



HAL
open science

Développement d'un banc in vitro pour la caractérisation vibratoire de plis vocaux biomimétiques et pré-déformés

Nathalie Henrich Bernardoni, Raphaël Girault, Hamid Yousefi-Mashouf, Paul Luizard, Laurent Orgéas, Lucie Bailly

► To cite this version:

Nathalie Henrich Bernardoni, Raphaël Girault, Hamid Yousefi-Mashouf, Paul Luizard, Laurent Orgéas, et al.. Développement d'un banc in vitro pour la caractérisation vibratoire de plis vocaux biomimétiques et pré-déformés. JEP 2022 - 34e Journées d'Études sur la Parole, Association Francophone de la Communication Parlée; Laboratoire de Linguistique de Nantes, Jun 2022, Noirmoutier, France. hal-03833126

HAL Id: hal-03833126

<https://hal.science/hal-03833126>

Submitted on 28 Oct 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.

Développement d'un banc *in vitro* pour la caractérisation vibratoire de plis vocaux biomimétiques et pré-déformés

Nathalie Henrich Bernardoni¹ Raphaël Girault¹ Hamid Yousefi-Mashouf^{1,2}

Paul Luizard¹ Laurent Orgéas² Lucie Bailly²

(1) Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, GIPSA-lab, 38000 Grenoble, France

(2) Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France

nathalie.henrich@gipsa-lab.fr, lucie.bailly@3sr-grenoble.fr

RÉSUMÉ

Pour avancer sur la compréhension physique de la parole, un banc de test a été élaboré dans une approche biomimétique. Il permet actuellement d'étudier le comportement vibromécanique de plis vocaux extensibles et isotropes en interaction fluide-structure. Cet article décrit les différents constituants du banc test et présente les premiers résultats obtenus sur des plis homogènes et isotropes. La réplique du larynx consiste en une enveloppe en silicone déformable dans laquelle des répliques de plis vocaux extensibles peuvent être insérées pour être testées. Le matériau et les propriétés structurelles des plis sont ajustables. Trois silicone-élastomères de rigidité différentes ont été testés, ainsi qu'un hydrogel réticulé. L'auto-oscillation des plis est contrôlée par le débit d'air en amont. Les plis testés ont auto-oscillé sur une large gamme de débits et pour divers degrés d'étirement.

ABSTRACT

Development of a testbed for the vibratory characterisation of extensible vocal folds

In order to make progress on physical understanding of speech, a testbed was developed. It currently allows to study the vibromechanical behaviour of extensible isotropic vocal folds in fluid-structure interaction. This article describes the different components of the testbed and presents the first results obtained on homogeneous and isotropic folds. The larynx replica consists of a deformable silicone-rubber envelope into which expandable vocal fold replicas can be inserted for testing. The material and structural properties of the folds are adjustable. Three silicone-rubber with various stiffnesses were tested, as well as a cross-linked hydrogel. The self-oscillation of the pleats is controlled by the upstream air flow. The tested folds self-oscillated over a wide range of flow rates and for various degrees of stretching.

MOTS-CLÉS : phonation, articulation laryngée, pli vocal biomimétique, banc d'essai, auto-oscillation.

KEYWORDS: phonation, laryngeal articulation, biomimetic vocal fold, testbed, self-oscillation.

1 Introduction

La compréhension physique et physiologique de la parole s'appuie sur le développement de bancs de test *in vitro* qui permettent de reproduire les gestes phonatoires et articulatoires à l'origine des sons de la parole dans un contexte simplifié mais contrôlé. Nous nous focalisons dans cet article sur le larynx comme un des articulateurs de la parole (Moisik & Gick, 2017).

