



**HAL**  
open science

## Contribution des bandes ventriculaires lors d'un effort vocal. Impact sur la vibration glottique

Lucie Bailly, Nathalie Henrich Bernardoni

► **To cite this version:**

Lucie Bailly, Nathalie Henrich Bernardoni. Contribution des bandes ventriculaires lors d'un effort vocal. Impact sur la vibration glottique. CFA 2010 - 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. pp.ISBN : 978-2-9521105-9-4. hal-00486155

**HAL Id: hal-00486155**

**<https://hal.science/hal-00486155>**

Submitted on 25 May 2010

**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.

# 10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

## Contribution des bandes ventriculaires lors d'un effort vocal. Impact sur la vibration glottique

Lucie Bailly<sup>1,2</sup>, Nathalie Henrich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Département Parole et Cognition, GIPSA-lab, 961 rue de la Houille Blanche - Domaine universitaire - BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex

<sup>2</sup>Laboratoire Sols, Solides, Structures – Risques (3S-R), Domaine universitaire – BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9

{lucie.bailly, nathalie.henrich}@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Les bandes ventriculaires sont des structures laryngées situées au-dessus et à proximité des cordes vocales. Bien que leurs propriétés biomécaniques diffèrent de celles des cordes vocales, elles sont capables de se rapprocher, de rentrer en contact, voire même de vibrer lors de gestes phonatoires parlés ou chantés. Dans cette étude, nous nous intéressons à leur comportement lors d'un effort vocal (crescendo-decrescendo, cri, grognement). Pour ce faire, une base de données a été constituée par l'enregistrement par cinématographie ultra-rapide de 5 locuteurs et 3 chanteurs lors de ces divers gestes phonatoires. Les signaux audio et électroglottographique de chaque production ont été enregistrés simultanément, et synchronisés aux images laryngées.

L'observation du comportement des bandes ventriculaires montre un rapprochement de ces structures lors d'un effort vocal, comparativement au geste de voisement usuel. Leur rapprochement peut s'accompagner d'une augmentation conjointe de l'énergie acoustique dans la bande de fréquence 2-4 kHz, sans influence directe sur l'intensité vocale globale. Le geste phonatoire peut également s'accompagner d'un accolement des bandes ventriculaires, observé sur la partie médiane, antéro-médiane ou sur l'intégralité de leur longueur. Dans la continuité de leur mouvement de compression, les bandes ventriculaires peuvent entrer en vibration, périodiquement ou non, en phase ou non avec l'oscillation des cordes vocales selon le contexte phonatoire.

Une modélisation théorique aérodynamique a permis de mettre en évidence l'influence d'une constriction supra-laryngée sur le mouvement vibratoire glottique. Cette modélisation est appliquée ici à l'étude physique de l'impact des constriction observées par cinématographie ultra-rapide sur la vibration glottique. L'aire ventriculaire estimée à partir des images laryngées est introduite comme paramètre d'entrée du modèle. Le comportement vibratoire glottique résultant est simulé par application d'un modèle à deux masses inspiré de Ruty et al. (2007), et comparé à la vibration glottique mesurée par électroglottographie.

## 1 Introduction

Les bandes ventriculaires, encore appelées « fausses cordes vocales », sont des replis situés au-dessus du plan glottique. Avec les cordes vocales (plis vocaux), elles délimitent une cavité, appelée ventricule de Morgagni [1]. Les propriétés bio-mécaniques des bandes ventriculaires se différencient nettement de celles des cordes vocales par une plus grande viscosité et une plus faible raideur [2,3]. L'étude de leur implication en phonation a montré que ces structures laryngées peuvent être mobilisées dans des gestes phonatoires parlés et chantés [4]. L'analyse du comportement laryngé de cinq locuteurs et trois chanteurs (base de données de 87 séquences cinématographiques) a mis en évidence des gestes phonatoires spécifiques d'un rapprochement de ces structures, d'un contact, voire d'un mouvement oscillatoire entretenu.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux gestes phonatoires concomitants d'un effort vocal. Dans une première partie, nous cherchons à identifier le comportement de ces structures pendant un effort vocal, et les conséquences acoustiques de leur mouvement. Dans une seconde partie, nous nous appuyons sur une modélisation théorique de l'interaction aérodynamique entre les cordes

vocales et les bandes ventriculaires pour étudier l'impact aérodynamique du comportement ventriculaire. A cet effet, des données physiologiques mesurées sur les séquences cinématographiques peuvent être introduites comme paramètres d'entrée des modèles. Les résultats des simulations numériques peuvent alors être confrontés aux observations réelles.

