



Modélisation d'un bec d'instrument à vent en éléments finis et caractérisation de son impédance acoustique

B. Andrieux^a, J. Cottier^a, J. Selmer^a et V. Gibiat^b

^aHenri Selmer Paris, 25 rue Maurice Berteaux, 78711 Mantes-La-Ville, France

^bLaboratoire PHASE, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse
Cedex 4, France
bandrieux@selmer.fr

Le bec et l'anche sont les éléments clés de l'excitation de la colonne d'air des instruments à anches simples. Les anches ont déjà fait l'objet d'études, en revanche, la connaissance de l'élément bec est faible relativement à l'importance donnée à celui-ci par le musicien. La mesure d'impédance permet de caractériser expérimentalement la géométrie d'une colonne d'air cependant, à notre connaissance, peu d'essais de mesure d'impédance sur des becs par la face de jeu ont été effectués. Bien qu'utilisées dans de nombreux domaines de la physique les méthodes de calcul numérique sont également peu utilisées en acoustique des instruments de musique et plus particulièrement des vents.

Expérimentalement, nous avons, par une méthode de mesure d'impédance dérivée de la méthode TMTC [Laloë, Gibiat], effectué des mesures sur des becs de saxophone, en positionnant l'excitation à la place de l'anche, puis dans une seconde phase modélisé ces essais en utilisant une méthode de calcul par éléments finis. Les résultats obtenus pour la mesure et pour le calcul ont ensuite été corrélés. Nous présenterons ces résultats en montrant comment des modifications importantes de géométries apparaissent clairement que ce soit en simulation ou en mesure.

1 Introduction

L'ensemble de l'étendue chromatique des notes des instruments à vent est obtenu en plaçant le long de la colonne (cylindre ou cône) des trous qui vont permettre d'obtenir différentes fréquences. En ouvrant les trous le musicien agit comme s'il raccourcissait l'instrument jusqu'au premier trou ouvert (en supposant que celui-ci soit assez large) lui permettant de jouer différentes hauteurs de sons [1].

Pour exciter cette colonne d'air tous les instruments à vent possèdent un système exciteur, dans le cas du saxophone et de la clarinette, ce système exciteur est le couple anche-bec. Le bec, élément primordial pour le bon fonctionnement de l'instrument global, permet la synchronisation de l'oscillation de l'anche avec les fréquences de résonance du tube et particulièrement dans le cas d'un instrument conique comme le saxophone qui est très sensible au niveau de l'anche. Entre différents becs de géométries intérieures différentes l'instrumentiste peut avoir un ressenti très différent.

Dans cette étude nous souhaitons premièrement, réaliser la mesure d'impédance acoustique sur des becs, caractéristique géométrique intrinsèque des colonnes d'air, de façon à obtenir une mesure factuelle de la forme de becs de saxophone. Un des points importants de cette étude est la mesure par la face de jeu c'est-à-dire en plaçant la source excitatrice à la place de l'anche. Nous souhaitons ainsi observer si des différences géométriques au niveau de la chambre sonore peuvent être visibles sur la mesure d'impédance.

Dans un second temps, nous réalisons la modélisation par éléments finis de ces becs d'instrument à vent pour retrouver cette impédance acoustique par le calcul. L'objectif final est de montrer que la mesure et le calcul sont corrélables.

2 Impédance acoustique et technique de mesure

2.1 Caractérisation de la géométrie de colonnes d'air

Les ondes acoustiques nécessitent un milieu matériel pour se propager (ex. air). Ces ondes ont alors une certaine célérité (qui dépend du milieu) et elles induisent une variation de pression et une vitesse d'oscillation des particules.

Les instruments à vent ou les tubes sont constitués d'une colonne d'air (délimitée par la structure du tube) et

possèdent donc des fréquences de résonance propres. Pour caractériser ces fréquences de résonance on peut introduire la notion d'impédance acoustique. L'impédance acoustique est définie comme le rapport de la pression moyenne dans le plan où s'effectue la mesure sur la vitesse particulière dont le profil est supposé lui aussi constant en excluant la zone de couche limite acoustique au voisinage des parois [2]. L'impédance est une grandeur du domaine fréquentiel, tout ce qui suit est donc écrit dans le domaine de Fourier et suppose que les signaux temporels ont été « transformés de Fourier ».

