



**HAL**  
open science

# Influence de la géométrie de la fenêtre des instruments de type flûte sur leurs résonances passives

Augustin Ernoult, Benoît Fabre

► **To cite this version:**

Augustin Ernoult, Benoît Fabre. Influence de la géométrie de la fenêtre des instruments de type flûte sur leurs résonances passives. 22eme Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. hal-02428031

**HAL Id: hal-02428031**

**<https://hal.science/hal-02428031>**

Submitted on 4 Jan 2020

**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.

# Influence de la géométrie de la fenêtre des instruments de type flûte sur leurs résonances passives.

**A. ERNOULT<sup>a,b</sup>, B. FABRE<sup>a,b</sup>**

a. Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, UMR 7190, LAM, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005, Paris, France. ernoult@lam.jussieu.fr

b. CNRS, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, F-75005, Paris, France.

## Résumé :

*Dans les instruments de la famille des flûtes, le son est produit par l'interaction d'un jet d'air avec un biseau. L'extrémité du résonateur proche du biseau est une extrémité ouverte, appelée fenêtre. Les conditions aux limites imposées par cette ouverture dépendent de sa géométrie. Cette ouverture influe d'une part sur les fréquences de résonances passives du résonateur mais aussi sur l'estimation des termes sources. Cependant l'influence de la fenêtre en fonction de sa géométrie est souvent estimée grossièrement, seule une étude en a proposé une modélisation. L'étude présentée ici se base sur une comparaison entre mesure, simulations numériques par élément finis et modélisation analytique afin de proposer une description de l'impédance associée à cette ouverture, spécifique aux instruments de type flûte.*

## Abstract :

*In flute-like instruments, sound is generated by a jet-edge interaction. The resonator's extremity close to the edge is an open-end, called "window". This opening influences both the passive resonances of the resonator and sources mechanisms. In the literature this influence is often very approximately estimated, only Verge proposed a model of its impedance. This study is based on a comparison between measurements, simulations by finite elements and analytic formulations in order to provide a description of the impedance associated this opening specific of flute-like instruments.*

**Mots clefs : Instruments de type-flûte, Impédance, Éléments finis**

## 1 Introduction

Les instruments à embouchure de type flûte regroupent l'ensemble des instruments dont le son est produit par l'interaction d'un jet d'air avec un biseau placé dans le prolongement d'un résonateur acoustique. On y trouve les flûtes à bec, les tuyaux d'orgues, les flûtes traversières, etc. Dans ces instruments la source acoustique est placée près d'une extrémité ouverte du résonateur contrairement aux autres instruments à vent. Cette ouverture, située entre la sortie du canal qui forme le jet et le biseau, est appelée fenêtre de l'instrument dans la suite de cette étude. La réponse fréquentielle de l'instrument dépendra, d'une part, de la réponse acoustique du tuyau, caractérisée par son impédance acoustique d'entrée noté  $Z_p$  (rapport de la pression sur la vitesse acoustique) et d'autre part de la réponse fréquentielle de la fenêtre de l'instrument, caractérisée par l'impédance  $Z_m$ . L'impédance du tuyau est similaire à celles des autres instruments de la famille des bois. Il existe de nombreux travaux permettant de la modéliser, résumés dans la thèse de Lefebvre [1]. L'impédance de la fenêtre, quant à elle, est spécifique aux instruments de type flûte. La géométrie de l'instrument autour de cette ouverture est complexe ce qui rend délicate la compréhension de l'influence de chacun des paramètres sur les résonances de l'instrument. En effet, la fenêtre est une ouverture latérale à l'extrémité du résonateur, associée à un fort évasement lié à la présence du biseau. Les différents aspects de cette géométrie ont déjà été étudiés séparément (coude [2], constriction [3], rayonnement [4], etc), mais la concaténation de leurs effets nécessite la stabilisation des lignes de courant, afin d'assurer l'indépendance des différents effets. Dans le cas de la fenêtre des instruments de type flûte, ces différents effets interagissent du fait de leur proximité spatiale. La compréhension de l'influence de la géométrie de la fenêtre passe donc par une étude globale de  $Z_m$  pour différentes géométries. Jusqu'à présent, dans la majorité des études, on se restreignait à prendre en compte uniquement un ou deux de ces aspects pour modéliser cette impédance [5, 6, 7].