La plupart des répliques laryngées développées ces dernières décennies ne permettent pas de mobilité laryngée. Elles ont pour but premier de reproduire des oscillations auto-entretenues en laboratoire pour étudier la physique du comportement vibratoire de répliques des plis vocaux selon leurs caractéristiques géométriques, mécaniques et/ou structurales. L'approche a été progressivement raffinée, passant de plis monocouches homogènes et isotropes en silicone à des plis multicouches puis à de premières répliques dotées d'une architecture fibreuse, responsable des propriétés mécaniques fortement non-linéaires et anisotropes du tissu natif (Bailly *et al.*, 2008; Kniesburges *et al.*, 2011; Murray & Thomson, 2012; Greenwood & Thomson, 2021). A notre connaissance cependant, seules deux études envisagent le contrôle de la pré-déformation des plis dans la direction longitudinale (*i.e.*, antéro-postérieure), alors même que l'étirement du pli vocal est un des aspects majeurs du contrôle biomécanique laryngé en phonation (Shaw *et al.*, 2012; Kniesburges *et al.*, 2019).

Le but de ce travail a donc été de développer un banc de test qui permette de simuler les gestes articulatoires laryngés, et d'étudier le comportement vibromécanique de plis vocaux biomimétiques pré-déformés dans différentes configurations articulatoires du larynx. L'accent a été mis sur la possibilité de pouvoir reproduire les actions de la bascule crico-thyroïdienne (étirement des plis dans la direction longitudinale) et de la compression inter-aryténoïdienne (abduction et adduction des plis).

2 Méthodes

La mise en place du banc de test a été effectuée en trois étapes. La première étape a consisté à concevoir une réplique 3D de larynx permettant d'insérer des plis vocaux synthétiques interchangeables. Cette réplique laryngée devait être suffisamment souple pour pouvoir se déformer lors de mouvements d'adduction, d'abduction et d'étirement des plis vocaux, tout en étant suffisamment rigide pour pouvoir mimer la raideur d'un larynx. La seconde étape a porté sur la conception des plis vocaux eux-mêmes. Si la visée à terme est de concevoir des plis vocaux biomimétiques ayant une structure multicouche fibreuse anisotrope similaire à celle de plis vocaux humains (Hirano, 1974; Bailly *et al.*, 2018), nous avons commencé par mouler des plis vocaux mono-couches homogènes et isotropes, sans fibres. La troisième étape a été de concevoir un système mécatronique qui permette les principales mobilités laryngées : adduction, abduction et étirement des plis vocaux. Nous présentons ici plus en détail ces différentes étapes de conception.

2.1 Une enveloppe laryngée déformable

L'approche choisie est de permettre l'actionnement des plis en étirement et en compression. Nous avons conçu pour cela une enveloppe laryngée flexible composée de silicone (Ecoflex™ 00-50), dans laquelle les plis vocaux à tester peuvent être insérés tout en maintenant une étanchéité. Cette enveloppe en trois parties est représentée sur la Figure 1. Elle est constituée de trois étages : i) un conduit cylindrique fixé au tuyau d'arrivée d'air, représentant la partie supérieure de la trachée (étage sous-glottique); ii) un conduit divergent reliant les étages sous-glottique et glottique; iii) une cavité dans laquelle les plis déformables peuvent être positionnés (étage glottique). Un capteur de pression d'air (kulite) est inséré dans l'étage sous-glottique pour mesurer la pression sous-glottique.

