

CFA/VISHNO 2016

**Caractérisation de l'impédance acoustique du couple
bec-instrument par l'utilisation d'une méthode mixte
mettant en jeu le calcul par éléments finis et la mesure par
la méthode TMTC**

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, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse
Cedex 4, France
jcottier@selmer.fr



LE MANS

Couplé à l'anche, le bec joue un rôle fondamental dans l'excitation de la colonne d'air des instruments à anche simple. Nous nous intéressons ici à l'impact de la géométrie du bec sur son impédance acoustique propre et surtout à l'impact de la géométrie du bec sur l'impédance globale de l'instrument. Nous analyserons les résultats obtenus par une modélisation en éléments finis calculée à partir de la géométrie du bec et le couplage de cette impédance avec une impédance d'instrument obtenue par la mesure, de façon à présenter une impédance du système bec-instrument. Les travaux ont été réalisés au sein de l'entreprise Henri Selmer Paris spécialisée dans la facture instrumentale et la production de becs de grande qualité. Les résultats obtenus par le calcul ont été comparés à la mesure obtenue à l'aide du système de mesure d'impédance TMTC (Three Microphone Three Calibration Method). L'objectif principal était d'identifier l'influence de différents paramètres géométriques du bec. A partir des résultats nous avons été amenés à réaliser des pièces réelles jouables par des musiciens professionnels de façon à engager un travail de corrélation entre géométrie, impédance, spectrogramme et avis du musicien. Les résultats montreront comment des différences géométriques sont observables sur l'impédance globale du système bec-instrument.

1 Introduction

De façon à caractériser la géométrie des instruments à vent, nous utilisons communément l'impédance acoustique. L'impédance acoustique nous permet de caractériser la colonne d'air des instruments à vent et plus particulièrement de toutes les « colonnes d'air ».

Des travaux préliminaires nous avaient permis de mesurer puis de calculer l'impédance des becs d'instruments à vent par la face de jeu [3]. Ces travaux nous avaient obligés à ajouter à notre géométrie un conduit nous permettant d'adapter nos becs à notre système de mesure d'impédance (pont d'impédance fonctionnant selon la méthode TMTC [1]), ce conduit d'adaptation devant être ensuite simulé.

De façon à nous rapprocher de la situation « vue » par l'instrumentiste nous avons cherché un nouveau modèle nous permettant d'éliminer cette pièce d'adaptation.

Nous présenterons, dans une première partie les méthodes (calcul et mesure) nous permettant d'obtenir l'impédance acoustique de becs d'instruments à vent.

Nous verrons dans une seconde partie comment nous avons corrélé le calcul et la mesure d'impédance sur une pièce pour valider notre modèle de calcul par éléments finis.

Dans une troisième partie, nous présenterons comment nous sommes arrivés à mettre en place une méthode mixte de couplage entre une impédance calculée de bec et une impédance mesurée de l'instrument constitué du bocal et du tube sonore.

L'objectif final des travaux inscrits dans la démarche recherche de l'entreprise Henri Selmer Paris est le couplage de l'impédance de chaque élément constitutif de l'instrument (bec, bocal, tube sonore) de façon à identifier les interactions entre chaque élément.

2 Impédance et mesure

2.1 Impédance acoustique

Nous utilisons depuis plusieurs années un système de mesure d'impédance au sein de l'entreprise Henri Selmer Paris. Ce système est utilisé principalement pour la mesure de l'impédance d'instruments à vent et de becs. Nous poursuivons nos recherches en utilisant ce système performant pour la mesure d'impédance des instruments.

Les ondes acoustiques nécessitant un milieu matériel pour se propager (ex. air), elles ont une certaine célérité

(qui dépend du milieu) et induisent une variation de pression et une vitesse d'oscillation locale des particules.

Les instruments à vent ou les tubes sont constitués d'une colonne d'air (délimitée par la structure du tube) et ils 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 particulaire dont le profil est supposé lui aussi constant, en excluant la zone de couche limite acoustique au voisinage des parois. 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.

2.2 Mesure d'impédance

Le système de mesure installé au sein de l'usine est dérivé de la méthode de mesure dite « TMTC » [1]. 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 $x=0$ et donc d'obtenir une mesure de l'impédance dans le plan d'entrée de l'instrument.

3 Mesure et calcul sur becs d'instruments à vent

3.1 Mesure de l'impédance du bec par la face avant

Nous réalisons, dans l'objectif de corréler le calcul et la mesure, une pièce s'adaptant à notre système de mesure d'impédance et ayant comme volume intérieur la géométrie d'un bec. La pièce est réalisée en stéréolithographie. Nous avons donc à notre disposition une pièce en stéréolithographie qui est mesurable sur notre système de mesure d'impédance ainsi qu'un fichier CAO correspondant à cette géométrie intérieure.