En caractérisant l'impédance acoustique on peut donc connaître à travers ses maxima (pour une flûte ce seraient les minima) les fréquences de fonctionnement d'un tube, qui peut être par exemple un tube sonore de saxophone, de clarinette ou une chambre intérieure de bec.

Dans le cas des mesures sur les becs d'instruments à vent nous ne considérerons pas ces fréquences de résonance comme des fréquences de jeu mais bien comme une caractéristique géométrique.

Nous utilisons, pour la mesure d'impédance, un pont d'impédance acoustique dérivé de la méthode TMTC [1].

2.2 Mesure d'impédance acoustique par la technique des 4 microphones

Le pont d'impédance est constitué d'un tube en laiton inséré dans un tube en PVC. Le long de ce tube sont placés quatre microphones. Le premier étant situé le plus près de la charge à analyser. En connaissant les modèles de propagation des ondes acoustiques dans un tube il est alors possible de connaître la pression et la vitesse en $x=0$.

En se limitant à deux microphones nous pouvons écrire les équations qui régissent le fonctionnement du système sous l'hypothèse suivante : seules des ondes planes sont présentes au voisinage du plan de mesure. Il est alors possible de dire que ce qui est mesuré par le capteur 1 respectivement 2 se déduit des valeurs de la pression et de la vitesse dans le plan de mesure et d'écrire [1] :

$$\begin{aligned} S1 &= \alpha p + \beta \rho c v \\ S2 &= \gamma p + \delta \rho c v \end{aligned} \quad (1)$$

Où p et v sont la pression, et la vitesse, dans le plan de mesure la masse volumique de l'air. Et c la vitesse du son dans l'air. Les coefficients $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ sont faciles à déterminer dans le cas d'un tube cylindrique mais sont a priori inconnus si la géométrie n'est pas parfaitement cylindrique et doivent prendre en compte les influences des microphones.

En posant :

$$y = \frac{S2}{S1} \tag{2}$$

$$Z = \frac{p}{v} \tag{3}$$

L'impédance Z s'écrit en fonction de deux coefficients A et B et de y_0 le rapport des signaux $S2/S1$ déterminée pour le tube terminé par une impédance infinie.

On peut alors montrer que l'impédance est donnée par :

$$Z = \frac{(Ay + B)}{(y - y_0)} \tag{4}$$

Avec Z l'impédance acoustique à déterminer et inconnue.

A et B sont des coefficients qu'il est possible soit de calculer analytiquement soit de déterminer par deux calibrations sur des impédances connues. Ils prennent en compte la vitesse des ondes et peuvent être déterminés analytiquement en fonction de la masse volumique de l'air de la température et des distances qui séparent les micros du plan de mesure. Il apparait dans le calcul une indétermination lorsque les distances inter microphones correspondent à $\frac{1}{2}$ longueur d'onde. Pour palier cet inconvénient on peut soit rapprocher le plus possible les microphones (ce qui nuit à la précision en basse fréquence) soit utiliser plusieurs couples de microphones, ce que nous avons fait ici.

En théorie, nous pouvons à l'aide de notre système de mesure d'impédance atteindre 8000Hz ; en effet une seconde indétermination apparait lorsque la distance du premier microphone au plan de mesure est égale à $\frac{1}{4}$ de longueur d'onde et donc plus le premier microphone est proche du plan de mesure plus il est possible de monter haut en fréquence. En réalité la mesure est souvent sujette à des bruits parasites, et nous considérons que la mesure est correcte jusqu'à 5000Hz. Dans le cas de relevés d'impédance sur des instruments complets la plage de fréquence est amplement suffisante.

3 Mesure d'impédance de becs

3.1 Mesure par la face de jeu

Nous utilisons pour la mesure d'impédance des becs par la face de jeu un adaptateur en résine souple et laiton permettant d'épouser la table du bec. De façon à simuler au mieux le fonctionnement de l'instrument il est convenu que le conduit entre le tube d'impédance et le bec est d'une surface équivalente à la surface laissée libre par l'anche en jeu normal.