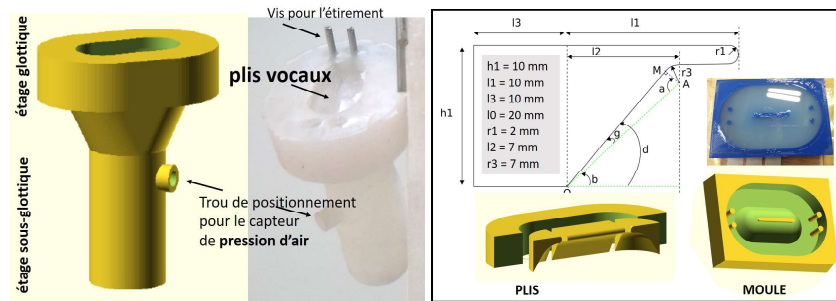


FIGURE 1 – Illustration de l’enveloppe laryngée déformable et des plis moulés

2.2 Des plis vocaux extensibles

Les oscillateurs mono-couches homogènes et isotropes ont été réalisés en polymères mis en forme dans des moules imprimés en 3D (voir Figure 1). Une première géométrie 3D simplifiée a été choisie et paramétrée, suivant des données anatomiques disponibles dans la littérature (Titze, 1994). Deux types de matériaux ont été testés : (i) des élastomères silicones réticulables à froid, utilisés habituellement dans la littérature (Ecoflex™ 00-10, 00-30, 00-50) et possédant des propriétés mécaniques distinctes (du plus mou et extensible 00-10 au plus rigide et moins ductile 00-50) (Pickup & Thomson, 2009; Romero *et al.*, 2021); (ii) des hydrogels réticulés à base de gélatine choisis pour leur capacité à retenir une teneur en eau élevée semblable à celle d’un tissu humain (Yousefi-Mashouf *et al.*, 2020).

2.3 Auto-oscillation sous interaction fluide-structure

De l’air sous pression est injecté dans l’étage sous-glottique. Le débit d’air sous-glottique est contrôlé par le degré d’ouverture d’une électrovanne et mesuré à l’aide d’un débitmètre. Pour différents degrés d’étirement longitudinal des plis, le comportement aéro-acoustique a été caractérisé par la mesure de paramètres aérodynamiques (pression de phonation sous-glottique, résistance glottique) et de paramètres acoustiques (intensité, fréquence, centroïde spectral). Le comportement vibratoire a été caractérisé par cinématographie ultra-rapide. La variation d’aire glottique est estimée par détection du contour glottique à partir du logiciel *Glottis Analysis Tools* (GAT, (Kist *et al.*, 2021)). Le degré de contact médian est observé par analyse kymographique sous Matlab.

3 Résultats et discussion

3.1 Mobilité des plis vocaux

Comme attendu, le dispositif permet de contrôler le degré d’ouverture et fermeture à une extrémité des plis, reproduisant les mouvements laryngés d’adduction (mise en contact des plis) et d’abduction (écartement des plis). Un pré-étirement contrôlable de grande amplitude est possible. La

pré-déformation des plis dans la direction longitudinale imposée avant leur mise en oscillation est définie par $\varepsilon = \ln(L/L_0)$, où L est la longueur courante du pli dans la configuration pré-déformée, et L_0 sa longueur au repos. Dans une première campagne de mesure, nous avons fait varier ε entre 0.05 et 0.21, *i.e.* dans une gamme de valeurs typiquement mesurées sur des larynx excisés humains (Lagier *et al.*, 2017; Bailly *et al.*, 2018). Dans une seconde campagne (non présentée ici), une plus large gamme de pré-déformation allant jusqu'à $\varepsilon = 0.60$ a été explorée, pour reproduire des configurations plus extrêmes également observées *in vivo*.

