1 à la fois pour les plis vocaux humains et pour la maquette), il est généralement admis que l'écoulement glottique peut être approximé par un écoulement bidimensionnel à travers un conduit parallèle.

Même dans des conditions non-pathologiques, les plis vocaux humains ne sont jamais complètement parallèles, la glotte ayant une forme en "V".

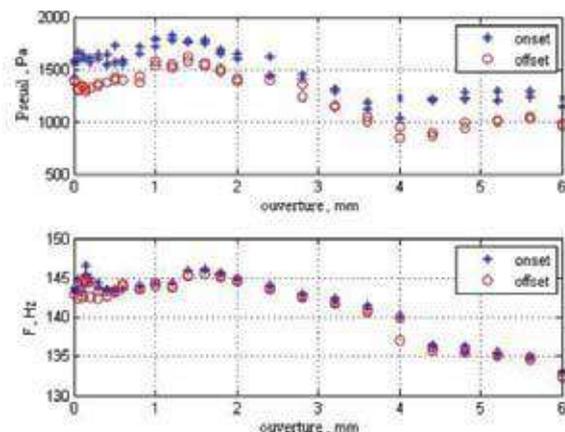


Fig. 5: Haut : pression de seuil lors de l'initiation (onset) et de l'arrêt des oscillations (offset). Bas : fréquence fondamentale des oscillations correspondantes. Ces courbes sont en fonction de l'ouverture initiale entre les plis vocaux. La pression d'eau dans les plis est maintenue constante.
 Top curve : onset and offset threshold pressure and bottom curve : corresponding fundamental frequency of oscillation as a function of the initial aperture between the two folds. The pressure of water inside the vocal folds replica is kept constant.

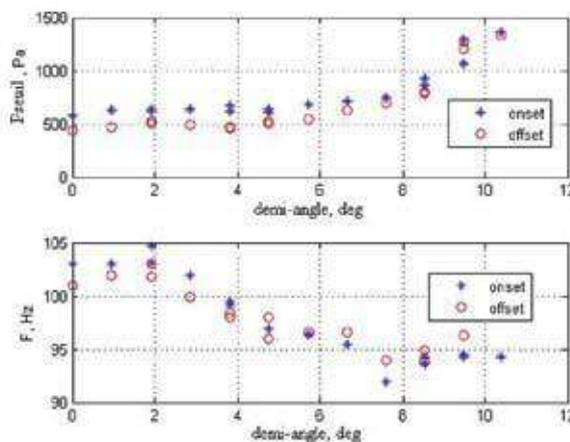


Fig. 6: Haut : pression de seuil lors de l'initiation (onset) et de l'arrêt des oscillations (offset). Bas : fréquence fondamentale des oscillations correspondantes. Ces courbes sont en fonction de l'angle entre les plis vocaux. La pression d'eau dans les plis est maintenue constante
 Top curve: onset and offset threshold pressure and bottom curve : corresponding fundamental frequency of oscillation as a function of angle between the two folds. The pressure of water inside the vocal folds replica is kept constant

L'angle entre les plis vocaux peut être estimé, à partir d'imageries médicales, à quelques degrés pour des voix normales, alors que dans des cas pathologiques, il peut dépasser 10°.

Pour évaluer l'importance de ce paramètre, dans cette expérience, l'angle entre les 2 plis vocaux mécaniques est modifié en utilisant une seule vis micrométrique. Un exemple des résultats est présenté figure 6.

On peut observer, comme attendu, que pour des petits angles (inférieurs à 10°), la pression de seuil et la fréquence fondamentale sont très peu affectées.

En revanche pour des valeurs plus grandes, on observe clairement une augmentation importante de la pression de seuil conjointement à une décroissance de la fréquence fondamentale. Ces dernières configurations correspondent à une géométrie glottique anormale.

Configuration pathologique: asymétrie mécanique

Dans le but de simuler l'effet d'une asymétrie mécanique, telle que celle due à une paralysie (partielle) d'un pli vocal, on fait varier la pression d'eau dans un pli vocal tandis que l'autre est maintenu constant. Un exemple des résultats est présenté figure 7. Une différence de pression nulle entre les 2 plis vocaux correspond à une symétrie mécanique de la maquette.