Figure 1 - Adaptateur contenant le volume intérieur d'un bec

De façon à garantir la répétabilité de la mesure plusieurs pièces en stéréolithographie sont réalisées. La mesure est réalisée en bouchant l'adaptateur. Cette condition représentera notre condition de sortie lors des simulations présentées dans la suite de l'article.

Une fois la mesure réalisée, nous effectuons le calcul de l'impédance sur notre géométrie CAO en nous plaçant au plus proche des conditions appliquées précédemment.

3.2 Calcul de l'impédance de la chambre sonore et corrélation à la mesure

Nous réalisons un calcul de l'impédance sur le volume d'air contenu dans le bec et représentant la partie utile de ce bec (chambre sonore et début de perce). Le calcul par éléments finis nous impose de choisir des conditions aux limites. Nous choisissons un modèle simple : une onde plane est appliquée dans l'interstice laissé libre par l'anche, aux parois nous appliquons les pertes visqueuses [2] [4], en sortie nous choisissons une paroi rigide (correspondant à notre adaptateur fermé) et une condition de symétrie est appliquée dans le plan partageant le bec dans la longueur.

Les pertes aux parois sont fonction de l'angle d'incidence, de la fréquence ainsi que des caractéristiques du fluide (ici de l'air). On utilise en conditions de paroi l'admittance telle que définie par Cremer [2] [4] :

$$Y_p = -\frac{v_n}{p} = \frac{1}{\rho c} \sqrt{\frac{j\omega}{c}} [\sin^2 \theta \sqrt{l_v} + (\gamma - 1) \sqrt{l_t}] \quad (1)$$

- v_n vitesse normale à la paroi,
- ρ densité,
- c vitesse du son,
- $\omega = 2\pi f$ pulsation,
- θ angle d'incidence de l'onde,
- μ viscosité,
- γ rapport des chaleurs spécifiques,
- Pr nombre de Prandtl,
- $l_v = \mu/\rho c$ longueur caractéristique visqueuse,
- $l_t = l_v/Pr$ longueur caractéristique thermique.

Le maillage est choisi tel que la taille d'élément maximale soit égale à un dixième de longueur d'onde la plus petite.

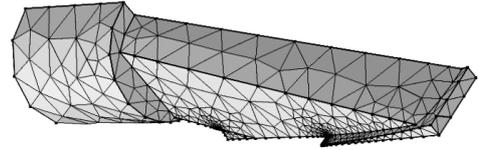


Figure 2 - Exemple de maillage de bec

La superposition de la mesure et du calcul nous donne le résultat suivant :

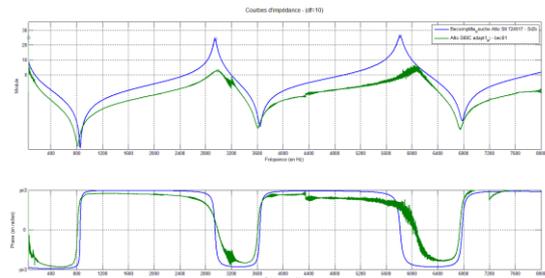


Figure 3 - Comparatif de la mesure et de la simulation avant correction par facteur d'échelle

Nous observons un décalage important des pics en fréquence. Notre expérience sur les pièces réalisées en stéréolithographie nous amène à vérifier l'influence qu'aurait pu avoir un retrait de la matière plastique. En effet nous observons régulièrement une déviation allant jusqu'à 0.1mm sur les pièces réalisées par ce procédé. En appliquant un facteur d'échelle correspondant à un retrait de 0.1mm à notre géométrie CAO (pour l'étape de calcul de façon à simuler un retrait constant sur toute la pièce) nous rapprochons sensiblement notre calcul de la mesure.

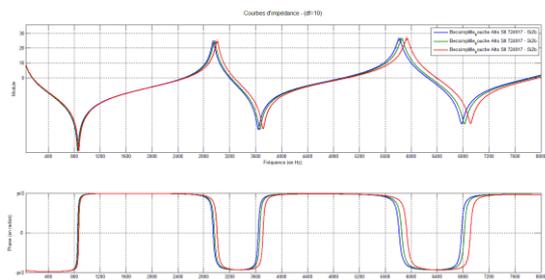


Figure 4 - Impédance résultante pour différents facteurs d'échelle

De par la difficulté à juger du retrait de la pièce en stéréolithographie selon les différentes directions (géométrie intérieure difficilement mesurable) et en prenant en considération le fait que nous avons déjà réussi à corréler calcul et mesure sur d'autres pièces (tube, bocal de saxophone par exemple) nous considérons que notre modèle est tout à fait applicable sur la géométrie d'un bec de saxophone.