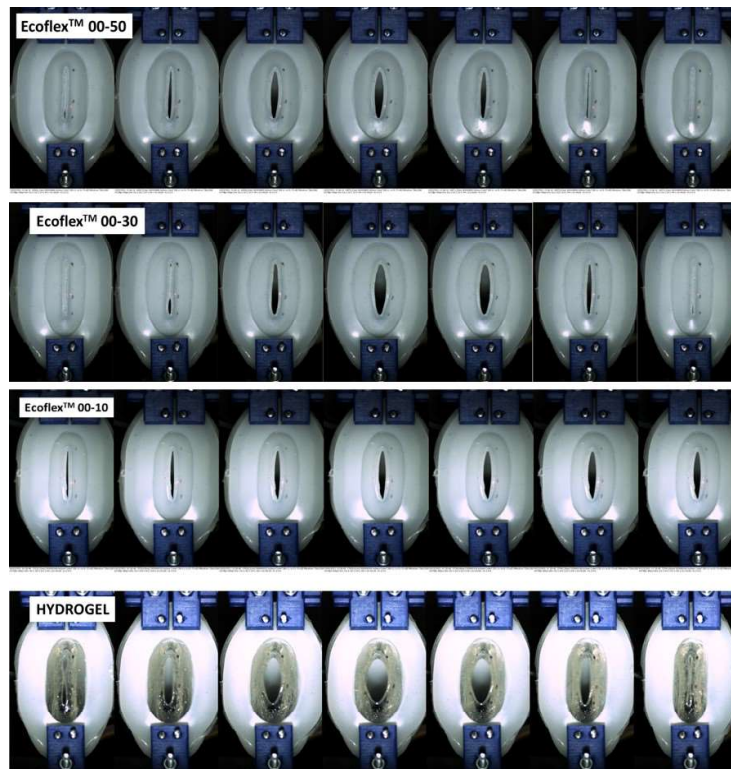


FIGURE 2 – Illustration du comportement auto-oscillant pour les quatre répliques de plis vocaux au cours d'un cycle vibratoire. Chaque séquence présentée dure 9,5ms.

3.2 Capacité d'auto-oscillation sous interaction fluide-structure

Dès la première campagne, les plis vocaux ont pu osciller en réponse à une augmentation du débit d'air sous-glottique pour la plupart des configurations testées. La Figure 2 illustre un cycle de vibration pour chacun des matériaux testés, soumis à une même pré-élongation et un débit d'air similaire. Pour un état de déformation donné, le débit d'air était augmenté par paliers. La Figure 3.2 présente par des images kymographiques la variation d'ouverture glottique en fonction de l'augmentation graduelle du débit d'air en entrée pour un état de déformation fixé. Nous pouvons observer une phase de contact consécutive pour les plis en hydrogel réticulé, ainsi que pour ceux en silicone Ecoflex™ 00-30 et

00-50. A l’opposé, les plis en Ecoflex™ 00-10 auto-oscillent de façon très symétrique et sans phase de contact. Ainsi, ces deux figures soulignent l’impact des propriétés volumiques (comportement mécanique) mais aussi surfaciques (frottement et adhésion) des matériaux constitutifs des plis sur leur comportement vibratoire en termes d’amplitude oscillante et de patterns de collisions à chaque période.

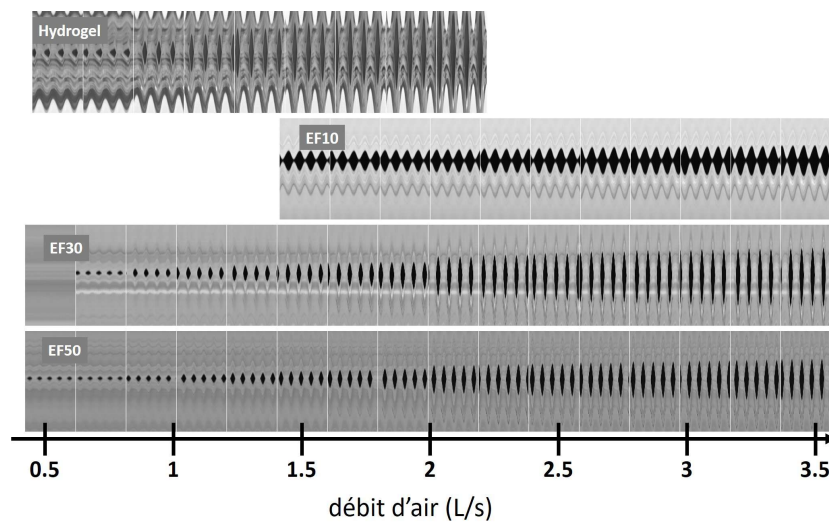


FIGURE 3 – Kymogrammes montrant les cycles glottiques pour un point médian des plis. Le débit d’air varie de façon quasi-statique, par paliers successifs. 100 images sont enregistrées à 1473 images/s à chaque palier. Les lignes blanches représentent les séparations entre les différents niveaux de débit.