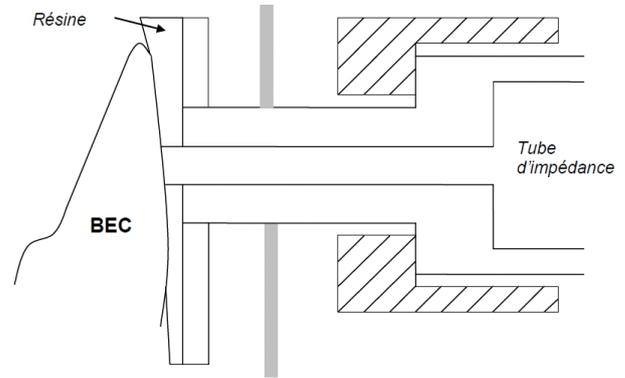


Figure 1 : Adaptation du bec en bout de tube

Nous voyons que nous mesurons l'impédance d'un bec connecté à une cavité cylindrique.

3.2 Relevés d'impédance

Nous réalisons la mesure d'impédance sur des becs sortis de production, principalement des becs de saxophone alto S80 C*. Nous obtenons pour un bec la courbe d'impédance présentée ci-après. Ce que l'on mesure et calcule est avant tout un bec connecté à une cavité cylindrique, il est donc normal que nous mettions en évidence les résonances suivantes.

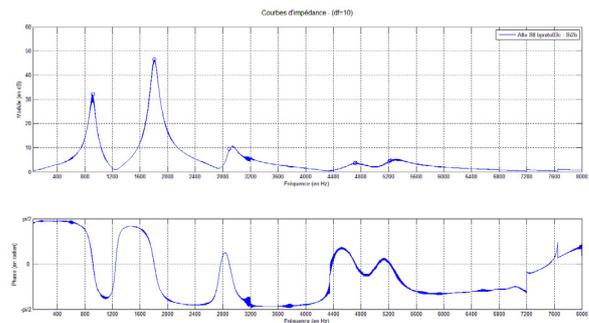


Figure 2 : Courbe d'impédance de bec de saxophone alto S80 C*

Certains paramètres géométriques sont bien connus des musiciens pour avoir de fortes répercussions au niveau du fonctionnement acoustique du bec (hauteur du plafond, forme de la chambre sonore par exemple).

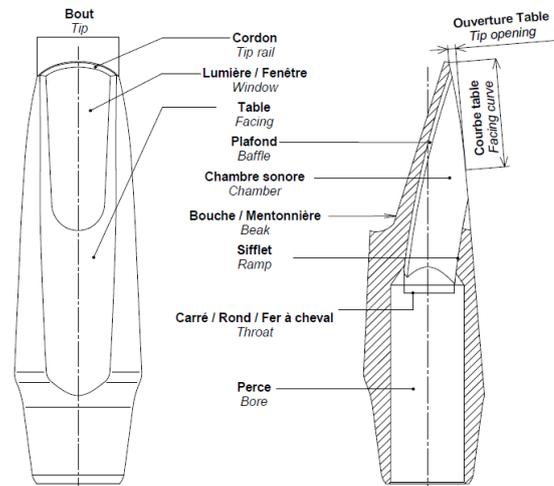


Figure 3 : Schéma descriptif d'un bec

Nous souhaitons vérifier la pertinence de notre mesure d'impédance. Nous vérifions la répétabilité de la mesure

par des relevés d'impédance successifs sur le même bec. Nous souhaitons ensuite, observer l'impact de modifications géométriques sur la courbe d'impédance mesurée.

3.3 Impact de modifications géométriques

Après avoir vérifié la répétabilité de nos mesures sur le même bec, nous modifions certains paramètres de la chambre sonore tels que la largeur du carré ou la hauteur du plafond (paramètres connus des musiciens comme ayant un impact sur le fonctionnement acoustique du bec). Nous observons les modifications de géométries en effectuant le rapport de l'impédance du bec modifié sur l'impédance du bec de référence.