Nous présentons ici trois approches complémentaires pour étudier cette impédance de fenêtre  $Z_m$ , dans le cas d'une flûte à bec. La fenêtre de la flûte à bec est caractérisée principalement par une largeur  $W$  et une profondeur  $H$ , et donc par sa section  $S_m = WH$ , l'angle  $\alpha$  du biseau, et la hauteur  $l_e$  des parois de part et d'autre du biseau. Tout d'abord, nous présentons la mesure de cette impédance sur une flûte à bec dont les différents paramètres géométriques ont été mesurés. Ensuite nous proposons une simulation par éléments finis qui, une fois validée, permettra de simuler l'influence de la géométrie de la fenêtre. Enfin nous proposons une modélisation qui permet de réduire l'influence de la fenêtre à trois paramètres dont les valeurs dépendent de la géométrie de la fenêtre.

## 2 Mesure de l'impédance

L'impédance de la fenêtre  $Z_m$  ne peut pas être mesurée directement car la fenêtre ne peut être dissociée de l'instrument. Cependant, en mesurant l'impédance  $Z_{emb}$  de la tête de l'instrument (pièce de l'instrument composée du bec et d'une partie du résonateur), il est possible, en basses fréquences, de remonter via un calcul à l'impédance recherchée, en connaissant la géométrie du tube entre la sortie de la tête de l'instrument et le biseau. Cette impédance est mesurée avec le capteur développé par le Centre de Transfert de Technologie du Mans [8]. En supposant que le tube de la tête de l'instrument est un tube cylindrique de longueur  $L_{emb}$  et de section  $S_p$  on a, sous hypothèse d'ondes planes ( $f \ll f_{coupure}$ ) [4] :

$$Z_m(\omega) = \frac{\rho c \tanh(\Gamma L_{emb}) - Z_{emb}}{\frac{Z_{emb}}{\rho c} \tanh(\Gamma L_{emb}) - 1}, \quad (1)$$

où  $\Gamma$  est l'équivalent d'un nombre d'onde complexe prenant en compte les pertes visco-thermiques qui dépendent de la section du tube  $S_p$  et de la longueur d'onde [4]. On obtient ainsi la mesure de l'impédance de la fenêtre  $Z_m$  pour la géométrie de cette flûte alto. Cette mesure va nous permettre de valider la simulation numérique par éléments finis.