3.3 Modifications de paramètres géométriques de la chambre sonore du bec

Nous sommes maintenant capables de calculer par éléments finis de façon fiable l'impédance de bocs d'instruments à vent. Nous nous intéressons à l'impact de modifications de certains paramètres géométriques sur la courbe d'impédance. Nous modifions certains paramètres avec un pas défini et nous observons l'influence sur la mesure d'impédance.

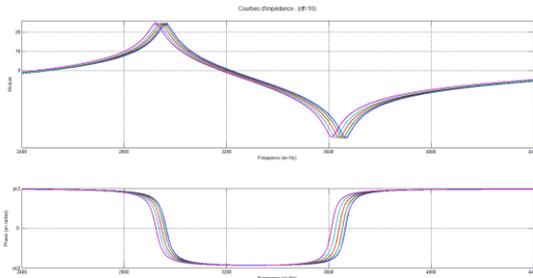


Figure 5 - Impédance calculée suite à la modification d'un paramètre géométrique dans la chambre sonore

Nous observons bien par exemple sur la modification de ce paramètre avec un pas que nous obtenons un faisceau de courbes. Il est intéressant de noter que le paramètre modifié impacte fortement la courbe d'impédance. Ce point est important car en appliquant directement l'onde plane dans l'interstice à l'entrée du bec nous rendons beaucoup plus visibles des modifications géométriques observables. Le faisceau de courbes présenté ci-dessus correspond à des modifications géométriques de l'ordre du dixième de millimètre entre chaque courbe.

Cependant, nous nous intéressons particulièrement à mettre en relation une géométrie de bec avec le ressenti du musicien ou une caractéristique sonore (spectrale) par exemple. De façon à mieux évaluer l'impact des géométries de bocs sur le fonctionnement de l'instrument nous souhaitons modéliser l'influence que peut avoir le bec sur l'impédance globale du système.

Nous abordons donc la mise en place de la méthode mixte de couplage d'impédance entre bec simulé et impédance d'instrument à vent mesurée.

4 Mise en place de la méthode d'impédance mixte, bec simulé, instrument mesuré

De façon à mettre en place une méthode mixte nous réalisons une mesure d'impédance acoustique qui sera notre référence dans la suite. La mesure est réalisée, contrairement à ce que l'on fait d'habitude, sans adaptateur en entrée du bocal. Pour rappel, habituellement, nos mesures sont réalisées avec un adaptateur cylindrique de volume équivalent à un bec nous permettant de nous « accorder » en fréquence sur la mesure.

4.1 Objectifs

De façon à limiter la quantité de prototypes à réaliser nous travaillons le plus possible en simulation. Il serait possible de développer un modèle de simulation global représentant le bec couplé aux différentes parties de l'instrument mais ceci serait extrêmement coûteux en

termes de temps de calcul. Etant donnée la présence d'un outil de mesure d'impédance fiable au sein de la société nous préférons nous concentrer sur la mise en place d'une méthode couplant la simulation de la partie dont nous souhaitons étudier la géométrie (ici le bec) avec la mesure d'impédance réalisée sur tout ou partie de l'instrument.

4.2 Validation de la méthode

La mise en place de la méthode mixte repose sur deux impératifs : une simulation de bec valide ainsi qu'une mesure la plus exempte d'erreur. Nous réalisons la validation en nous basant sur la mesure réalisée habituellement avec adaptateur sur notre pont d'impédance.

Nous modélisons un adaptateur cylindrique de forme strictement identique à celui utilisé sur le pont d'impédance lors de nos mesures traditionnelles. Cet adaptateur est censé représenter un volume équivalent à un bec et nous permet jusqu'à présent de réaliser toutes nos mesures d'impédance sur des instruments.

En entrée de l'adaptateur simulé nous appliquons une onde plane, en sortie nous appliquons l'impédance mesurée dans le plan d'entrée du bocal, les pertes aux parois sont définies comme précédemment. Nous observons les résultats suivants :

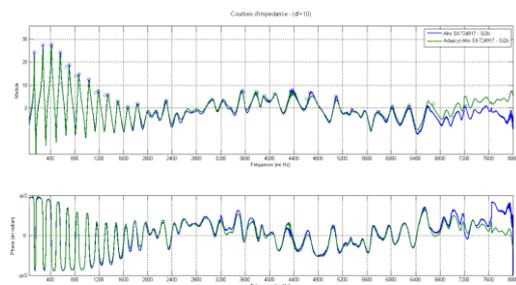


Figure 6 - Validation d'une méthode mixte, adaptateur simulé, impédance de Sib de saxophone alto mesurée

La méthode mixte (adaptateur cylindrique simulé – impédance dans le plan d'entrée du bocal mesurée) nous permet d'approcher de façon très fiable la mesure d'impédance globale réalisée sur l'ensemble (adaptateur, instrument). La validation de cette méthode nous permet d'envisager des perspectives sur l'étude de l'influence des différents paramètres géométriques du bec sur la courbe d'impédance globale de l'instrument.

