



HAL
open science

Étude modale d'une clarinette

Matteo Luca Facchinetti, Andrei Constantinescu, Xavier Boutillon

► **To cite this version:**

Matteo Luca Facchinetti, Andrei Constantinescu, Xavier Boutillon. Étude modale d'une clarinette. 5e Colloque National en Calcul des Structures, 2001, Giens, France. hal-00116169

HAL Id: hal-00116169

<https://hal.science/hal-00116169>

Submitted on 6 May 2024

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.

Etude modale d'une clarinette

Matteo Luca Facchinetti^{1,2}, Andrei Constantinescu², Xavier Boutillon³

¹ LadHyX - CNRS, Ecole Polytechnique Paris, 91128 Palaiseau

matteo@ladhyx.polytechnique.fr

² LMS - CNRS, Ecole Polytechnique Paris, 91128 Palaiseau

constant@lms.polytechnique.fr

³ LAM - CNRS, Université Paris 6, 75015 Paris

xb@ccr.jussieu.fr

Résumé

Ce travail est une contribution à la compréhension de la dynamique d'une clarinette en conditions de jeu. On propose une modélisation complète de l'instrument, en éléments finis fluides et solides, dont on analyse les modes propres réels : les résultats sont comparés avec des mesures expérimentales, par interférométrie holographique, en validant ainsi le modèle numérique.

1 Introduction

La clarinette est un instrument à vent à anche simple. L'anche est une petite lame en roseau qui vibre au passage de l'air, soufflé par le musicien à travers le bec. L'air passe ensuite par le barillet et le reste du tuyau de la clarinette, rayonnant ainsi le son.

Les modèles physiques existants pour la clarinette sont proposés sous la forme générale d'un oscillateur à un seul degré de liberté, qui fournit une description essentiellement qualitative du comportement dynamique de la clarinette. Dans ce travail on se propose de passer à un modèle en éléments finis de la clarinette complète.

Les différentes parties de la clarinette - anche, bec, barillet, partie supérieure et inférieure, pavillon - sont représentées en Figure (1), avec les respectives modèles : on a choisi des éléments finis solides et fluides pour l'anche et la première partie de la colonne d'air, alors que le reste du tuyau est synthétisé par un système d'oscillateurs.

L'analyse modale est développée en considérant au début l'anche toute seule ; ensuite, on analyse l'évolution des modes propres du système à fur et à mesure que les parties de l'instrument sont connectées. Le modèle est validé par la mesure expérimentale des modes propres de l'anche couplée avec bec et barillet.

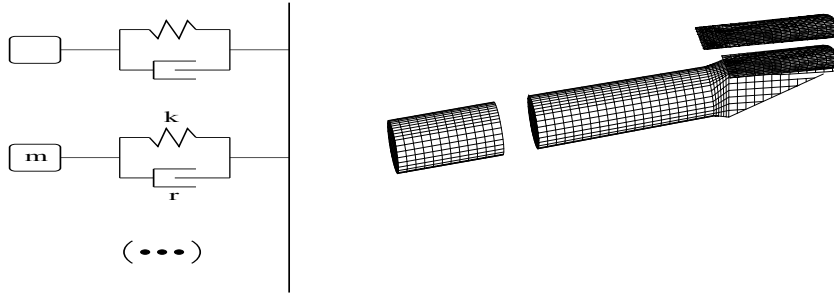


FIG. 1: La clarinette : ses parties et leurs modèles.

masse volumique	ρ	=	450	kg/m^3
module de Young longitudinale	E_L	=	10000	MPa
module de Young transverse	E_T	=	400	MPa
module de cisaillement	G_{LT}	=	1300	MPa
coefficient de Poisson	ν_{LT}	=	0.22	

TAB. 1: Propriétés mécaniques du roseau sec [10, 7].

2 Anche

La géométrie de l'anche a été mesurée précisément à l'aide des machines à coordonnées [3]. Sa surface est obtenue par interpolation, en définissant une fonction d'épaisseur, symétrique par rapport à l'axe longitudinale.

