



**HAL**  
open science

## Méthode de détermination des paramètres mécaniques du modèle à deux masses des cordes vocales

Nicolas Hermant, Xavier Pelorson, Nicolas Ruty, Annemie van Hirtum, Jorge  
Lucero

► **To cite this version:**

Nicolas Hermant, Xavier Pelorson, Nicolas Ruty, Annemie van Hirtum, Jorge Lucero. Méthode de détermination des paramètres mécaniques du modèle à deux masses des cordes vocales. RJCP 2011 - 9ème Rencontres des Jeunes Chercheurs en Parole, May 2011, Grenoble, France. pp.59. hal-00826546

**HAL Id: hal-00826546**

**<https://hal.science/hal-00826546>**

Submitted on 28 May 2013

**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.

# Méthode de détermination des paramètres mécaniques du modèle à deux masses des cordes vocales

Nicolas Hermant, Xavier Pelorson, Nicolas Ruty, Annemie Van Hirtum, Jorge Lucero

Gipsa-Lab, Département Parole et Cognition, UMR 5216 CNRS/Grenoble INP/UJF/U. Stendhal  
961 rue de la Houille Blanche - Domaine universitaire - BP 46  
38402 Saint Martin d'Hères  
nicolas.hermant@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

## ABSTRACT

Voiced sound production results from an interaction between an air flow coming from the lung, moving structures such as the vocal folds and acoustic resonators, the vocal tract, the trachea and the lungs. Physical modelling of these interactions aims at explaining those aeroelastics or aeroacoustics phenomena but also at predicting them. This prediction aspect is of primary importance concerning the analysis and processing of many voice pathologies.

The main difficulty is to link all the different parameters of the physical modelling with the anatomical and physiological reality. In this proceeding, with a simple theoretical model, a method to define the biomechanical parameters using the structure's mechanical response is presented. The point of this approach is to get rid of arbitrary or *ad-hoc* choices of these parameters. Then, this method is tested using a specific test bench.

**Keywords:** vocal fold, mechanical response, two mass model, biomechanical parameters.

## 1. INTRODUCTION

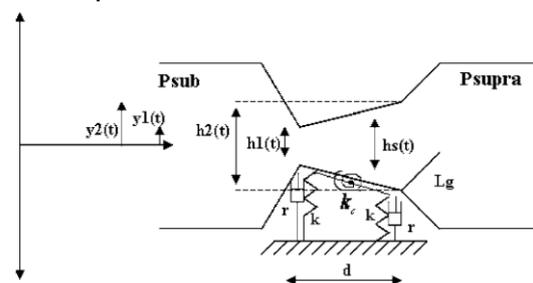
Depuis les travaux pionnier de Van den Berg (1957) [1], Fant (1960) [2], Flanagan (1968) [3] et Ishizaka et Flanagan (1972) [4] un grand nombre de modèles théoriques ont été présentés dans la littérature. Si les théories acoustiques et relatives à l'écoulement d'air ont connu des avancées spectaculaires ces vingt dernières années, la description biomécanique des cordes vocales reste encore lacunaire. Ceci s'explique par la grande complexité de structure des cordes vocales ainsi que par la difficulté d'en mesurer *in vivo* ou *in vitro* les caractéristiques mécaniques. A l'heure actuelle, la majorité des modèles physiques de la phonation reposent sur une description globale de l'élasticité des tissus en termes de constantes localisées. Le modèle à deux masses proposé par Ishizaka et Flanagan (1972) qui est le plus utilisé dans le monde, en dépit de sa simplicité permet de décrire, au moins qualitativement, un nombre important de phénomènes observés lors de la phonation tels que la différence de phase antéro-postérieure lors de l'auto-oscillation, les variations de fréquence fondamentale en fonction de la tension des cordes vocales ou de la pression sous-glottique, l'ordre de grandeur de la pression de seuil d'oscillation...