### 3 Simulations par élément finis

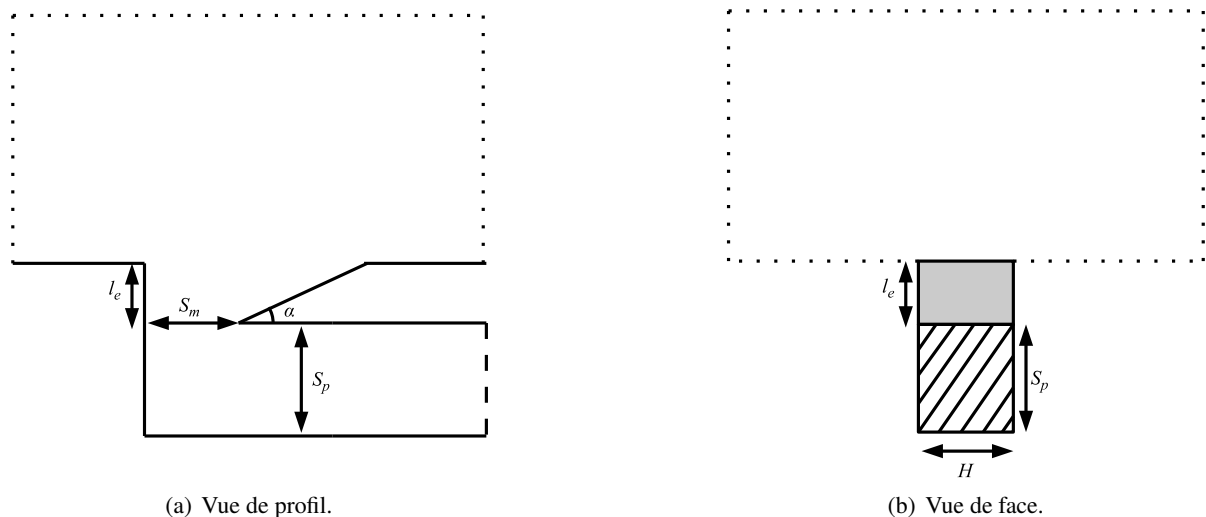


FIGURE 1 – Représentation du domaine de calcul de Freefem++. Les traits pleins et le gris représentent les parois (vitesses normales nulles), les tirets et les hachures représentent l'entrée du tube (pression constante imposée), et les pointillés indiquent les limites où la condition de PML est respectée.

La modélisation par éléments finis est faite avec une géométrie simplifiée de la tête de l'instrument représentée sur la figure 1, via le logiciel FreeFem++[9]. Il s'agit d'une adaptation en 3D de la résolution faite en 2D par Auvray [10]. L'espace de calcul est constitué d'un tube rectangulaire de section équivalente à celle du tube de l'instrument  $S_p$ , de longueur suffisamment longue pour assurer la présence d'ondes planes à l'entrée du tube et d'un "domaine de rayonnement" au dessus de la fenêtre, suffisamment grand pour limiter au plus l'influence des limites du domaine de calcul. On s'assure ainsi que l'impédance de la fenêtre n'est pas perturbée par les conditions au limites. Le biseau est triangulaire et est caractérisé par un angle  $\alpha$ . Le canal, par lequel l'instrument souffle n'est pas modélisé car ses dimensions sont très inférieures aux longueur d'ondes étudiées.

On résout dans cet espace l'équation de Helmholtz sans pertes visco-thermiques, pour plusieurs fréquences. On impose une vitesse normale nulle sur les parois de l'instrument, une pression homogène sur la section de l'entrée du tube. Afin d'atténuer l'influence des limites du domaine de rayonnement, une dissipation est ajoutée en limite du domaine en respectant la condition de *Perfect Match Layer* (PML) ( $\frac{\partial p_{ac}}{\partial n} = -ik(1+i\epsilon)p_{ac}$ , avec  $n$  la direction normale à la limite du domaine considérée et  $\epsilon = 1$  simule la dissipation).

L'impédance de la fenêtre est obtenue indirectement, à partir de l'impédance calculée à l'extrémité du tube à laquelle on impose la pression. Cette impédance d'entrée est calculée en faisant le rapport de l'intégrale de la pression sur la section du tube, sur l'intégrale de la vitesse acoustique longitudinale, obtenue par dérivation spatiale de la pression ( $v_{ac}^x = -i/(k\rho c)dp_{ac}/dx$ ). Pour remonter à l'impédance

de la fenêtre on utilise une formule analogue à celle utilisée dans l'équation(1), cette fois-ci, sans pertes visco-thermiques ( $\Gamma = ik = i\omega/c$ ), n'étant pas prises en compte dans le calcul. Cette méthode est d'abord validée sur une géométrie simple ayant une solution analytique (cylindre ouvert) avant d'être utilisée pour la géométrie de la flûte à bec Aesthé, utilisé pour la mesure précédente.

Le module et la phase de l'impédance de la fenêtre obtenus par la mesure et ceux obtenus par modélisation par éléments finis avec les valeurs des paramètres géométriques correspondant à la flûte alto Aesthé sont comparés sur le figure 3.

Malgré les approximations (tube rectangulaire, zone de rayonnement limité, etc), l'impédance obtenue avec les éléments finis restitue le comportement global de l'impédance mesurée. Les pics en  $kr_p \approx 0.4$ ,  $0.6$  et  $0.8$  sont à priori des artefacts de mesure, peut être liés à l'approximation faite sur la géométrie du tube de la tête de l'instrument. On peut donc utiliser les éléments finis, pour étudier l'influence des différents paramètres géométriques sur l'impédance de fenêtre et en proposer une formulation.