Les anches sont fabriquées en roseau, un matériau végétal naturel, fibreux, a priori anisotrope et hétérogène. Qu'on va supposer avec un comportement élastique isotrope transverse, afin de prendre en compte l'orientation des fibres, mais en négligeant pour l'instant les hétéro-généités et ainsi que le comportement visqueux ou plastique, qui lié au caractère hydrophile du roseau. Sous ces hypothèses, cinq paramètres décrivent le matériau : la masse volumique ρ , les modules de Young longitudinal E_L et transversale E_T , le module de cisaillement G_{LT} et le coefficient de Poisson ν_{LT} (tableau 1). Les valeurs de ρ , E_L et ν_{LT} provient des mesures statiques sur un échantillon de roseau sec [10] ; les autres provient d'une comparaison entre des mesures expérimentales des modes propres d'une anche et des calculs par modélisation en éléments finis [7].

L'anche est considérée encastée au niveau la section qui correspond à la position de la ligature qui la serre sur le bec. Le modèle est implémenté dans le code Castem [1], en considérant des éléments finis linéaires du type Love-Kirchhoff.

Les premiers fréquences propres apparaissent auor de $2.5 kHz$. Les modes correspondants sont représentées dans la figure (2). On remarque des déformées modales de flexion, longitudinale (FL) et transverse (FT), et de torsion (T). Ces résultats sont stables par rap-

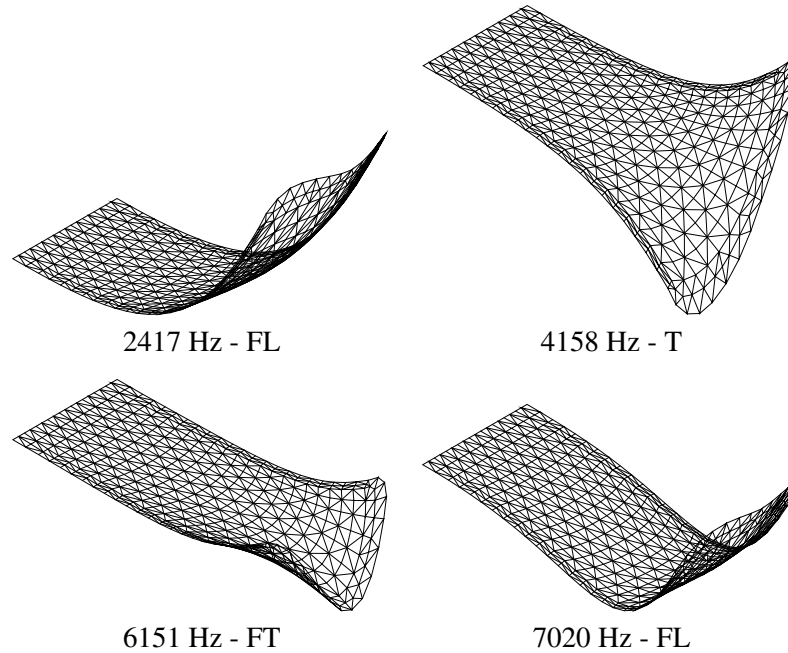


FIG. 2: Premiers quatre modes propres calculés pour l'anche seule.

port à la densité du maillage et en accord avec précédentes simulations numériques [7].

3 Bec et barillet

Dans la suite on va pas modéliser exactement le bec et le barillet comme des corps solides, mais la cavité acoustique qu'ils enveloppent. Leur géométrie interne a été mesurée avec les mêmes machines de mesure à coordonnées utilisées pour les anches. Le volume d'air ainsi défini est maillé avec des éléments finis linéaires à géométrie tétraédrique et prismatique (6 ou 8 nœuds). On considère l'air comme un fluide en petites perturbations autour d'un écoulement moyen, en utilisant les équations classiques de l'acoustique linéaire. En ce qui concerne les conditions aux limites, les surfaces ouvertes sont caractérisées par une pression acoustique nulle, et les parois rigides par un flux normal nul, exprimé comme annulation de la dérivée de la pression acoustique par rapport à la direction normale à la paroi. A la frontière entre le milieu solide (anche) et le fluide (air dans le bec), on a des conditions d'interface classiques, à savoir continuité des contraintes et des déplacements. Une description détaillée des équations du problème aux valeurs propres pour un système couplé fluide-solide, ainsi que sa modélisation en éléments finis, est donnée en [2].