Cependant, en dépit de sa simplicité, un tel modèle nécessite pas moins de 14 paramètres de commande. Si certains de ces paramètres, tels que les dimensions des cordes vocales ou leur écartement initial, peuvent être raisonnablement déduits, ou au moins estimés, par l'observation anatomique, d'autres, telle que la masse vibrante des cordes vocales, sont plus difficiles à fixer. Enfin, certains paramètres tels que les raideurs et les amortissements des ressorts sont impossibles à déterminer directement, puisque les cordes vocales ne comportent pas de ressorts !

La méthode proposée ici repose sur la mesure de la réponse mécanique de la structure vibrante. De cette réponse mécanique peuvent être extraits des paramètres physiques tels que les fréquences de résonance, les bandes passantes ou les amplitudes associées qui peuvent alors être comparées aux prédictions des modèles théoriques.

## 2. UN MODELE A DEUX MASSES DES CORDES VOCALES

Le modèle théorique que nous considérons est inspiré de la proposition d'Ishizaka et Flanagan (1972) [4], révisée par Lous et al. [5]. Les cordes vocales sont approximées par un système masse-ressort à deux degrés de liberté. Ce modèle reproduit deux modes de vibration de la structure.



**Figure 1 : Modèle mécanique à deux masses des cordes vocales, avec  $y_1$  et  $y_2$  le déplacement de chacune des masses suivant l'axe Y.**

Les équations du mouvement des masses 1 et 2 sont :

$$m_1 \frac{\partial^2 y_1(t)}{\partial t^2} + r_1 \frac{\partial y_1(t)}{\partial t} + k_1 y_1(t) + k_c (y_1(t) - y_2(t)) = f_1$$

$$m_2 \frac{\partial^2 y_2(t)}{\partial t^2} + r_2 \frac{\partial y_2(t)}{\partial t} + k_2 y_2(t) + k_c (y_2(t) - y_1(t)) = f_2$$

On ramène ce système d'équations à une équation de forme matricielle :

$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = F(\omega)e^{i\omega t}$ , en posant le vecteur déplacement  $y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix}$ .

Avec  $M$  la matrice de rigidité,  $C$  la matrice d'amortissement,  $K$  la matrice de raideur et  $F(\omega)$  l'excitation harmonique imposée au système. Il est possible de déduire la réponse mécanique théorique de ce système par une analyse modale. On peut alors déterminer la fonction de transfert modale du mode  $j$  :

$$H_j(\omega) = \frac{R_j(\omega)}{F_j(\omega)} = \frac{1}{[-\omega^2 M_j + i\omega C_j + K_j]}$$

Avec pour chaque mode  $j$ , les matrices structurelles du système :

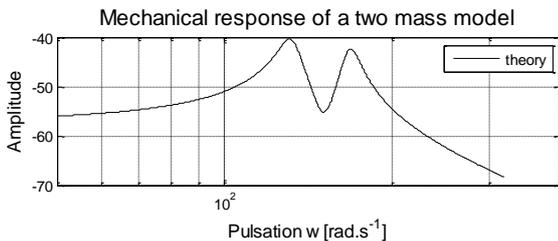
$$M_j = \phi_j^T M \phi_j \text{ la masse modale}$$

$$C_j = \phi_j^T C \phi_j \text{ l'amortissement modal}$$

$$K_j = \phi_j^T K \phi_j \text{ la rigidité}$$

$$F_j = \phi_j^T F(\omega) \text{ correspond à l'excitation modale}$$

$R_j(\omega)$  correspond à la coordonnée modale  $R_j(\omega)$  et  $\phi_j$  au vecteur propre du mode  $j$ . On obtient la réponse fréquentielle globale du système  $Y(\omega)$  à l'aide de la méthode de superposition modale. La réponse mécanique finalement obtenue est représentée, pour un exemple, sur la Figure 2.