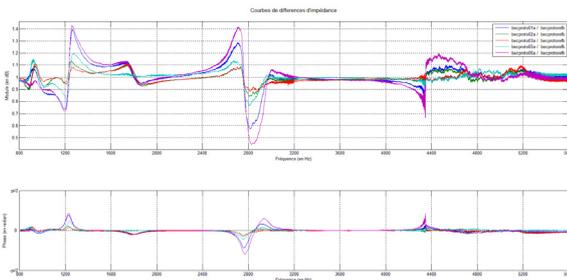


Figure 4 : Courbes de rapport d'impédances de becs modifiés géométriquement

Chacune des courbes ci-dessus représente le rapport de l'impédance d'un bec modifié géométriquement sur l'impédance de référence (bec de série). Il est intéressant de noter que tous les becs présentent une modification différente plus ou moins importante. Le bec présentant la modification géométrique la plus importante est celui qui présente la plus grande différence au niveau du relevé d'impédance. Nous ne sommes, à ce point, pas capables de savoir quelle différence impliquera telle ou telle courbe mais nous savons que les modifications géométriques au niveau de la chambre sonore (hauteur de plafond et largeur du carré) ont un impact mesurable et observable par la mesure d'impédance.

Des becs identiques géométriquement relevés successivement nous donnent eux accès à un ordre de grandeur de répétabilité de la mesure, très inférieur à l'ordre de grandeur des différences observées lors de mesures sur des becs différents géométriquement.

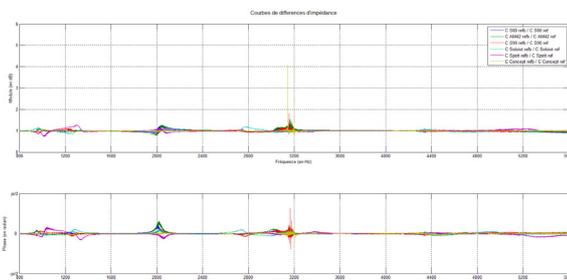


Figure 5 : Validation de la mesure sur becs identiques

La première partie de notre étude concernait la mesure d'impédance, nous souhaitons maintenant réaliser la modélisation par éléments finis des becs pour tenter de retrouver ce qui a été observé par la mesure.

4 Modélisation de becs par éléments finis

L'objectif de notre modélisation de becs est de réaliser un maillage correspondant à l'air contenu à l'intérieur du bec et d'appliquer les bonnes conditions aux limites pour remonter à l'impédance d'entrée du bec.

Le code choisi pour réaliser la modélisation par éléments finis est le Code_Aster. Code_Aster est un code de calcul libre de simulation numérique développé par E.D.F. depuis 1989. Ce code est surtout utilisé en mécanique des structures mais un module permet de réaliser des calculs en acoustique (résolution de l'équation de Helmholtz).

Une interface graphique a été réalisée pour réaliser le pré et le post traitement des calculs (Salome-Meca). Cette interface permet d'importer des modèles 3D réalisés par ordinateur, de réaliser le maillage puis l'exécution des scripts Code_Aster. Il est ensuite possible de tracer les champs calculés sur les modèles grâce à l'outil de post traitement.

4.1 Calculs par éléments finis et acoustique

Comme nous l'avons vu précédemment les paramètres à connaître dans le cas de l'acoustique et plus particulièrement de la mesure d'impédance sont le champ de pression et la vitesse locale d'oscillation des particules. Le module Acoustique de Code_Aster est utilisé pour notre étude nous permettant d'avoir accès à la résolution de l'équation de Helmholtz.

$$\Delta p' = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$\nabla^2 \hat{p} + k^2 \hat{p} = (\nabla^2 + k^2) \hat{p} = 0 \quad (6)$$

La résolution des équations est ensuite effectuée sur le maillage choisi et dans notre cas nous choisissons une dimension minimale de maille de sorte à avoir 10 mailles par longueur d'onde pour la fréquence maximale observée.

4.2 Maillage

Nous utilisons un maillage composé de triangles et de tétraèdres. Nous générons dans un premier temps le maillage automatiquement, nous aurons la possibilité d'éditer ce maillage dans un deuxième temps pour l'affiner au niveau des zones nous apparaissant critiques.

Nous modélisons le volume d'air contenu à l'intérieur du bec muni d'une partie cylindrique induite par notre adaptateur cylindrique de façon à être dans la même configuration que dans le cas de la mesure.