Les calculs des modes propres concernent l'anche couplée avec le bec et ensuite aussi avec le barillet : les résultats sont synthétisés dans le tableau 2. Pour la dernière configuration, légèrement modifiée par la présence du barillet ouvert, au lieu d'un barillet connecté avec le reste du tuyau, on a vérifié expérimentalement les premières quatre modes propres (Figure 3). L'emploi de l'interférométrie holographique est classique en l'analyse mo-

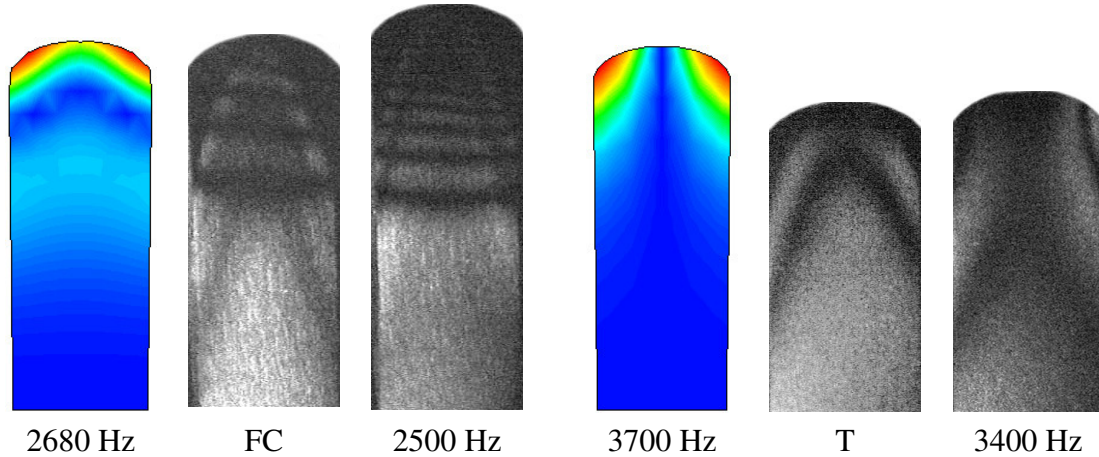


FIG. 3: *Déformées modales calculées pour une anche couplée avec bec et barillet ouvert (à gauche) and mesures expérimentales correspondantes (à droite).*

dale des systèmes acoustiques [6, 8, 10, 9]. L’anche a été serrée sur le bec exactement comme en conditions de jeu, mais en remplaçant la ligature avec du scotch opaque, afin d’éviter tous problèmes de réflexion parasite lors des essais. L’anche est excitée acoustiquement par moyen d’un haut-parleur branché à un générateur de basses fréquences. La détermination des fréquences propres a été possible à l’aide d’une petite feuille piezo-électrique (épaisseur 0.05mm , masse 0.06g) collée sur la surface de l’anche en face au bec et sensible à ses déformations : les fréquences de résonance correspondent donc aux maxima du signal enregistré. La visualisation des modes propres par interférométrie holographique, décrite en détail dans [9], permet d’évaluer les lignes d’iso-déplacement sur la surface de l’anche (Figure 3), avec une résolution d’un demi de la longueur d’onde de la source laser utilisée ($\sim 0.3\mu\text{m}$). Le déplacement maximum de l’anche étant négligeable par rapport au jeu entre celle-ci et la surface d’appui du bec, au niveau d’excitation utilisé, permet d’exclure la présence des conditions de contact unilatérales dans le système.

ANCHE		ANCHE + BEC		ANCHE + BEC + BARILLET	
Hz	type	Hz	type	Hz	type
		1854	FL	1337	FL
2417	FL	2361	FL	2333	FL
				2989	FL
4158	T	4119	T	4119	T
		4203	FC	4608	FC
6151	FT	5946	FT	5918	FT
		6344	FC	6261	FC
7020	T	6973	T	6969	T
				7598	FC
8316	FT	8260	FT	8260	FT

TAB. 2: *Evolution des fréquences propres pour les systèmes : anche, anche+bec et anche+bec+barillet.*