## 2 Matériel et méthodes

### 2.1 Base de données cinématographiques

Cette base de données a été constituée dans le but d'observer des gestes phonatoires pour lesquels les bandes ventriculaires interviennent. Elle comprend un ensemble de 87 séquences cinématographiques enregistrées sur cinq locuteurs et trois chanteurs, explorant une grande variété de gestes phonatoires : voisement usuel; glissandi; mécanismes laryngés M0, M1, M2 ; chant de gorge; yoddlé; « grognements » (type L. Armstrong, érailllements, sons gutturaux); cris; crescendi. Dans cette étude, nous avons analysé les cris et les crescendi. La caméra utilisée pour ces enregistrements est une caméra numérique CCD noir et blanc (Richard WOLF, HS-Endocam 5560), fixée à

l'extrémité d'un endoscope rigide (Wolf 90° E 60491) et associée à une source de lumière continue (Wolf 5131). La fréquence d'échantillonnage de la caméra est de 2000 images/s. La durée de chaque séquence est d'un maximum de 4s, avec des images entrelacées d'une résolution de 256x256 pixels.

Pour chaque séquence, les signaux audio et électroglottographiques ont été enregistrés à 44 170 Hz sur 16 bit et synchronisés en post-traitement.

## 2.2 Analyse des images

Les images sont traitées sous Matlab (Image Processing Toolbox), et mises en relation avec les signaux électroglottographiques dérivés. Une analyse kymographique selon une ligne perpendiculaire à l'axe glottique médian définie manuellement permet la visualisation du mouvement vibratoire en ces points des cordes vocales et bandes ventriculaires. Les aires glottiques ( $\tilde{A}_{cv}$ ) et ventriculaires ( $\tilde{A}_{bv}$ ) sont détectées semi-manuellement à l'aide d'une méthode par courbes de Bézier ajustables à chaque image, inspirée de [5].

# 3 Comportement des bandes ventriculaires lors d'un effort vocal

## 3.1 Du rapprochement au contact et à la mise en vibration

De façon systématique, les bandes ventriculaires s'animent d'un mouvement dans le geste phonatoire en situation d'effort vocal (crescendo, grognements, cri...), comparativement au geste de voisement usuel. Ce mouvement va d'un simple rapprochement des deux bandes – lors d'un crescendo par exemple – à un contact sur la partie antérieure des bandes (dans le cas d'une production éraillée par exemple). Dans certains cas, on peut observer une mise en vibration des bandes ventriculaires, dont les caractéristiques sont variables d'une séquence à l'autre : périodique ou non, avec ou sans contact, en phase ou non avec l'oscillation glottique.

Le rapprochement dans le cas d'un decrescendo est illustré sur la figure 1. L'analyse kymographique (image en haut à droite de la figure 1) montre le mouvement vibratoire d'ouverture et de fermeture des cordes vocales, avec, en fin de séquence, un écartement marqué des deux bords des cordes et la fin du contact. A ce mouvement cyclique et rapide se superpose un mouvement plus lent de rapprochement (de (a) à (d)) puis d'écartement (de (d) à (g))

