

Entre mesure, modélisation et avis du musicien, une approche innovante pour la facture instrumentale

Louise Hovasse, Jonathan Cottier, Benoit Andrieux
Henri Selmer Paris
Service R&D Clarinettes
25, rue Maurice Bertheaux
78711 Mantes la Ville
Tél : 01 30 92 33 99
E-mail : lhovasse@selmer.fr

Résumé

Cela fait une dizaine d'années que l'entreprise Henri Selmer Paris, fabricant d'instruments de musique depuis 1885, développe la recherche en acoustique au sein de son département R&D. Celle-ci est abordée sous différents angles comme la mesure, la modélisation par éléments finis et, bien sûr, les musiciens eux-mêmes. En effet, c'est le musicien qui, au cœur du processus R&D de l'entreprise, définit le cahier des charges des améliorations à effectuer ou des nouveaux instruments à produire. Ces trois façons d'aborder la recherche en acoustique sont intimement liées car elles se nourrissent l'une de l'autre. C'est ainsi que l'ensemble des mesures effectuées et analysées, que ce soit les mesures d'impédance d'entrée des saxophones ou des clarinettes ou les mesures au microphone, sont validées par un essai musicien, et vice-versa tandis que les modèles de simulations sont vérifiés par des mesures réelles afin de simplifier le processus sans avoir à passer par la réalisation de multiples prototypes.

Abstract

Over the past ten years, Henri Selmer Paris has developed acoustic research within its R&D department. This acoustic research is now being addressed in different ways. Indeed, measurement, finite element modeling and musicians themselves are used. Indeed, the musician is at the heart of the company's R&D process because it is he who defines the specifications for the improvements to be made or the new instruments to be produced. These three approaches to acoustic research are intimately linked since they feed on each other. All the measurements made and analyzed, whether the input impedance measurements of the saxophone or clarinet or the microphone measurements, are verified by a musician test, and vice versa, while the simulation models are verified by real measurements and then simplify this process without necessarily having to go through the realization of multiple prototypes.

Henri Selmer Paris est un fabricant mondial d'instrument de musique depuis 1885. Dès 1898, date de fabrication des premières clarinettes, l'entreprise s'associe à de grands noms comme Adolphe Sax auquel l'entreprise va racheter le brevet du saxophone en 1922. Ce choix de s'associer à de grands musiciens provient de la nécessité de répondre à la demande musicale d'un musicien, d'un compositeur ou autre acteur du secteur musical. La facture instrumentale est la réponse à cette demande d'amélioration qui peut être de l'ordre du timbre, de la justesse, de la tessiture ou encore de l'ergonomie. Le musicien devint alors « le juge de paix », celui qui donne son avis définitif sur le développement des nouveaux instruments. En effet, on trouve dans les musées d'instruments de musique de nombreux prototypes d'instruments innovants mais qui ne correspondaient pas à une demande musicale ou qui n'avaient pas, ou bien plus tard, suscité ce besoin, d'où leur faible diffusion.

Depuis plus de dix ans, l'entreprise Henri Selmer Paris a développé son département R&D en y intégrant notamment la recherche en acoustique. Les moyens mis en place permettent à l'entreprise de capitaliser et de comprendre le fonctionnement des instruments sans oublier de faire le lien avec les musiciens. Les différentes facettes de cette recherche en acoustique, les mesures comme la modélisation sont effectuées ipso facto toujours en lien avec les musiciens.

Mesures

Système de mesure

Les mesures acoustiques effectuées au sein de l'entreprise Henri Selmer Paris sont essentiellement des mesures d'impédance d'entrée. Elle est mesurée via la méthode TMTTC (Two Microphones, Three calibrations) [1] que nous

avons adaptée avec quatre microphones afin d'obtenir de meilleurs résultats sur l'ensemble de la plage de fréquence mesurée [0 ; 8000Hz]. Cette plage de fréquence a été déterminée de sorte que l'ensemble de la réponse en onde plane des instruments soit mesuré. L'installation utilisée est présentée Figure 1.