Les modes propres calculés apparaissent dans le même ordre que celles mesures, avec des écarts en fréquences au dessous de 10% – 20% par rapport aux expériences. Cependant, on s’aperçoit que les anches réelles ont un comportement dynamique asymétrique,

alors que le modèle a été conçu par choix parfaitement symétrique par rapport à son axe longitudinal, en terme de géométrie et de loi de comportement. Cependant, la cohérence de la comparaison entre calculs et mesures permet de valider le modèle couplé fluide-solide, dans le cadre des hypothèses admises. En détail, on a développé une analyse de sensibilité pour tester la variation des fréquences propres en fonction des caractéristiques mécaniques de l'anche et des propriétés acoustiques de l'air : chaque paramètre est varié de $\pm 5\%$ autour de sa valeur moyenne, correspondant aux résultats des calculs, et les conséquentes modifications des fréquences propres sont reportées dans le tableau (3).

mode Hz	E_L 10e4 MPa	E_T 400 MPa	G_{LT} 1300 MPa	ν_{LT} 0.22	$-\rho_s$ 450 kg m ⁻³	c 340 m s ⁻¹	$-\rho_f$ 1.23 kg m ⁻³
1190 Hz	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	9.8	<0.1
2010 Hz	2.4	<0.1	<0.1	<0.1	2.2	0.7	0.4
2680 Hz	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	9.6	<0.1
3700 Hz	1.5	<0.1	3.1	<0.1	4.6	<0.1	<0.1
4010 Hz	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	9.3	<0.1
4740 Hz	4.9	<0.1	<0.1	<0.1	4.8	2.7	0.1
5280 Hz	0.6	<0.1	<0.1	<0.1	0.9	8.1	0.1
6300 Hz	1.7	0.9	4.9	<0.1	6.4	3.2	<0.1

TAB. 3: Analyse de sensibilité : variations en % des fréquences propres par rapport aux variations de 10% des caractéristiques mécaniques de l'anche et des propriétés acoustiques de l'air.

L'influence du module de Young transverse E_T et du coefficient de Poisson ν_{LT} est très faible. Les fréquences des modes à 1190 Hz, 2680 Hz et 4010 Hz varient linéairement par rapport à la célérité du son dans l'air : on comprend qu'il s'agit de modes "air", pour lesquels l'énergie est localisée sous forme acoustique principalement dans le volume fluide, alors que l'anche est soumise à une faible déformation de flexion longitudinale. Par contre, le mode à 3400 Hz n'est pas influencé par les propriétés acoustiques de l'air : sa sensibilité au module de cisaillement G_{LT} suggère qu'il s'agit d'un mode de torsion pour l'anche, qui est donc faiblement couplé avec le volume fluide et peut être considéré comme un mode "anche". La longueur caractéristique de la déformée modale est bien inférieure à la demi-longueur d'onde du son dans l'air à sa fréquence ($\lambda \sim 10cm$). Il en résulte un court-circuit acoustique dans la première partie du bec, qui empêche tout couplage entre l'anche et l'air du bec et du barillet : cela explique la presque uniformité du champ de pression acoustique pour ce mode, sauf au voisinage de l'anche (Figure 4). C'est aussi le cas du mode à 6300 Hz, qui s'avère du type flexion transverse pour l'anche.

En synthèse, on peut revenir au tableau (2) : le couplage entre l'anche et le volume d'air détermine un effet principal de masse ajoutée, qui baisse les fréquences propres des modes, notamment en exclusion de ceux de torsion et flexion transverse pour l'anche. La présence d'une cavité acoustique avec ses résonances porte aussi à des nouveaux modes propres, pour lesquels la déformée de l'anche est toujours de flexion longitudinale, ou bien mixte entre flexion longitudinale et transverse : ce type de déformée n'était pas observable en considérant l'anche toute seule.