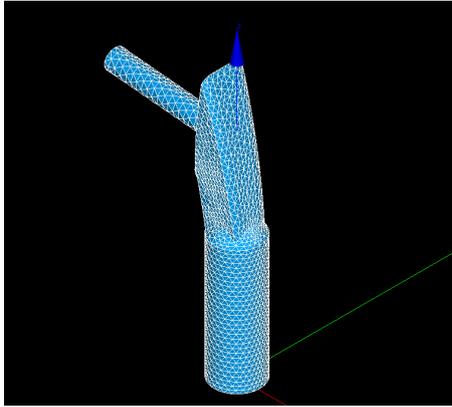


Figure 6 : Maillage de l'air correspondant à la géométrie intérieure du bec et à l'adaptateur

4.3 Conditions aux limites

L'utilisation des fonctions acoustique de Code_Aster va permettre :

- d'imposer une vitesse nulle aux extrémités du maillage (qui va correspondre aux parois du tube et dans la suite aux parois du bec)
- de choisir au niveau de l'entrée et de la sortie les conditions à appliquer c'est-à-dire choisir une pression nulle en sortie et appliquer une onde plane en entrée
- de choisir un groupe de nœuds en entrée sur lequel nous souhaitons relever les valeurs des champs de pression et de vitesse qui permettront de calculer l'impédance acoustique

Une fois un script de base réalisé avec l'utilitaire Efficas nous utilisons des fonctions Python pour aller plus loin dans notre modèle. La condition de vitesse nulle aux parois se révélera insuffisante, nous appliquerons dans la suite une impédance de parois.

La validation des mesures se fait sur un tube cylindrique de 1 mètre.

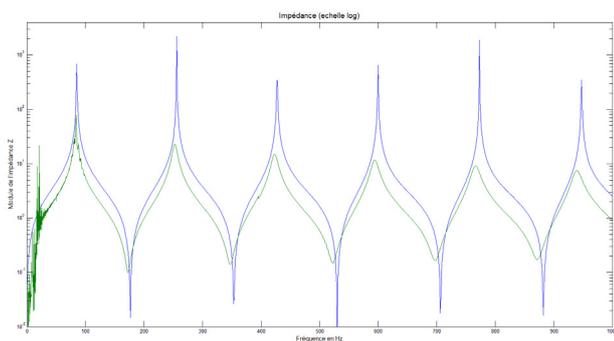


Figure 7 : Impédance mesurée (tracé vert) et impédance calculée (tracé bleu)

Sans prise en compte des pertes aux parois nous retrouvons la forme générale de la courbe d'impédance (module) pour un tube cylindrique, en revanche nous ne retrouvons pas la décroissance du module ainsi qu'un décalage en fréquence.

4.3 Pertes aux parois

Pour essayer de nous rapprocher de nos mesures nous souhaitons introduire les pertes au niveau des parois du

tube. Nous trouvons dans la littérature que la modélisation des pertes visqueuses au niveau des parois permet de se rapprocher de la situation réelle [2]. Nous pouvons les modéliser par l'ajout d'une admittance de parois. Cette admittance de paroi caractérise les pertes visqueuses et élastiques au niveau de la couche mince située au bord de la paroi. Ces pertes sont fonction de la fréquence, de l'angle d'incidence de l'onde sonore ainsi que des caractéristiques du fluide considéré (dans notre cas de l'air).

$$\frac{1}{Z_{\text{parois}}} = 0,5(1-i) \frac{\omega^2}{\rho c^2} [l_{\text{vor}} \sin^2 \theta + (\gamma - 1)l_{\text{ent}}] \quad (7)$$

$$l_{\text{vor}} = \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho}} \quad (8)$$

$$l_{\text{ent}} = \frac{l_{\text{vor}}}{\sqrt{\text{Pr}}} \quad (9)$$

ρ , μ , γ sont respectivement la masse volumique, la viscosité dynamique et le coefficient isentropique de l'air.

ω , θ , c sont respectivement la pulsation, l'angle d'incidence et la célérité du son dans l'air.