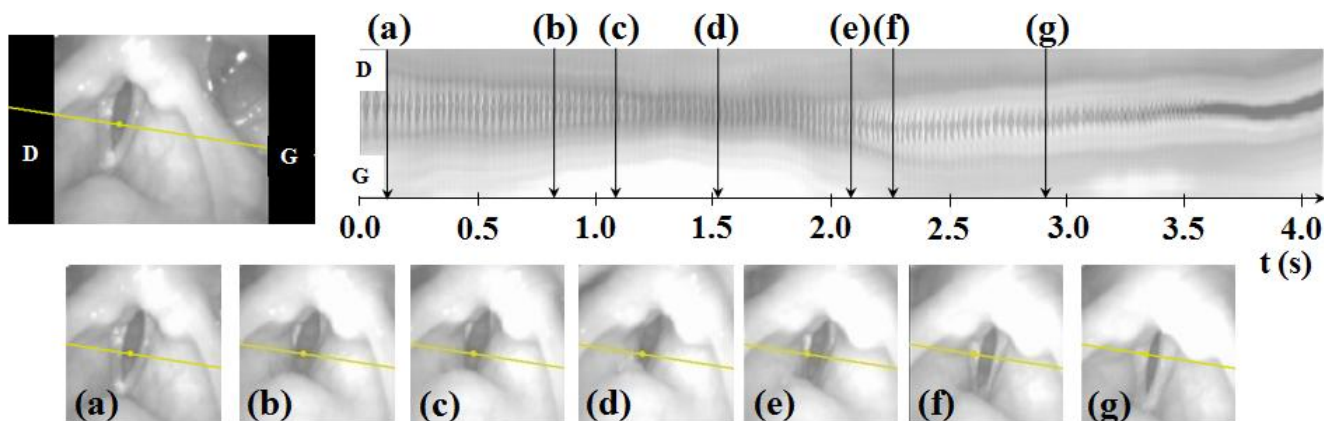


Figure 1: Observation du mouvement ventriculaire lors d'un crescendo-decrescendo

des bandes ventriculaires.

## 3.2 Impact du mouvement ventriculaire sur le son produit

Le rapprochement des bandes ventriculaires modifie de façon conséquente le champ de pression aérodynamique au sein du larynx et impacte le mouvement vibratoire des cordes vocales [6]. Quelle en est la conséquence sur le son produit ? La figure 2 présente l'analyse spectrographique et l'intensité sonore mesurée dans le cas du decrescendo présenté figure 1. Pendant la phase de rapprochement des bandes ventriculaires (phase (a) à (d)), l'intensité sonore varie peu, sans relation apparente avec le mouvement de constriction des bandes ventriculaires. L'analyse spectrographique montre un renforcement spectral entre 2500 et 3500 Hz, concomitant du mouvement ventriculaire. Ce renforcement se situe dans la zone spectrale du « formant du chanteur » [7]. Cette observation appelle à une étude plus approfondie de l'impact spectral d'une constriction ventriculaire, qui dépasse le cadre de la présente étude.

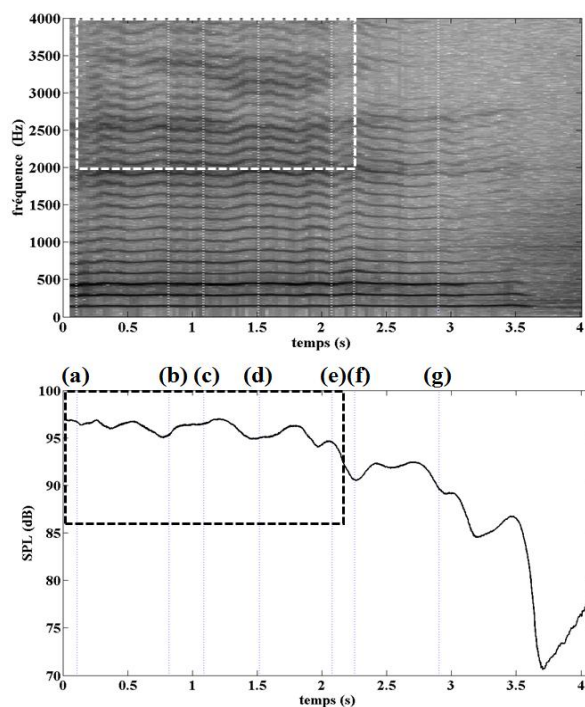


Figure 2 : Analyse spectrographique et intensité vocale (en dB relatif) en fonction du temps, pour le decrescendo présenté sur la figure 1

## 4 Modélisation physique de l'impact aérodynamique d'un mouvement ventriculaire

### 4.1 Modélisation aérodynamique

Pour simplifier l'approche théorique et permettre une résolution analytique du calcul du champ de pression au sein du larynx, l'écoulement d'air translaryngé est supposé laminaire, unidimensionnel, incompressible, et quasi-stationnaire. Il se modélise par trois sous-systèmes aérodynamiques couplés, comprenant :

- la chute de pression à la glotte,  $\Delta P_{cv} = P_{s1} - P_0$
- la dissipation d'énergie cinétique lors du développement du jet d'air plan confiné entre la glotte et la constriction ventriculaire,  $\Delta P_{jet} = P_2 - P_{s1}$
- la chute de pression à la constriction ventriculaire,  $\Delta P_{bv} = P_{s3} - P_2$ .

avec  $P_0$  la pression en amont du plan glottique,  $P_{s1}$  la pression à la séparation du jet en sortie de la glotte,  $P_2$  la pression dans la cavité entre glotte et constriction ventriculaire,  $P_{s3}$  la pression à la séparation du jet en sortie de la constriction ventriculaire.