**Figure 2 : Exemple de réponse mécanique théorique obtenue avec le modèle à deux masses**

Le problème aux valeurs propres permet de trouver l'expression des fréquences de résonances et se résout par la recherche des solutions  $\omega_0^2$  vérifiant l'équation suivante :

$$\begin{vmatrix} k_1 + k_c - \omega_0^2 m_1 & -k_c \\ -k_c & k_2 + k_c - \omega_0^2 m_2 \end{vmatrix} = 0$$

En posant  $\lambda = \omega_0^2$  on se ramène à une équation du second degré à coefficients constants:

$$m_1 m_2 \lambda^2 - \lambda [k_1 m_2 + k_2 m_1 + k_c (m_1 + m_2)] + k_1 k_2 + (k_1 + k_2) k_c = 0$$

Le modèle à deux masses que l'on utilise pour décrire le comportement vibratoire des cordes vocales est un modèle symétrique pour lequel on pose  $m = m_1 = m_2$  et  $k = k_1 = k_2$ . Pour ce cas particulier les équations décrites ci-dessus se simplifient et l'on trouve les deux pulsations de résonance suivantes :

$$\omega_{01}^2 = \frac{k}{m} \quad \omega_{02}^2 = \frac{k+2k_c}{m}$$

L'hypothèse faite sur l'égalité des deux masses et des deux raideurs de notre modèle à deux masses se justifie par le fait qu'il n'y a aucun sens physique à définir une dissymétrie dans le cadre de l'étude de cordes vocales non-pathologiques.

### 3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

De façon à mesurer la réponse mécanique des cordes vocales un dispositif expérimental a été mis en place, d'après [6] et [7], permettant la répétabilité de la mesure.

#### 3.1. Description du dispositif

Le dispositif expérimental, cf. Figure 4 et Figure 5, est composé d'un réservoir de pression [b] correspondant aux poumons et qui est alimenté par un compresseur d'air. La maquette de cordes vocales [a] est reliée au réservoir par un tube en métal et est constituée d'armatures métalliques qui entourent un latex fin (épaisseur= 0,3mm) remplis d'eau sous pression [j] et [j']. La pression interne des deux « cordes vocales », i.e. la pression de l'eau, est contrôlée par des réservoirs d'eau [d] et [d'] dont la hauteur est choisie en fonction de la pression interne souhaitée. Les deux cordes vocales sont ensuite enserrés entre un bout de latex plus épais et deux pièces métalliques afin d'assurer l'étanchéité du dispositif, cf.

Figure 3.



**Figure 3 : Maquette des cordes vocales**

Les cordes vocales sont alors excitées à l'aide d'une chambre de compression [h] délivrant une excitation acoustique sinusoïdale qui balaie les fréquences allant de 50 Hz à 400 Hz par pas de 1 Hz. Un embout conique est vissé sur la chambre de compression afin de diriger le son émis vers les cordes vocales pour les faire vibrer. La réponse en fréquence des cordes vocales est obtenue grâce à un système de mesure optique [f]. Un faisceau laser passe au travers de la maquette cordes vocales vers une photodiode [g]. La modulation d'intensité du faisceau laser permet la mesure du déplacement des cordes vocales.