4 Tuyau

Afin de modéliser le reste de la clarinette, utiliser des éléments finis d'air apparaît une solution numériquement trop coûteuse et scientifiquement inutile. En effet, déjà à l'intérieur du barillet, le champ acoustique est constitué essentiellement d'ondes planes, se propageant en direction longitudinale (Figure 4) : la partie restante du tuyau peut donc être considérée comme un système 1D et complètement identifiable par sa impédance acoustique d'entrée

$$Z_a(\omega) = \frac{p}{U} \quad (1)$$

où p et U sont respectivement la pression acoustique et le débit acoustique à la section d'entrée du tuyau. Cette fonction de transfert acoustique, mesurée par Vincent Gibiat [4, 5] pour différentes notes d'une clarinette, peut être associée à une impédance mécanique

$$Z_m(\omega) = \frac{F}{v} = \frac{1}{S^2} Z_a(\omega) \quad (2)$$

où F et v sont respectivement la force appliquée et la vitesse à la surface d'entrée. On peut donc imaginer de reproduire une impédance acoustique avec un système mécanique à paramètres concentrés, par exemple en associant chaque pic de résonance de la fonction $Z_a(\omega)$ à un oscillateur, pour lequel on a

$$Z_m(\omega) = \frac{i}{\frac{1}{m_i \omega} - \frac{\omega}{k_i + i\omega r_i}} \quad (3)$$

où m_i , r_i , k_i sont respectivement sa masse, son amortissement et sa raideur. Pour chaque note, l'ensemble des oscillateurs correspondant est connecté au fond du barillet par interposition d'une plaque rigide de masse négligeable, libre de se déplacer seulement en direction longitudinale (Figure 1). Les paramètres m_i , r_i , k_i des oscillateurs sont identifiés par minimisation d'une fonction coût \mathcal{J} qui mesure l'écart entre le module et la phase des impédances mesurée et calculé

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &= \alpha \parallel \text{Mod}(Z_{comp}) - \text{Mod}(Z_{meas}) \parallel \\ &+ \beta \parallel \text{Arg}(Z_{comp}) - \text{Arg}(Z_{meas}) \parallel \end{aligned} \quad (4)$$

Les calculs ont été développés en utilisant l'algorithme *Nelder-Mead-Simplex-Search* du logiciel `Matlab`. Une comparaison entre impédances (module et phase) mesurée et calculée pour la note MI grave de la clarinette est présentée en Figure (5).

Un mode propre de la clarinette complète est présenté en Figure (6) : l'amplitude du mouvement de chaque oscillateur est associée à la longueur de la ligne qui le connecte à la plaque de raccord avec le fond du barillet.

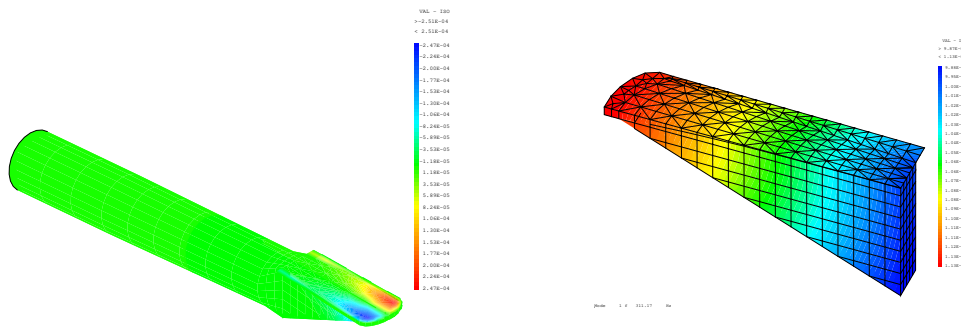


FIG. 4: Champs de pression acoustique : mode à 4119Hz pour le système ancho+bec+barillet (à gauche) et détail du mode à 311Hz pour la clarinette complète en configuration MI grave.

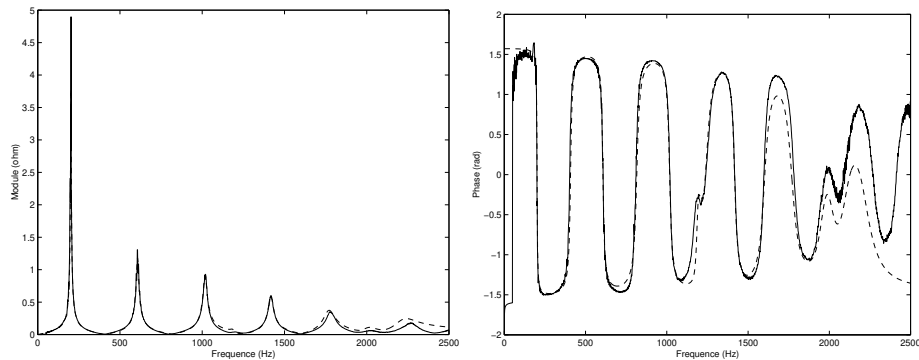


FIG. 5: Impédance mesurée (trait continu) et calculée (trait pointillé) pour la note MI grave de la clarinette.