Dans le cas de notre tube cylindrique de 1m on considère que l'on a une incidence rasante au niveau des parois latérales du tube (on prendra donc l'angle égal à 90° par rapport à la normale). Nous obtenons toujours un écart, nous tentons de le corriger en ajoutant une portion de tube de 0,6 fois le rayon de sortie de la géométrie (correction de Rayleigh).

Nous cherchons à prendre en compte les pertes thermiques aux parois pour nous rapprocher de la réalité [3] :

$$\varepsilon = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{c_0}{4\pi f}} [\sqrt{l_v} + 0.402\sqrt{l_h}] \quad (10)$$

$$\rho c = \frac{\rho c_0}{1 + \varepsilon} \quad (11)$$

Les valeurs de l_v et l_h sont fonction de la température. En connaissant le rayon du conduit nous avons accès à la variation de célérité du son en fonction de la fréquence. En introduisant ces données nous nous éloignons des courbes mesurées nous ne prenons pas en compte ces pertes dans ce cas là, nous nous limitons pour l'instant à une étude comparative sur différentes géométries.

4.3 Calculs sur des géométries de bocs

Nous calculons l'impédance d'une géométrie intérieure de bec de saxophone alto (S80 C*). Nous obtenons les résultats suivants.

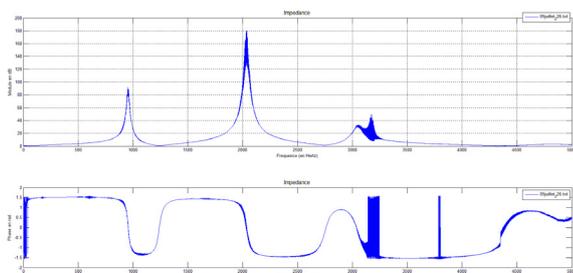


Figure 8 : Impédance mesurée de bec S80 C*

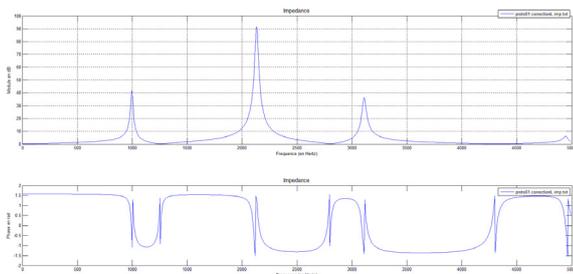


Figure 9 : Impédance calculée sur géométrie de bec S80 C*

Hormis quelques points aberrants sur la courbe de phase nous obtenons quelque chose de relativement proche (dans la forme globale) de ce que nous observions par la mesure. Un décalage en fréquence est présent nécessitant peut-être de revoir notre modèle mais nous nous contenterons, dans un premier temps, d'une étude comparative.

Il est intéressant de noter que nous nous intéressons, pour le calcul d'impédance d'entrée, aux champs de pression et vitesse en entrée du bec mais nous avons accès à ceux-ci sur toute la géométrie maillée. Ceci pourrait être exploité dans une autre étude.

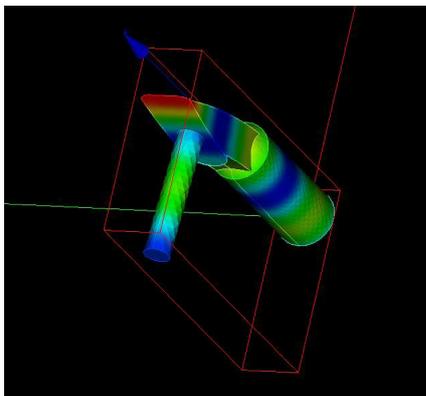


Figure 10 : Champ de pression pour une valeur de fréquence

Nous suivons la même démarche que pour la mesure, certaines des géométries des becs prototypes réalisées précédemment sont modélisées en CAO et nous effectuons le rapport de l'impédance de ces becs prototypes sur l'impédance de notre bec de référence.