Fig. 1 : Pont d'impédance utilisé pour les mesures d'impédance d'entrée de saxophones et clarinettes

Les avantages de ce type de système sont multiples. En effet, il donne des mesures fiables, précises, répétables et rapides (une vingtaine de minutes pour mesurer l'ensemble des notes d'un instrument). La précision de cet outil de mesure est de 0,2 Hz, soit l'équivalent de 2,5 cents¹ pour les premiers pics d'impédance des notes graves des instruments, ce qui correspond sensiblement à la sensibilité de justesse des musiciens.

De plus, il est facilement améliorable en y ajoutant de l'écoulement ainsi qu'un gradient thermique afin de se rapprocher au plus près des conditions de jeu des instruments.

Le logiciel d'acquisition et d'analyse des mesures est programmé avec Matlab®.

Les mesures d'impédance obtenues sont représentées suivant leur module et leur phase (Figure 2).

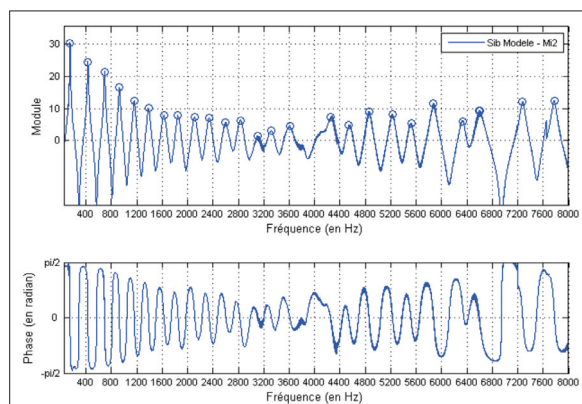


Fig. 2 : Impédance d'un Mi grave de clarinette, module et phase

Les analyses faites à partir de ces mesures d'impédance sont, entre autres, l'étude de l'harmonicité des pics d'impédance entre eux et par rapport à la gamme tempérée, le coefficient de qualité des pics d'impédance, la fonction de réflexion [2].

Création d'abaques et amélioration de la justesse

Abaques

L'acoustique des instruments de musique à vent est essentiellement guidée par la géométrie de l'instrument. Le processus de recherche pour la compréhension du fonctionnement, tant sur les saxophones que sur les clarinettes, est basé sur la réalisation d'abaques. Pour la création de ces abaques, un paramètre de l'instrument est choisi et est modifié graduellement. Par exemple, pour une modification de diamètre d'une cheminée, plusieurs corps de clarinettes ou saxophones sont fabriqués avec une seule cheminée modifiée et dont on fait varier le diamètre, par exemple, par pas de 0,1 mm à plus ou moins 0,5 mm autour du diamètre nominal de cette cheminée.

Ce type d'abaque est réalisé pour différents paramètres, tels que les diamètres de perce² sur de petites portions de l'instrument, les hauteurs de cheminées², la position des cheminées, etc.

Pour chaque modification, les impédances d'entrée de toute la gamme de l'instrument sont mesurées, ainsi les répercussions de la modification ponctuelle peuvent être analysées sur l'ensemble du registre.

Les faisceaux de courbes obtenus ressemblent à celui présenté en Figure 3. Il s'agit de la représentation de l'harmonicité du second pic d'impédance par rapport à la justesse de la gamme tempérée pour une modification du diamètre de perce d'un baril.

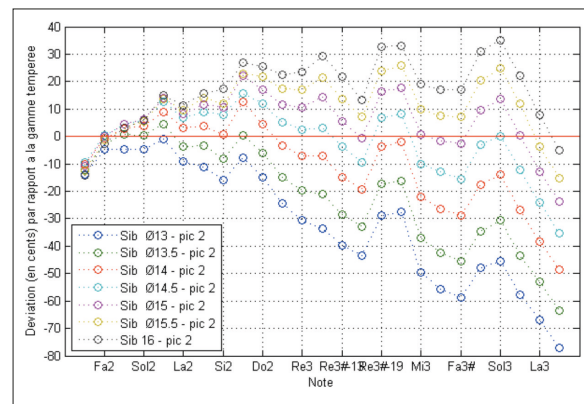


Fig. 3 : Harmonicité par rapport à la gamme tempérée du second pic d'impédance d'une clarinette pour différents diamètres de perce du baril

Une fois ces abaques créés, nous pouvons mettre en application ces résultats sur un instrument « réel » selon la demande du musicien.