La Figure 4 présente la variation de pression sous-glottique en fonction du débit d’air pour tous les cas ayant présenté une auto-oscillation stabilisée. Les plis vocaux homogènes en Ecoflex™ 00-10 ont auto-oscillé sur une plage limitée de débit d’air moyen à élevé (de 1,5 à 3,5 L/s), avec une moindre variation de la pression sous-glottique. Les plis vocaux en Ecoflex™ 00-30 et 00-50 ont auto-oscillé sur l’ensemble de la gamme de débit explorée. Les plis vocaux à base d’hydrogel réticulé n’ont auto-oscillé que pour une gamme de débit basse à moyenne (de 0,5 à 2,5 L/s). La relation linéaire entre pression sous-glottique et débit d’air est similaire pour tous les matériaux et toutes les conditions de déformation, à l’exception des plis en Ecoflex™ 00-10 pour lesquels la pression sous-glottique n’a pas beaucoup varié. Plus la rigidité du matériau est grande, plus la pression sous-glottique mesurée pendant la vibration est élevée. Pour un matériau donné, plus l’étirement appliqué est important, plus la pression sous-glottique nécessaire à l’auto-oscillation est élevée. La déformation longitudinale n’a pas entravé les capacités oscillatoires pour les plis Ecoflex™ 00-30 et Ecoflex™ 00-50. Sur l’ensemble des matériaux testés, l’hydrogel semble un candidat biomimétique très prometteur, de par ses capacités à osciller à des pressions d’air sous-glottique proches de la réalité physiologique (en deçà de 1 kPa).

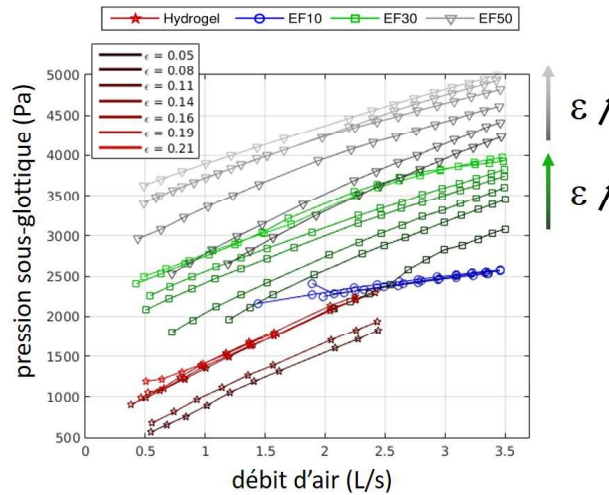


FIGURE 4 – Pression d’air sous-glottique en fonction du débit d’air (paramètre de contrôle) pour trois rigidités différentes de silicone et pour l’hydrogel réticulé. Chaque point représente la valeur moyenne calculée sur une séquence d’auto-oscillation stabilisée des plis vocaux.

4 Conclusion

L’approche mise en œuvre a permis le développement de plis vocaux biomimétiques étape par étape, afin de mieux comprendre à terme les relations entre les propriétés matériaux et structurales de la réplique, et ses résultats vibratoires sous interactions fluide/structure. Quatre matériaux ont été testés avec ce modèle simple, homogène et isotrope de plis vocaux et d’enveloppe laryngée : des oscillations auto-entretenues ont été obtenues sur une large gamme de débits d’air et de pressions sous-glottiques, à divers degrés d’étirement. Les premiers résultats ont permis de souligner l’impact de la pré-déformation longitudinale des plis et du choix du matériau sélectionné sur leurs patterns vibratoires. Des travaux sont en cours pour caractériser le comportement mécanique de chaque matériau en traction, compression et cisaillement, *i.e.* des modes de chargements physiologiques précédemment mis en œuvre sur les tissus natifs (Cochereau *et al.*, 2020). Combinés aux résultats obtenus sur le banc de phonation *in vitro*, ces travaux permettront de mieux comprendre les performances vibromécaniques de chaque matériau candidat, et de les confronter à celles du pli vocal humain.

Plusieurs améliorations peuvent être apportées au banc. Concernant les plis, une version bi-couches mimant au premier ordre la *lamina propria* et le *vocalis* passif a été conçue et récemment testée avec succès. D’autres géométries de plis vocaux peuvent également être envisagées, plus proches des modèles synthétiques utilisés dans la littérature (Murray & Thomson, 2012; Kniesburges *et al.*, 2011; Romero *et al.*, 2021). Des répliques de cartilages aryénoïdes peuvent être facilement imprimées en 3D et insérées dans la partie postérieure lors du moulage.