**Figure 4 : Photo du dispositif permettant d'obtenir la réponse mécanique mesurée des cordes vocales**

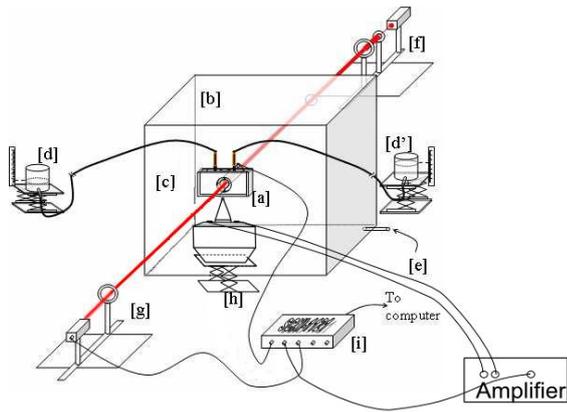


Figure 5 : Schéma du dispositif expérimental de l'appareil phonatoire

### 3.2. Comparaison des réponses mécaniques théoriques et expérimentales

Dans le modèle théorique à deux masses décrit ci-dessus, les valeurs des paramètres mécaniques (masse, raideur, amortissement) que l'on utilise afin de déterminer la réponse mécanique des cordes vocales ne sont pas évidentes à définir. Pour comparer les modèles théorique et expérimental il est nécessaire d'utiliser des valeurs cohérentes dans le modèle théorique. Par le biais des mesures il est donc possible d'extraire les fréquences de résonances  $f_{01,exp} = \frac{\omega_{01,exp}}{2\pi}$  et  $f_{02,exp} = \frac{\omega_{02,exp}}{2\pi}$  ce qui permet, d'après les formules décrites dans la partie 2, d'obtenir des valeurs de  $m$ ,  $k$ ,  $k_c$  (en fixant initialement une de ces trois valeurs). Ainsi les fréquences de résonance du modèle théorique sont les mêmes que celles mesurées.

Les coefficients d'amortissement  $r_1$  et  $r_2$  du modèle à deux masses sont également définis égaux d'après la même hypothèse de symétrie des cordes vocales. On définit donc  $r = r_1 = r_2 = 2m\xi_1\omega_{01}$  avec  $\xi = \xi_1 = \xi_2 = \frac{1}{2Q_1}$  qui correspond au pourcentage d'amortissement critique du premier mode et  $Q_1$  le facteur de qualité du premier mode dont la valeur peut être extraite de la mesure. On peut également relier  $m$  et  $Q_1$  par la formule suivante :  $m = \frac{rQ_1}{\omega_{01}}$ .

La Figure 6 représente un exemple de résultats. La courbe théorique a été obtenue en considérant que la masse  $m$  d'eau vibrante dans la maquette est égale à  $3,14 \cdot 10^{-4}$  kg (sachant que la masse d'eau réellement contenue dans la maquette est égale à  $4,65 \cdot 10^{-4}$  kg) et en déterminant  $k = 297 \text{ N.m}^{-1}$  et  $k_c = 36,6 \text{ N.m}^{-1}$  à l'aide des fréquences de résonances mesurées, ainsi que  $r = 0,026$  à l'aide de la mesure du facteur de qualité.

### 3.3. Répétabilité des mesures

Nous avons répété la même mesure de réponse mécanique de cordes vocales plusieurs fois à la suite. La Figure 7 ci-dessus présente ces réponses mécaniques.

Il convient de noter que les mesures 2 à 8 ont été faites à quelques heures d'intervalle alors que la mesure 1 et la mesure 9 ont été faite à quelques jours d'intervalles.

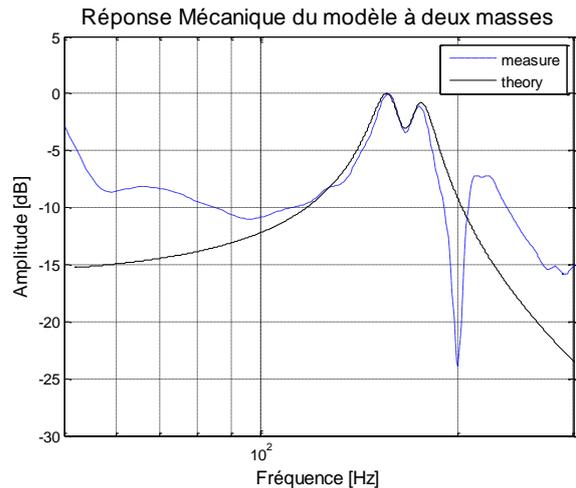


Figure 6 : Comparaison des réponses mécaniques théoriques (en noir) et expérimentales (en bleu) des cordes vocales