Une fois la validation du principe de la méthode mixte réalisée nous réalisons le même essai en remplaçant l'adaptateur cylindrique par un bec simulé.

4.3 Utilisation de la méthode mixte avec un bec simulé

Nous remplaçons l'adaptateur cylindrique par un bec simulé. Nous modifions un paramètre sur un bec et nous le comparons à notre bec de référence :

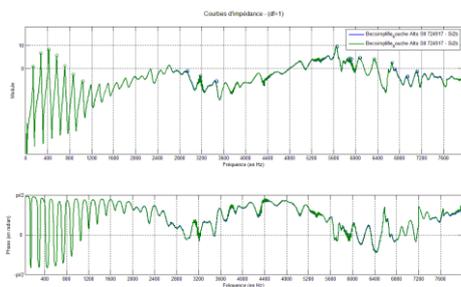


Figure 7 - Courbes d'impédance obtenues pour 2 paramètres géométriques du bec

Nous observons de faibles différences qui sont caractéristiques de l'influence du paramètre modifié sur la courbe d'impédance globale du système. Les différences apparaissent dans des bandes de fréquence définies qui sont les mêmes que celles observées lors de calculs sur des becs seuls. Il est intéressant de noter que selon le paramètre modifié sur le bec les modifications n'apparaissent pas dans les mêmes zones en fréquence. Ceci nous permet d'envisager une identification précise en fonction du paramètre modifié.

Nous utilisons cette méthode pour identifier les paramètres géométriques du bec.

4.4 Etude appliquée à la fonction de réflexion

Nous étendons notre étude à la fonction de réflexion pour évaluer l'effet de l'influence d'un quelconque paramètre sur celle-ci. Nous comparons, à titre d'exemple, la fonction de réflexion d'un bec simulé connecté à un instrument et la fonction de réflexion d'un cylindre modélisant l'adaptateur connecté à un instrument.

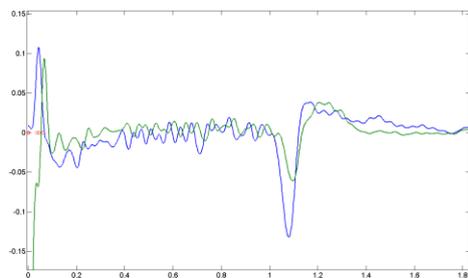


Figure 8 - Fonction de réflexion obtenue selon la méthode mixte avec un adaptateur (courbe bleue) et un bec (courbe verte)

Nous mettons bien en lumière la différence d'impact entre l'adaptateur et le bec sur la fonction de réflexion. Nous souhaitons utiliser ce type d'outils pour évaluer l'influence de tel ou tel paramètre du bec.

Conclusion

La mise en place d'une méthode mixte de calcul de l'impédance nous donne la possibilité d'étudier l'influence de différents paramètres d'une géométrie donnée (ici un bec) sur l'impédance globale de l'instrument en utilisant une mesure sur un instrument réel. Elle nous permet d'utiliser un modèle simulé présentant peu d'incertitudes et que nous réussissons à corréliser avec notre mesure. Nous

pouvons réaliser le calcul sur l'ensemble de l'étendue des notes de l'instrument et ainsi comparer différentes géométries de becs et leur impact sur l'impédance globale sur toute la tessiture de l'instrument.

Nous travaillons à la corrélation de nos simulations avec le ressenti du musicien et à la réalisation de spectrogrammes de façon à identifier au mieux l'influence de modifications géométriques sur les becs.

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. Nous remercions aussi l'atelier des becs de l'usine pour avoir mis à notre disposition les ressources nécessaires à la réalisation des becs prototypes.

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. Chaigne, J. Kergomard, *Acoustique des instruments de musique*, Belin, 2008.
- [3] B. Andrieux, V. Gibiat et J. Selmer., *Modeling of a woodwind mouthpiece using a finite-element method and characterization of its acoustic input impedance*, International Symposium on Musical Acoustics in proceedings ISMA 2014 Le Mans pp. 147-152
- [4] L. Cremer, *On the acoustic boundary layer outside a rigid wall*, Arch. Elektr. Uebertr., 2:235 (1948)