La chute de pression totale  $\Delta P_{tot}$  est la somme de ces trois composantes. Les chutes de pression glottique et ventriculaire,  $\Delta P_{cv}$  et  $\Delta P_{bv}$ , sont évaluées à partir de la loi de Bernoulli complétée par un modèle de séparation d'écoulement basé sur le critère ad-hoc de 'Liljencrants' :  $P_{s1} = 1.2 P_1$ . Dans le cadre de cette étude, on suppose que  $P_{s3} = 0$ ,  $\Delta P_{jet} = 0$  ( $P_2 = P_{s1}$ ) et que le jet suit une évolution géométrique linéaire suivant la direction de l'écoulement, de pente  $\tan(4^\circ)$ . Pour de plus amples précisions sur les modèles théoriques appliqués, nous référons le lecteur à [4,6].

### 4.2 Modélisation mécanique

Le mouvement d'auto-oscillation des cordes vocales est modélisé par un modèle mécanique symétrique à 2 masses inspiré de [8]. Ce modèle et ses paramètres sont illustrés sur la figure 3.

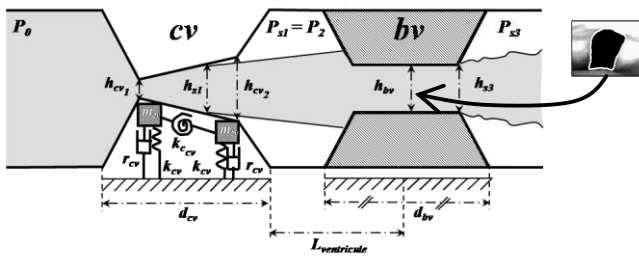


Figure 3 : Schéma des modèles mécanique et aérodynamique utilisés pour la simulation. L'aire ventriculaire  $\tilde{A}_{bv}$  détectée sur les images est introduite comme paramètre d'entrée de la simulation.

### 4.3 Principe de la simulation

Pour la simulation, les modèles aérodynamique et mécanique sont couplés. En plus de la configuration géométrique du conduit laryngé, la pression aérodynamique  $P_0$  et la variation temporelle de l'aire ventriculaire détectée sur les images  $\tilde{A}_{bv}$  sont imposées comme données d'entrée de la simulation ( $P_0 = 1500\text{Pa}$ ). En appliquant le formalisme

décrit en partie 4.1., le débit d'air translaryngé  $\Phi$ , les valeurs de l'ouverture glottique  $h_{s1}$ , et les pressions aérodynamiques  $P_{s1}$ ,  $P_2$  et  $P_3$  (pression au maximum de la constriction ventriculaire) sont déduites.

### 4.4 Application à la simulation d'un cri

La figure 4 illustre la simulation d'un effort vocal, sur l'exemple d'une voix criée. En l'absence de constriction ventriculaire,  $P_2$  serait trouvée identiquement nulle sur l'ensemble de la séquence. Ce n'est pas le cas ici, puisque nous observons une modulation de la pression  $P_2$  en fonction du degré de constriction ventriculaire  $h_{bv}$ . La simulation prédit un recouvrement de pression important dans le ventricule, induit par la vibration des bandes ventriculaires. Ce recouvrement atteint même la pression d'alimentation imposée  $P_0$  à chaque contact ventriculaire (vers  $t=0.01\text{s}$ ,  $0.03\text{s}$  et  $0.05\text{s}$ ), ce qui conduit à l'annulation de la chute de pression glottique  $\Delta P_{cv}$ .