Application : Amélioration de la justesse de la main gauche du saxophone

Suite à l'analyse des abaques déjà obtenus et du problème de justesse du musicien, une modification de la perce du bocal d'un saxophone alto a été effectuée. En effet, un musicien a détecté un problème de justesse dans la main gauche (les notes les plus hautes de chaque registre) :

1- Rappel : Le cent est une unité de mesure notamment utilisée en musique. Une octave est composée de 1 200 cents et un demi-ton (plus petit écart entre deux notes d'une gamme tempérée) est composé de 100 cents.

2- Rappel : pour les instruments à vent, nous appelons « perce » le tube principal et « cheminée » les trous latéraux. L'ouverture et la fermeture de ces cheminées permettent de faire l'ensemble des notes de la gamme tempérée.

le second registre est trop haut par rapport au premier, il faut donc baisser le second registre sans baisser le premier registre. Une géométrie de bocal a donc été définie pour pouvoir répondre à ce cahier des charges. La figure 4 montre le rapport d'harmonicité entre le second et le premier pic d'impédance d'un saxophone alto avec les deux bocaux (la courbe bleue correspond au bocal initial et la courbe verte au bocal modifié). La modification semble donc répondre à la demande du musicien.

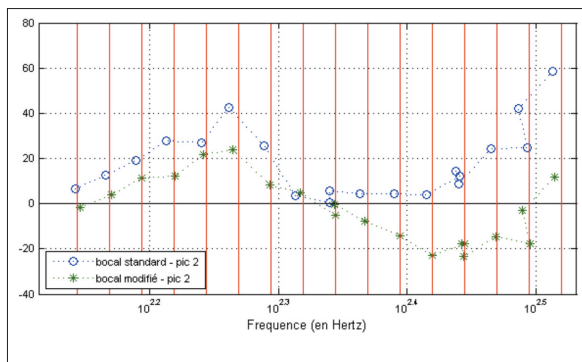


Fig. 4 : Profil d'harmonicité du saxophone avec le bocal standard (bleu) et avec le bocal modifié (vert)

Ces deux bocaux ont ensuite été essayés par le musicien demandeur, qui a validé cette modification.

Mesures en situation

Des mesures au microphone sont également réalisées lors d'essais musiciens. Elles servent notamment à comparer des paramètres que nous avons du mal à mesurer ou analyser sur les mesures d'impédance. Pour les études sur le timbre de l'instrument, par exemple, il est plus facile de mettre en avant des différences sur des mesures microphoniques que sur des mesures d'impédance. De plus, elles nous permettent de comprendre le vocabulaire utilisé par le musicien. En effet, il est important de savoir ce que veut dire un musicien lorsqu'il veut un instrument plus timbré, plus rond ou encore lorsqu'il qu'il juge qu'un instrument est creux, paramètres qui sont analysables sur des spectres ou spectrogrammes.

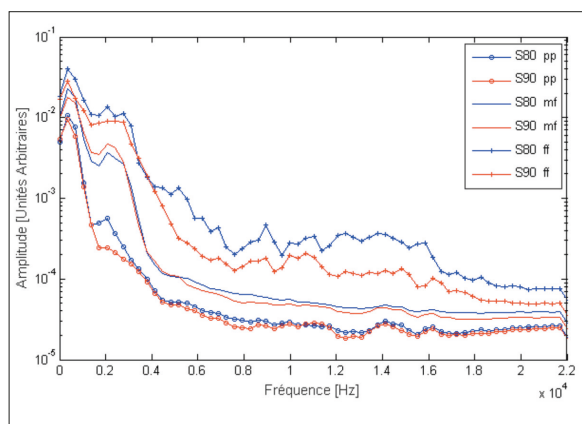


Fig. 5 : LTAS de 2 bocaux différents pour trois différents niveaux sonore

Ces mesures permettent également d'étudier plus facilement l'acoustique des bocs. Le bec a une géométrie très spécifique et n'a notamment pas de plan d'entrée permettant d'effectuer une mesure sur le pont d'impédance. C'est pourquoi, l'étude acoustique des bocs repose essentiellement sur l'analyse des spectres, spectrogrammes, spectre longue durée (LTAS) ou densité spectrale.