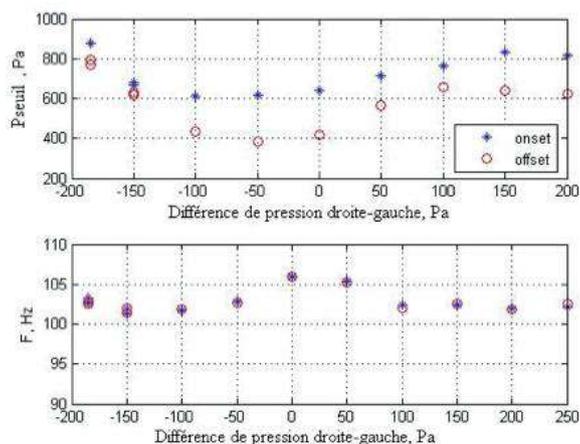


Fig. 7 : Haut : pression de seuil lors de l'initiation (onset) et de l'arrêt des oscillations (offset). Bas : fréquence fondamentale des oscillations correspondantes. Ces courbes sont en fonction de la différence de pression d'eau entre chaque pli vocal. La pression de référence est 605 mmH2O
Top curve : onset and offset threshold pressure and bottom curve : corresponding fundamental frequency of oscillation as a function of the difference of water pressure inside the each vocal folds replica. The reference pressure is 605 mm H2O

Etant donné qu'accroître ou décroître la pression entre les répliques de plis vocaux affecte l'élasticité de l'un des plis, la figure 7 doit être comparée avec les résultats de la figure 4. En considérant la pression de seuil, le comportement global en forme de «U» observé peut être attribué aux variations d'élasticité. Cependant, comparé avec la configuration mécaniquement symétrique, l'augmentation de la pression de seuil est beaucoup plus importante dans ce cas. Une autre différence importante entre ces deux configurations apparaît dans le comportement de la fréquence fondamentale. Tandis qu'une diminution de la pression d'eau dans un pli vocal fait décroître la fréquence fondamentale à une vitesse comparable à la configuration mécaniquement symétrique, la même décroissance est observée en augmentant la pression d'eau.

Configuration pathologique: présence d'une excroissance

La présence d'une excroissance sur la surface d'un pli vocal ou interne à la structure des plis vocaux est une configuration pathologique commune. Les kystes ou polypes sont des exemples typiques de telles configurations.

Dans une première tentative de simulation de ce type d'altération, un cylindre de silicone (diamètre 6 mm, hauteur 2 mm) est collé sur l'une des répliques de pli vocal à 1/3 d'une extrémité, comme le montre la photo, figure 8.



Fig. 8 : Photo de l'une des réplique de plis vocaux avec une excroissance artificielle collée
Picture of one vocal fold replica with artificial growth glued

La présence du tube de latex connectant l'amont et l'aval du flux d'air, qui couvre les plis vocaux, adoucit la géométrie glottique comme le montre la figure 9. Ce point est important car il permet au cylindre de silicone collé de ne pas constituer un obstacle abrupt au flux.



Fig. 9 : Photo de la glotte de la maquette de pli vocal avec une excroissance artificielle sur son côté droit.
Picture of the glottal replica. Vocal fold with artificial growth is on the right side

Un exemple de résultat est présenté figure 10, page suivante. Les résultats présentés sur cette figure sont normalisés par rapport aux valeurs mesurées en l'absence d'excroissance artificielle : $P_{ref} = 780$ Pa et $F_{ref} = 98$ Hz. Comparé au cas sans perturbation présenté figure 5, le comportement global de la pression de seuil et de la fréquence fondamentale est globalement similaire. Cependant, la pression de seuil présente une spectaculaire augmentation jusqu'à un facteur 2 pour des ouvertures faibles, qui a tendance à décroître avec l'augmentation de l'ouverture. La perturbation de la fréquence fondamentale est limitée à +/- 5%.