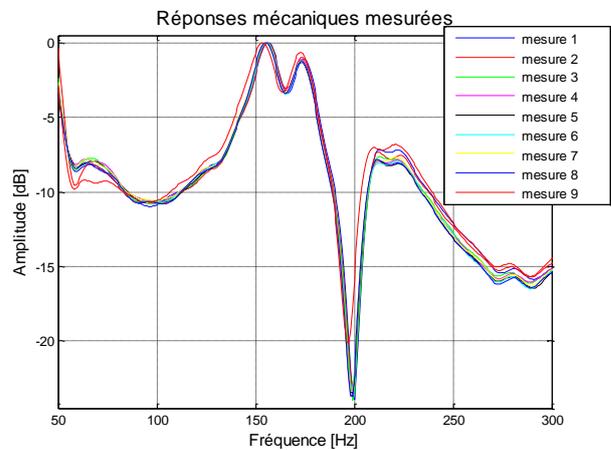


Figure 7 : Résultat de la répétition d'une même mesure de réponse mécanique de « cordes vocales »

Le Tableau 1 présente les déviations standards des résultats obtenus avec ces mesures. On estime la précision de mesure inférieure à +/- 10%.

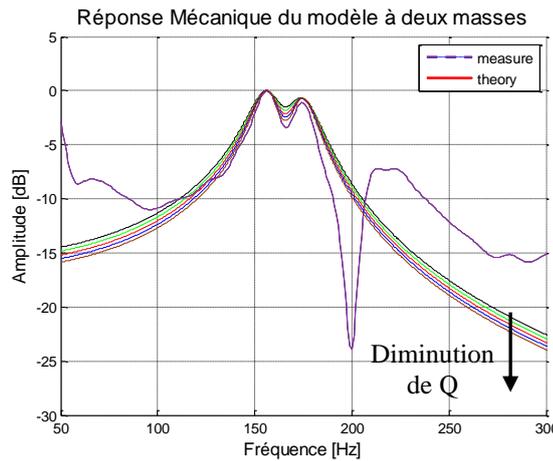
Tableau 1 : Déviation standard des fréquences de résonance et des facteurs de qualité mesurés

	1 <sup>er</sup> pic	2 <sup>e</sup> pic
Fréquence de résonance	0.64	0.46
Facteur de qualité Q	0.29	0.07

### 3.4. Sensibilité des paramètres

Comme on l'a vu les paramètres  $m$ ,  $k$ ,  $k_c$  et  $Q_1$  vont permettre de définir la position, l'amplitude et la largeur des pics de résonance. Il est donc intéressant de voir l'effet de la variation de ces paramètres sur ces critères.

La Figure 8 illustre les variations de la réponse mécanique avec différentes valeurs de  $Q_1$ . Ici  $m$  est fixé et les valeurs de  $k$  et de  $k_c$  sont déterminées afin de faire correspondre les fréquences de résonances théoriques et expérimentales.



**Figure 8 : Influence du facteur de qualité sur la réponse mécanique théorique du modèle à deux masses**

Si l'on fait varier en même temps les paramètres  $k$  et  $k_c$  ou  $m$  et  $k_c$  on peut observer les variations des fréquences de résonance. La Figure 9 illustre la variation des fréquences de résonance théoriques par rapport aux fréquences de résonances expérimentales, soit :

$$\frac{\Delta f_{0,\text{théo}}}{\Delta f_{0,\text{exp}}} = \frac{f_{02,\text{théo}} - f_{01,\text{théo}}}{f_{02,\text{exp}} - f_{01,\text{exp}}}$$