Ces mesures peuvent également se faire en champ proche et en champ lointain pour comparer ce qu'entend le musicien ou le spectateur. De ce fait, a été mis en évidence et quantifié les différences entre certains bocs de saxophone alto de la gamme Selmer à différentes nuances (voir figure 5).

Mesure et matière

La question de l'influence de la matière est un des sujets préférés entre acousticiens et musiciens, et plus particulièrement pour les instruments à vent. C'est ainsi que la grenadille, bois précieux utilisé pour la fabrication des clarinettes venant d'être classé à l'annexe 2 du classement CITES [3], des recherches concernant son remplacement sont en développement au sein de l'entreprise Henri Selmer Paris.

Pour cela, des essais de clarinettes ont été réalisés en différentes matières. Ces instruments ont été comparés objectivement par des mesures au pont d'impédance et subjectivement par des essais musiciens.

Les clarinettes, dans trois matériaux différents, étant de géométrie identique, les paramètres observés ne sont donc pas les harmonicités entre les pics, qui sont les mêmes pour les trois instruments, mais plutôt la « forme » de ces pics et la décroissance de l'enveloppe de l'impédance d'entrée. En effet, les coefficients de qualité des pics d'impédance ont été analysés, et puisque la géométrie est identique et que les pics d'impédance sont identiques, la différence « géométrique » la plus importante est donc l'état de surface de la perce de la clarinette. Théoriquement, des états de surface différents sur un tube produisent des coefficients de qualité différents sur les pics d'impédance : plus un état de surface est dégradée plus les pertes aux parois sont importantes et plus le coefficient de qualité est faible.

C'est ce qui a été observé sur les mesures effectuées sur les trois instruments en trois matériaux différents.

Note	instrument	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Mi 2	Grenad.	13.9	22.1	29.9	24.2	19.8	19.6	16	19.7	19.5	21.2
	Mat. 1	16.2	23.4	34.3	27.1	23.2	18.5	20.2	19.5	19	19.3
	Mat. 2	15.2	19.6	26.2	25.3	19.6	19.5	19.3	17.3	18.2	18.6
Mi 3	Grenad.	17.2	25.6	16.3	16.3	17	21.4	21.6	30.8	18.1	18.1
	Mat. 1	17.3	26.9	19	18.2	19.5	19.8	23	29.2	23.8	23.9
	Mat. 2	16	23.7	17.1	16.8	18	19.5	20.6	25.4	19.8	19.3

Tabl. 1 : Tableau des coefficients de qualité des 10 premiers pics d'impédance pour les trois clarinettes en différents matériaux et pour deux notes différentes

Ces résultats montrent que l'instrument Mat. 2 a globalement de plus petits coefficients de qualité que l'instrument en grenadille, tandis que l'instrument en Mat. 1 a les

mêmes coefficients de qualité que la clarinette en grenadille, voire légèrement plus haut. Ces résultats ont été traduits lors de l'essai musicien par un timbre plus « clair et creux » pour la clarinette en Mat. 2 tandis que la clarinette en Mat. 1 a été jugée plus « timbrée et résonnante ». Les observations du musicien sont donc en accord avec les résultats expérimentaux.

Les mesures d'impédance et mesures in situ permettent de comprendre le fonctionnement des instruments mais nécessite également de fabriquer des prototypes pour chaque modification ce qui est coûteux pour l'entreprise et peut nécessiter plusieurs mois de fabrication. Des solutions de « prototypage virtuel » sont donc envisagées pour créer des abaques comme présentés en début de cette partie ou bien pour vérifier une hypothèse. La solution choisie par la société Henri Selmer Paris est le calcul par éléments finis.

Modélisation par éléments finis

Utilisation des éléments finis

Les éléments finis ont été choisis, par comparaison à d'autres techniques de calculs comme le calcul par matrice de transfert, car les éléments finis permettent le calcul des interactions entre ce qu'il se passe à l'intérieur et à l'extérieur du tube et surtout de pouvoir prendre en compte les réflexions des ondes dans le tube. Les fichiers 3D issus de la production peuvent être utilisés, ce qui facilite la création du modèle. De plus dans un second temps, les interactions entre la paroi et la colonne d'air contenu dans cet instrument pourront ainsi être calculées.