## 4 Modélisation

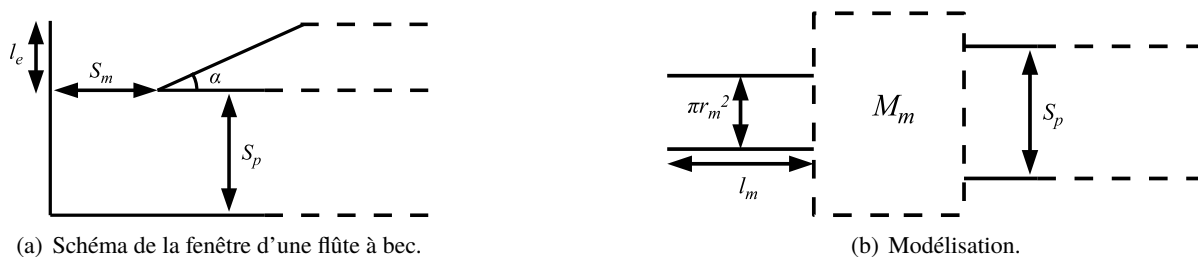


FIGURE 2 – Modélisation de l'impédance de la fenêtre d'une flûte à bec.

On modélise la fenêtre par un tube cylindrique ouvert qui rayonne de longueur  $l_m$  et de rayon  $r_m$ , auquel on ajoute une masse acoustique  $M_m$  reliée à différents aspects de la géométrie (coude, constriction) (figure 2). On obtient alors une expression de l'impédance de la fenêtre  $Z_m$  de la forme :

$$Z_m(\omega) = Z_{cil}(l_m, r_m) + j\omega S_p M_m, \quad (2)$$

avec  $Z_{cil}(l_m, r_m)$  l'impédance d'entrée d'un cylindre de longueur  $l_m$  et de rayon  $r_m$ . Cette modélisation est assez proche des modélisations utilisées pour prendre en compte l'effet des trous latéraux [11]. Les valeurs choisies pour chacun des trois paramètres caractéristiques de cette impédance  $l_m$ ,  $r_m$  et  $M_m$  diffèrent selon la littérature. Parfois  $r_m$  est assimilé au rayon équivalent de la surface de la fenêtre :  $r_m = \sqrt{S_m/\pi}$  [6, 5, 4], parfois ce rayon est pris équivalent à celui du résonateur  $r_m = r_p$  [12]. La longueur est souvent assimilée à la longueur des "oreilles"  $l_e$  qui sont les parois verticales qui entourent la fenêtre de l'instrument (fig. 2). Elles sont induites par la taille du biseau dans la flûte à bec, ou ajoutées par le facteur dans certains tuyaux d'orgues. Enfin la masse  $M_m$  est généralement estimée grossièrement et assimilée à une correction de longueur d'environ  $0,7r_m$  [4]. Seul Verge [12] propose de l'assimiler à une constriction de section  $S_m$  dans un tube de section  $S_p$ .

D'après l'équation 2, la partie réelle de l'impédance de la fenêtre est liée uniquement aux paramètres  $l_m$  et  $r_m$ . Il est alors possible de trouver les valeurs de  $r_m$  et  $l_m$  par optimisation de la partie réelle de l'impédance. La valeur de la masse  $M_m$  est trouvée par une seconde optimisation, cette fois-ci sur

la partie imaginaire de l'impédance. L'impédance obtenue par cette méthode est tracée sur la figure 3. En utilisant les simulations par éléments finis, on trouve ainsi les valeurs de ces trois paramètres de