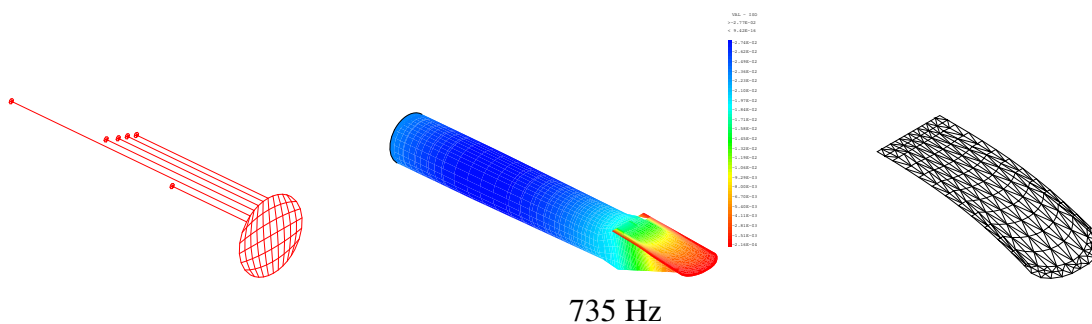


FIG. 6: Représentation modale de la clarinette complète : mouvement du système d'oscillateurs (à gauche), champ de pression acoustique dans bec et barillet (au milieu) et déplacement de l'anche (à droite). Mode propre réel pour la note SOL \sharp aiguë.

5 Conclusions et perspectives

L'analyse modale présentée est bien corrélée avec les expériences et valide le modèle numérique. Les résultats montrent que l'intime couplage entre l'anche et la cavité acoustique de l'instrument est primordiale pour la compréhension de la dynamique de l'instrument.

Le modèle présenté peut être considéré comme un point de départ pour aborder l'analyse dynamique de la clarinette en conditions de jeu.

6 Remerciements

Les auteurs aimeront remercier Holger Vach (Ecole Polytechnique) et Vincent Gibiat (ESPCI - Paris) pour la précieuse collaboration à la partie expérimentale.

Références

- [1] *Castem : Finite Element Code*, www.castem.org :8001.
- [2] A. Combescure, R.J. Gibert, F. Jeanpierre, A. Hoffmann, and M. Livolant. Fluid-structure interaction : a general method used in the ceasemt computer programs. *Computers & Structures*, 12 :471–474, 1980.
- [3] M.L. Facchinetti, X. Boutillon, and A. Constantinescu. Application of modal analysis and synthesis of reed and pipe to numerical simulations of a clarinet. *Journal of the Acoustical Society of America*, 108((5) Pt2) :2590 (A), 2000.
- [4] V. Gibiat. Mesures d'impédance acoustique pour la clarinette. *proprietary software and personal communication*, 1999.
- [5] V. Gibiat and F. Laloe. Acoustical impedance measurements by the 2-microphone-3-calibration (tmtc) method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 88(6) :2533–45, 1990.
- [6] P.L. Hoekje and G.M. Roberts. Observed vibration patterns of clarinet reeds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99((4) Pt2) :2462 (A), 1996.
- [7] B. Laine and F. Pinard. Etude numérique des modes propres d'une anche de clarinette. *Ecole Polytechnique*, 1998.
- [8] I.M. Lindevald and J. Gower. Vibrational modes of clarinet reeds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102((5) Pt2) :3085 (A), 1997.
- [9] K. Menou, B. Audit, X. Boutillon, and H. Vach. Holographic study of a vibrating bell : an undergraduate laboratory experiment. *American Journal of Physics*, 66(5) :380–385, 1998.
- [10] F. Pinard and B. Laine. Etude préliminaire d'une anche de clarinette. *Ecole Polytechnique*, 1997.