Néanmoins cette méthode de calcul présente aussi quelques inconvénients. En effet, il est nécessaire de créer un maillage avec un minimum de cinq éléments par longueur d'onde, et, puisque les simulations sont effectuées jusqu'à 8 000 Hz, il y a une très nette surdéfinition pour les basses fréquences. De ce fait les temps de calculs peuvent atteindre près de 24h pour le calcul d'un tube conique ouvert avec deux cheminées ouvertes. Afin de diminuer le temps calcul et de n'avoir à calculer par éléments finis qu'une petite partie de la géométrie d'un instrument, les calculs ont été tout d'abord effectués par couplage entre une partie simulée et une partie mesurée.

Hybridation mesure-calcul

L'hybridation mesure-calcul consiste à définir par éléments finis une petite partie de l'instrument, ici le bocal du saxophone. Afin de calculer l'impédance de l'ensemble de l'instrument, l'impédance mesurée en entrée du corps du saxophone est appliquée en sortie du bocal simulé via le logiciel de calcul par éléments finis [4]. Les résultats obtenus par cette méthode sont satisfaisants puisque les écarts maximums obtenus entre les mesures sur le pont d'impédance d'un instrument complet et de cet instrument hybride sont de huit cents sur le premier pic et d'environ cinq cents sur le reste de l'impédance.

Validation des modèles en tubes ouverts

La simulation par éléments finis des éléments ouverts nécessite, lorsque les éléments de frontière (BEM) ne sont pas disponibles, de mailler une demi-sphère en sortie du tube ce qui augmente considérablement le nombre d'éléments à mailler et de surcroît les temps de calcul.

Suite à une série d'essais, il a été défini que le diamètre de la sphère doit être au moins égale à cinq fois le diamètre de sortie du tube.

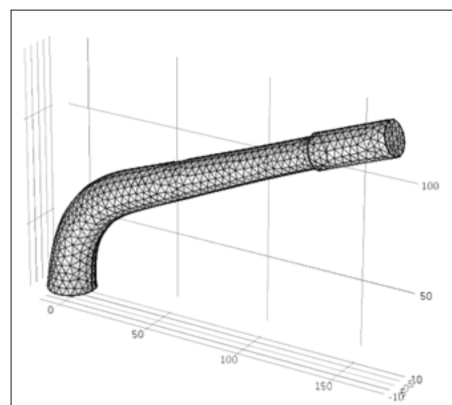


Fig. 6 : Bocal de saxophone Alto maillé pour le calcul hybride en éléments finis : l'entrée du bocal est en haut à droite tandis que la sortie est en bas à gauche, là où est appliquée l'impédance du corps de saxophone mesurée

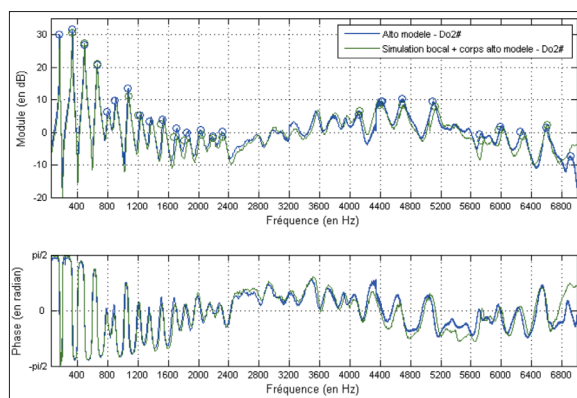


Fig. 7 : Impédance d'entrée mesurée de l'instrument modèle (bleu) et impédance hybride issue du calcul entre un bocal simulé et un corps mesuré (en vert)