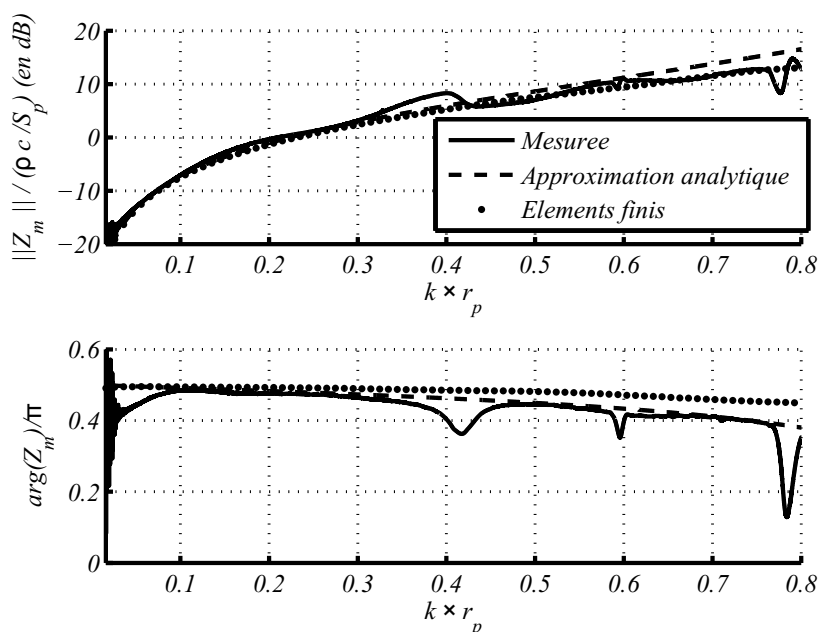


FIGURE 3 – Comparaison entre la mesure de  $Z_m$ , les valeurs obtenues avec la simulation par éléments finis, et l'impédance optimale obtenue avec l'équation :2, avec  $l_m \approx l_e$ ,  $r_m \approx 2\sqrt{(S_m/\pi)}$  et  $M_m \approx -80 \text{ kg.m}^{-4}$ .

l'impédance de la fenêtre pour différentes géométries. A terme nous espérons trouver une expression simple de ces paramètres en fonction de la géométrie de l'instrument.

## 5 Conclusion et perspectives

A travers cette étude nous avons validé, en basses fréquences, une modélisation par éléments finis de l'impédance de la fenêtre des instruments de type flûte en comparant simulations et mesure. Nous proposons aussi une modélisation de la fenêtre de l'instrument qui permet de décrire cette impédance à travers 3 paramètres, liés a priori à la géométrie de l'instrument.

Grâce à la simulation par éléments finis, il est maintenant possible de faire varier la géométrie de la fenêtre afin d'explicitier les relations qui existent entre les paramètres géométriques de la fenêtre ( $S_m, S_p, \alpha$ , etc) et les trois paramètres du modèle ( $l_m, r_m$  et  $M_m$ ).

## Références

- [1] A. Lefebvre, *Computational acoustic methods for the design of woodwind instruments*. PhD thesis, McGill University, 2010.
- [2] V. Dubos, J. Kergomard, A. Khettabi, J.-P. Dalmont, D. H. Keefe, and C. J. Nederveen, "Theory of sound propagation in a duct with a branched tube using modal decomposition," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 85, no. 2, pp. 153–169, 1999.

- [3] P. M. Morse, *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, 1968.
- [4] A. Chaigne and J. Kergomard, *Acoustique des instruments de musique*. Collection Echelles, Belin, 2008.
- [5] S. Terrien, *Instruments de la famille des flûtes : analyse des transitions entre régimes*. phdthesis, Aix-Marseille Université, Dec. 2014.
- [6] R. Auvray, *Hydrodynamique et acoustique des instruments de la famille des flûtes : influence du système d'alimentation sur la production du son*. PhD thesis, Paris 6, 2013.
- [7] M.-P. Verge, *Aeroacoustics of confined jets : with applications to the physical modeling of recorder-like instruments*. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 1995.
- [8] J.-P. Dalmont and J. C. L. Roux, "A new impedance sensor for wind instruments," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, pp. 3014–3014, May 2008.
- [9] F. Hecht, "New development in freefem++," *Journal of Numerical Mathematics*, vol. 20, Jan. 2012.
- [10] R. Auvray, B. Fabre, and P. Y. Lagrée, "Determination of 2d Quasi Incompressible Flow around a Recorder Labium : a Comparison between Different Methods," 2013.
- [11] J.-P. Dalmont, C. J. Nederveen, V. Dubos, S. Ollivier, V. Méserette, and E. te Sligte, "Experimental Determination of the Equivalent Circuit of an Open Side Hole : Linear and Non Linear Behaviour," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 88, pp. 567–575, July 2002.
- [12] M. P. Verge, B. Fabre, W. E. A. Mahu, A. Hirschberg, R. R. v. Hassel, A. P. J. Wijnands, J. J. d. Vries, and C. J. Hogendoorn, "Jet formation and jet velocity fluctuations in a flue organ pipe," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 95, pp. 1119–1132, Feb. 1994.