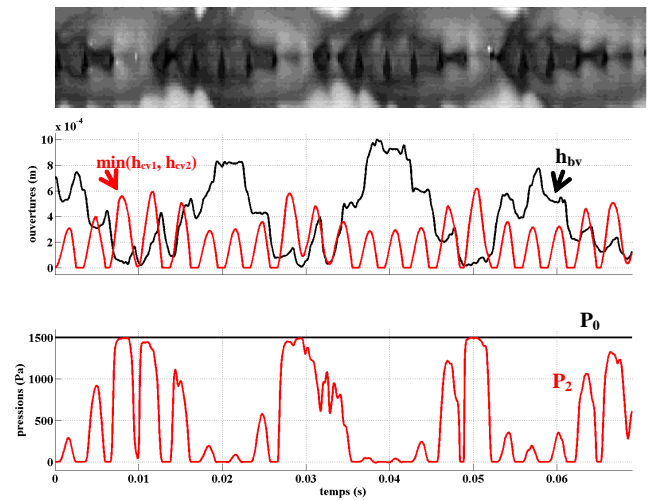


Figure 4 : Simulation d'une séquence de voix criée. La figure du haut présente l'analyse kymographique d'une ligne de la partie médiane des bandes ventriculaires. La figure du milieu l'ouverture ventriculaire détectée in-vivo ( $h_{bv}$ , en noir) et l'ouverture glottique minimale estimée ( $\min(h_{cv1}, h_{cv2})$ ). La figure du bas donne la pression  $P_0$  imposée, et les variations de pression  $P_2$  estimées.

Ceci n'est pas sans conséquence sur le mouvement vibratoire glottique. La théorie prédit une amplification de la vibration glottique par l'accentuation de la constriction ventriculaire. Ainsi, la modélisation de l'interaction aérodynamique entre cordes vocales et bandes ventriculaires conduit à la prédiction d'une altération du cycle d'oscillation glottique pendant le cri, en amplitude et en fréquence. Notons qu'une modification paramétrique de la pression d'alimentation  $P_0$  entre 1000 et 2000Pa préserve le comportement qualitatif des estimations de pression et d'ouverture glottique.

## 5 Conclusion

Loin d'être une structure laryngée passive, les bandes ventriculaires participent au geste phonatoire lors d'un effort vocal. Cette participation peut aller d'un simple rapprochement des bords libres des bandes à un accolement et une mise en vibration. L'accentuation d'une constriction ventriculaire ne semble pas affecter sensiblement l'intensité

vocale produite, mais elle s'accompagne d'un renforcement énergétique dans la zone spectrale du formant du chanteur. Une approche théorique par couplage d'un modèle mécanique classique d'oscillation des cordes vocales à un modèle aérodynamique simplifiée du champ de pression laryngé a été appliquée pour comprendre l'impact aérodynamique de la constriction sur le mouvement vibratoire glottique. En prenant comme donnée d'entrée de la simulation théorique la variation d'aire de la constriction ventriculaire, on observe une altération du mouvement vibratoire glottique concomitant au degré de constriction. Ces observations amènent à se questionner sur le rôle physiologique des bandes ventriculaires dans l'effort et le forçage vocal.

## Remerciements

Nous remercions les huit sujets qui ont participé aux enregistrements endoscopiques. Nous sommes très reconnaissants aux deux équipes hospitalières qui ont permis la constitution de la base de données : Pr. M. Hess, F. Müller, A-K Licht (Poliklinik für Hör, Stimm- und Sprachheilkunde, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, Hamburg, Allemagne) et Dr. L. Crevier-Buchman, C. Vincent (Unité voix du service ORL de l'Hôpital Européen Georges Pompidou et LPP-ILPGA, Paris). Ce projet a bénéficié du soutien de l'action européenne COST 2103 « Advanced Voice Function Assessment » pour les déplacements Grenoble-Hambourg (L. Bailly et F. Müller).

## Références

- [1] Netter F. H. "Atlas d'anatomie humaine", Ed. Masson (2007).
- [2] Haji T., Mori K., Omori K., and Isshiki N.. "Mechanical properties of the vocal fold", *Acta Otolaryngol* (Stock), 112 :559–565 (1992).
- [3] Chan R. W., Fu M., and Tirunagari N. "Elasticity of the human false vocal fold", *Ann. Otol. Rhino. Laryngol.*, 115 :370–381 (2006).
- [4] Bailly, L. "Interaction entre cordes vocales et bandes ventriculaires en phonation : exploration in-vivo, modélisation physique, validation in-vitro", *Thèse de Doctorat de l'Université du Maine* (2009).
- [5] Serrurier, A., and Badin, P. "A three-dimensional articulatory model of nasals based on MRI and CT data", *J. Acoust. Soc. Am.*, 123(4), 2335-2355 (2008).
- [6] Bailly L., Pelorson X., Henrich N., Ruty N. "Influence of a constriction in the near field of the vocal folds: Physical modeling and experimental validation", *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 124 (5), pp. 3296-3308 (2008).
- [7] Sundberg, J. "Level and center frequency of the singer's formant", *J Voice* 15(2): 176-86 (2001).
- [8] Ruty, N. "Modèles d'interactions fluide parois dans le conduit vocal. Applications aux voix et aux pathologies" *Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France* (2007).