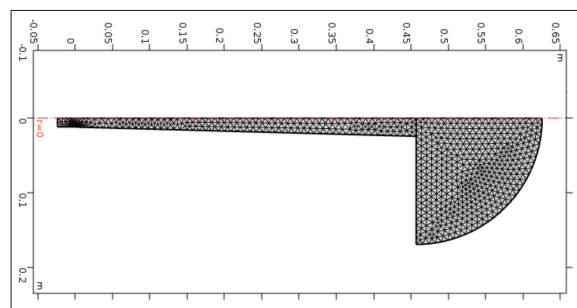


Fig. 8 : Maillage du modèle utilisé pour le cône simple ouvert coté grand diamètre

Par exemple, pour valider le modèle simple d'un cône ouvert, une géométrie de révolution axisymétrique est utilisée, ce qui limite le nombre d'éléments. Dans cette configuration, le cône est composé de 682 éléments tandis que la sphère de rayonnement est composée de 936 éléments.

Ces simples simulations ont permis de valider les modèles d'impédance aux parois utilisées pour le calcul de l'impédance d'entrée par comparaison aux mesures faites sur le pont d'impédance. Les différences obtenues sur les fréquences des pics d'impédance est de l'ordre de moins de cinq cents.

Ce modèle simple étant validé, il est ensuite possible de réaliser des modèles plus complexes en 3D avec des ajouts de cheminées ouvertes.

Ajouts de cheminées

L'ajout des cheminées ouvertes dans le calcul par éléments finis augmente considérablement le nombre d'éléments par rapport au modèle simple présenté précédemment. Le temps de calcul passe d'environ 30 minutes pour le modèle simple à quelques heures pour un modèle à deux cheminées. Le calcul de l'impédance d'entrée pour un tube avec cheminée est réalisé en deux temps pour gagner du temps de calcul. Dans un premier temps, le calcul de l'impédance est réalisé avec un maillage de base. Puis dans un second temps, le maillage est raffiné sur les cheminées, elles sont divisées en une soixantaine de facettes, sur lesquelles sont calculés les angles des vitesses aux parois [5]. Avec l'ensemble de ces paramètres, l'impédance est recalculée autour des pics d'impédance calculés précédemment. Les résultats obtenus sur les premiers pics d'impédance sont présentés en tableau 2.

N° Pic	Ecart (cents)
Pic1	4.9
Pic2	1.2
Pic3	6.8
Pic4	9.8
Pic5	5.3
Pic6	7.9
Pic7	1.5
Pic8	4.5

Tabl. 2 : Écart des fréquences en cents entre la mesure et la simulation par éléments finis

Les résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus par mesure. On obtient des différences satisfaisantes entre la mesure et la simulation d'environ cinq cents sur l'ensemble des pics.

Conclusion

La démarche de recherche pour la compréhension du fonctionnement des instruments à anche simple au sein de l'entreprise Henri Selmer Paris est donc guidée par le musicien et ses besoins. Elle est également aussi basée sur l'expérimentation. Néanmoins, les travaux sur la simulation en étant au début, le lien entre ces travaux et le résultat obtenu pour le musicien n'a pas encore pu être fait.

De plus, les études menées sur ce sujet ont été grandement nourries par les connaissances empiriques des techniciens de l'entreprise et cela a également pu permettre de capitaliser une partie de leur connaissance tout en les vérifiant expérimentalement et objectivement.

Références bibliographiques

- [1] V. Gibiat et F. Laloë, Acoustical impedance measurements by the two microphone three calibration (TMTC) method, *J. Acoust. Soc. Am.*, 88 p. 2533-2541, 1990
- [2] L. Hovasse, J. Cottier, J. Selmer, V. Gibiat, Utilisation de la fonction de réflexion comme outil de traitement et d'analyse des mesures d'impédance, *Congrès Français d'acoustique Le Mans*, 2016
- [3] <https://cites.org/fra/app/index.php>
- [4] J. Cottier, B. Andrieux, J. Selmer, V. Gibiat, Aide à la conception par hybridation du calcul en éléments finis et de la mesure de l'impédance d'entrée sur le saxophone alto, *Congrès Français d'acoustique Le Mans*, 2016
- [5] J. Cottier, M. Jeanneteau, J. Selmer, V. Gibiat, Aide à la conception par la simulation en éléments finis d'un corps de saxophone alto, *Congrès Français d'acoustique Le Havre*, 2018