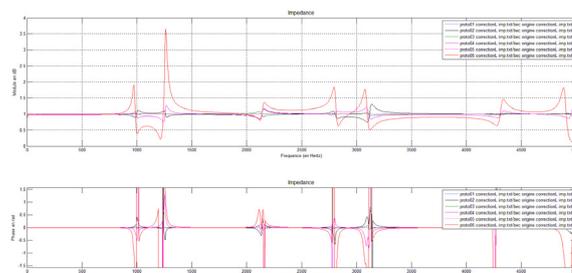


Figure 11 : Rapport des impédances de becs prototypes sur le bec de référence

Nous n'obtenons pas exactement le même résultat que par la mesure cependant nous identifions des zones localisées en fréquence ou les modifications géométriques ont un impact sur la mesure d'impédance. Ces zones sont localisées aux mêmes endroits par la mesure et par le calcul ce qui est pour nous un point intéressant.

4.4 Résultats

Nous sommes capables de retrouver les différences géométriques au niveau de la chambre sonore de becs d'instruments à vent que ce soit par mesure d'impédance ou par calcul par éléments finis. Nous observons aussi la localisation en fréquence de l'impact des modifications géométriques. Les résonances que nous observons sont caractéristiques du bec connecté à une cavité résonnante cylindrique ce qui constitue un outil de comparaison fiable.

Nous savons aussi que nous ne nous occupons dans cette étude uniquement de la géométrie intérieure qui est une petite partie du fonctionnement acoustique du bec. La géométrie intérieure du bec ne peut expliquer qu'en partie si un bec fonctionne et est satisfaisant pour le musicien ou non. De nombreux autres paramètres vont influencer sur le ressenti du musicien au niveau de l'émission. Les parties liées directement au fonctionnement de l'anche par exemple ont un impact extrêmement important sur le ressenti du musicien (cordon par exemple).

Il est possible d'imaginer modéliser un système plus complexe couplant les problèmes acoustiques et mécaniques. Nous pourrions modéliser un bec muni de son anche. Dans ce cas nous pourrions utiliser une modélisation acoustique pour la chambre intérieure du bec et modéliser l'anche comme un ressort avec des paramètres de rigidité et d'amortissement qui ont déjà été mesurés et qui sont trouvables dans des publications.

5 Conclusion

Nous avons montré que nous sommes capables de mesurer l'impédance acoustique de becs d'instruments à vent par la face de jeu. Ce point est important car, à notre connaissance, ces travaux n'avaient jamais été effectués. Nous sommes, de plus, capables d'observer des différences de géométrie intérieure sur ces becs par la mesure d'impédance acoustique.

Nous avons modélisé par éléments finis à l'aide d'un logiciel libre (Code_Aster) des becs d'instrument à vent pour retrouver l'impédance que nous avons mesurée. Les différences géométriques observées par la mesure le sont par le calcul. Nous n'obtenons cependant pas exactement les mêmes résultats. Nous poursuivrons l'étude pour obtenir des modèles plus proches de la réalité et intégrant le

fonctionnement mécanique de l'anche qui est un point important du ressenti musicien.

Il serait intéressant ensuite de poursuivre l'étude en corrélant, par apprentissage, l'impédance mesurée au ressenti du musicien et donc précisément à la géométrie intérieure de la chambre sonore. Ces travaux s'inscrivent dans la démarche recherche de l'entreprise Henri Selmer Paris.

Remerciements

Nous remercions les employés de l'entreprise Henri Selmer Paris ayant participé de près ou de loin à cette étude et particulièrement Mr P.Dufay et le département prototypes. Nous remercions aussi Mr L.Brouard pour avoir mis à notre disposition les ressources nécessaires à la réalisation des becs prototypes au sein de l'atelier des becs.

Références

- [1] V. Gibiat, F. Laloë, *Acoustical impedance measurements by the two microphone three calibration (TMTC) method*, J. Acoust. Soc. Am., 88 p. 2533-2541, 1990.
- [2] A.D. Pierce, *Acoustics: an introduction to its physical principles and applications*, McGraw-Hill, 1981.
- [3] A.Chaigne, J.Kergomard, *Acoustique des instruments de musique*, Belin, 2008.
- [4] M.Harazi, *A numerical and experimental analysis of the acoustical properties of saxophone mouthpieces using the finite element method and impedance measurements*, Rapport technique, École Normale Supérieure, Paris, France et Computational Acoustic Modeling Laboratory, Mc-Gill University, Montreal, Canada, 2012.