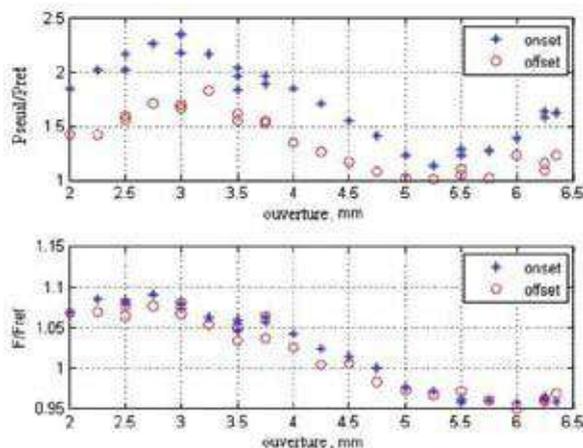


Fig. 10 : Haut : pression de seuil lors de l'initiation (onset) et de l'arrêt des oscillations (offset). Bas: fréquence fondamentale des oscillations correspondantes. Ces courbes sont en fonction de l'ouverture initiale entre les 2 plis. Ces 2 paramètres sont normalisés par rapport aux valeurs obtenues sans l'excroissance artificielle. La pression d'eau à l'intérieur des plis vocaux est maintenue constante.
Top curve: onset and offset threshold pressure and bottom curve: corresponding fundamental frequency of oscillation as a function of the initial aperture between the two folds. Both quantities are normalized to the values obtained without the artificial growth. The pressure of water inside the vocal folds replica is kept constant.

Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une nouvelle maquette vocale créée dans le but de prendre en compte plusieurs paramètres individuellement ou collectivement. Nous avons présenté quelques exemples de résultats et illustré les potentialités de la maquette en utilisant les mesures de pression de seuil et de fréquence fondamentale. Les futures recherches se concentreront sur une analyse détaillée des données mesurées. En particulier, les mesures au seuil d'oscillation, bien que très pertinentes, ne prennent pas en compte les comportements chaotiques ou les sauts de fréquence qui ont été observés expérimentalement, en particulier dans les cas de pathologies simulées. En parallèle, l'analyse de ces résultats sera faite d'abord d'un point de vue physiologique, afin de corréliser les phénomènes observés avec des observations cliniques. Certains comportements, comme l'effet des perturbations sur l'accroissement du seuil d'oscillation ou sur la baisse de la fréquence fondamentale semblent en accord avec la littérature disponible. D'autres, comme l'évolution de la fréquence fondamentale en présence d'une excroissance ou d'une asymétrie mécanique devront être validés en les comparant avec par exemple des expériences sur des larynx excisés. Enfin, ce dispositif expérimental sera utilisé pour une validation systématique des modèles de phonation théorique, en testant différentes théories de mécanique vibratoire ou de mécanique des fluides.

Références bibliographiques

[1] N. Roy, D. M. Bless, D. Heisey. "Personality and voice disorders: A superfactor trait analysis". *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 43, 749–768. (2000)

[2] INSERM "La voix, ses troubles chez les enseignants", Éditions Inserm 2007, 343p (<http://lettremedecinsgeneralistes.inserm.fr/02/article-actu-02.html>) (2007)

[3] P. Mergell, Herzel, H. and Titze, I. R. "Irregular vocal-fold vibration - high-speed observation and modeling". *J. Acoust. Soc. Am.*, 108(8) :2996–3002. (2000)

[4] M. De Vries, (2000). "A new voice for the voiceless. Design and in-vitro testing of a voice-producing element". PhD Thesis, University of Groningen. The Netherlands.

[5] B. Fabre, Gilbert J., Hirschberg A., Pelorson X. "Aeroacoustics of Musical Instruments". *Annual Rev. Fluid Mech.* 44. 1-25. (2012)

[6] J. Cullen, Gilbert J., Campbell D.M. "Brass instruments: linear stability analysis and experiments with an artificial mouth". *Acustica* 86 (2000), 704-724.

[7] N. Ruty, Pelorson, X., Van Hirtum, A., Lopez, I., Hirschberg, A. "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, 479-490. (2007).