Remerciements

Ces travaux se font dans le cadre du projet ANR MicroVoice (financement n° ANR-17-CE19-0015-01).

Références

- BAILLY L., COCHEREAU T., ORGÉAS L., HENRICH BERNARDONI N., ROLLAND DU ROSCOAT S., MCLEER-FLORIN A., ROBERT Y., LAVAL X., LAURENCIN T., CHAFFANJON P., FAYARD B. & BOLLER E. (2018). 3D multiscale imaging of human vocal folds using synchrotron X-ray microtomography in phase retrieval mode. *Scientific Reports*, **8**(1).
- BAILLY L., PELORSON X., HENRICH N. & RUTY N. (2008). Influence of a constriction in the near field of the vocal folds : Physical modeling and experimental validation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **124**(5), 3296–3308.
- COCHEREAU T., BAILLY L., ORGÉAS L., BERNARDONI N. H., ROBERT Y. & TERRIEN M. (2020). Mechanics of human vocal folds layers during finite strains in tension, compression and shear. *Journal of Biomechanics*, **110**, 109956.
- GREENWOOD T. E. & THOMSON S. L. (2021). Embedded 3d printing of multi-layer, self-oscillating vocal fold models. *Journal of Biomechanics*, **121**, 110388.
- HIRANO M. (1974). Morphological structure of the vocal cord as a vibrator and its variations. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, **26**(2), 89–94.
- KIST A. M., GÓMEZ P., DUBROVSKIY D., SCHLEGEL P., KUNDUK M., ECHTERNACH M., PATEL R., SEMMLER M., BOHR C., DÜRR S. *et al.* (2021). A deep learning enhanced novel software tool for laryngeal dynamics analysis. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, **64**(6), 1889–1903.
- KNIESBURGES S., L THOMSON S., BARNEY A., TRIEP M., SIDLOF P., HORACEK J., BRUCKER C. & BECKER S. (2011). In vitro experimental investigation of voice production. *Current bioinformatics*, **6**(3), 305–322.
- KNIESBURGES S., VELTRUP R., FATTOUM S. & SCHÜTZENBERGER A. (2019). *Modeling the pre-phonatory vocal fold posture in the larynx model SynthVOICE*. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen.
- LAGIER A., GUENOUN D., LEGOU T., ESPESSER R., GIOVANNI A. & CHAMPSAUR P. (2017). Control of the glottal configuration in ex vivo human models : quantitative anatomy for clinical and experimental practices. *Surg Radiol Anat*, **39**, 257–262.
- MOISIK S. R. & GICK B. (2017). The quantal larynx : The stable regions of laryngeal biomechanics and implications for speech production. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, **60**(3), 540–560.
- MURRAY P. R. & THOMSON S. L. (2012). Vibratory responses of synthetic, self-oscillating vocal fold models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **132**(5), 3428–3438.
- PICKUP B. & THOMSON S. (2009). Influence of asymmetric stiffness on the structural and aerodynamic response of synthetic vocal fold models. *Journal of Biomechanics*, **42**(14), 2219–2225.
- ROMERO R. G., COLTON M. B. & THOMSON S. L. (2021). 3d-printed synthetic vocal fold models. *Journal of Voice*, **35**(5), 685–694.

SHAW S. M., THOMSON S. L., DROMEY C. & SMITH S. (2012). Frequency response of synthetic vocal fold models with linear and nonlinear material properties. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, **55**, 1395–1406.

TITZE I. R. (1994). *Principles of Voice Production*. Prentice-Hall.

YOUSEFI-MASHOUF H., FERRI-ANGULO D., BAILLY L., SOHIER J., ORGÉAS L. & BERNARDONI N. H. (2020). Multi-axial mechanical properties of hydrogel-based materials upon finite strains : towards the design of tailored vocal-fold composite replicas. In *Proceedings of the 12th International Conference on Voice Physiology and Biomechanics*, Grenoble.