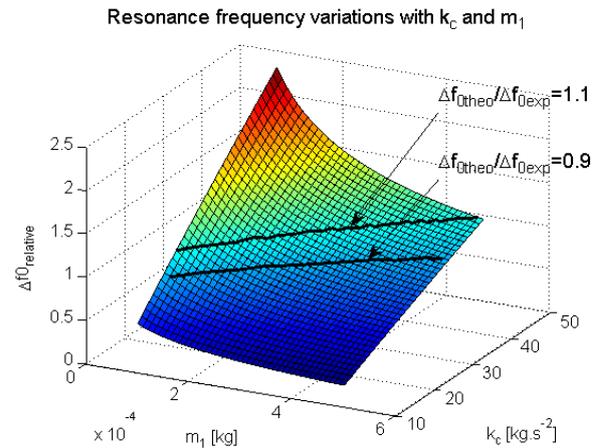
Les lignes tracées en noir correspondent à des écarts de +/- 10% par rapport aux fréquences de résonance. Connaissant les valeurs que l'on a fixées pour  $k$  et  $m$  (Figure 6) on peut en déduire des intervalles de valeurs pour lesquels les valeurs des fréquences de résonances sont dans l'intervalle de tolérance souhaité.

La détermination de ces intervalles d'erreurs nous permet de savoir comment il est possible de faire varier les valeurs des paramètres mécaniques du modèle à deux masses tout en étant sûr d'obtenir des résultats compris dans une zone de tolérance choisie. De l'analyse globale et systématique des variations des paramètres, il apparaît que pour des valeurs fixées des raideurs  $k$  et  $k_c$ , la plage de variation de  $m$  est faible (de l'ordre de 10 %) ce qui

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.W. Van der Berg. On the air response and the Bernoulli effect of the human larynx. *JASA*, 29:626-631, 1957
- [2] G. Fant. Acoustic theory of speech production. *Mouton and Co.*, 1960
- [3] J. L. Flanagan, L. L. Landgraf. Self oscillating source for vocal tract synthesizers. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 16(1):7-64, 1968
- [4] K. Ishizaka, J.L. Flanagan. Synthesis of voiced sounds from a two mass model of vocal folds. *The Bell System Technical Journal*, volume 51(6):233-1267, 1972
- [5] N. J. C. Lous et Al. A symmetrical two mass model coupled to a vocal tract and trachea, with application to prosthesis design. *Acta Acustica*,

physiquement est satisfaisant. Par contre, lorsque la masse  $m$  est fixée, l'intervalle de tolérance pour  $k$  et  $k_c$  peut atteindre 100 %.



**Figure 9 : Influence du choix des valeurs de  $m$  et  $k_c$  sur les valeurs de fréquences de résonances**

## 4. CONCLUSION

L'intérêt de la méthode présentée est de s'affranchir de tout choix arbitraire pour la détermination des paramètres de commande d'un modèle théorique des cordes vocales. Ceci a été illustré dans le cas d'un modèle simple, le modèle à deux masses, mais pourrait tout à fait être adapté à d'autres approches (modèles continus, simulations par éléments finis ...). Notons, enfin, que la technique de mesure de la réponse mécanique, très simple à mettre en œuvre et non invasive, peut être également adaptée à d'autres dispositifs expérimentaux, voire à la mesure *in vivo*. Ceci permettrait de déduire des paramètres mécaniques du modèle à deux masses pour mimer le comportement de cordes vocales réelles. En effet en reprenant des résultats de travaux de Svec sur la mesure de réponses impulsionnelles des cordes vocales humaines [9], il a été possible de calculer ces paramètres.

84:1135-1150, 1998

- [6] N. Ruty, X. Pelorson, A. Van Hirtum, I. Lopez, A. Hirschberg. An in vitro setup to test the relevance and the accuracy of low-order vocal folds models. *JASA*, 121:479-490, 2007
- [7] N. Ruty, X. Pelorson, L. Bailly, A. Van Hirtum, A. Hirschberg. Modélisation théorique et validation expérimentale des interactions fluide/structure dans le larynx. In *Proceedings of the 18e Congrès Français de Mécanique*, 2007
- [8] N. Ruty. *Modèles d'interactions fluides parois dans le conduit vocal. Applications aux voix et aux pathologies*. PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007
- [9] J.G. Svec. Resonance properties of the vocal folds: *In vivo* laryngoscopic investigation of the externally excited laryngeal vibrations. *JASA*, 108:1397-1407, 2000