

## CFA/VISHNO 2016

**Utilisation de la Fonction de Réflexion Comme Outil de  
Traitement et d'Analyse des Mesures d'Impédance**L. Hovasse<sup>a</sup>, J. Cottier<sup>a</sup>, J. Selmer<sup>a</sup> et V. Gibiat<sup>b</sup><sup>a</sup>Henri Selmer Paris, 25 rue Maurice Berteaux, 78711 Mantes-La-Ville, France<sup>b</sup>Laboratoire PHASE, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse  
Cedex 4, France  
lhovasse@selmer.fr

LE MANS

La mesure de l'impédance d'entrée des instruments à vent est utilisée depuis de nombreuses années au sein du service R&D de l'entreprise Henri Selmer Paris pour caractériser objectivement les différents instruments produits, et faciliter le développement des nouveaux modèles. L'influence connue depuis longtemps de l'arrangement des pics d'impédance sur certaines propriétés acoustiques de l'instrument a ainsi été largement appliquée au design des instruments. L'impédance au-delà des trois premiers pics peut difficilement être interprétée par l'analyse de l'alignement de ces pics et notamment au-delà de la fréquence de coupure du pavillon, ou du réseau de trous ouverts. C'est pourquoi un outil spécifique a été mis en place. La fonction de réflexion, en transformant l'ensemble d'une bande de fréquence ou l'ensemble des fréquences où la mesure de l'impédance a été réalisée, permet une analyse spatiale, ou temporelle, et permet de relier la géométrie aux caractéristiques acoustiques de l'instrument. Il est alors possible, de tracer les fonctions de réflexion à partir de différentes plages de fréquences et d'associer un élément géométrique de l'instrument à l'influence d'un ou plusieurs pics d'impédance. Il a été possible de mettre en évidence des caractéristiques communes sur la facilité d'émission du grave du saxophone.

## 1 Introduction

L'utilisation de mesures d'impédance d'entrée d'instrument à vent pour l'aide à la facture instrumentale s'est développée ces dernières années et plus seulement dans les laboratoires mais également au sein des fabricants d'instruments à vents. Ces mesures et leurs analyses correspondantes permettent de mieux comprendre le fonctionnement de ces instruments et ainsi faciliter le développement de nouveaux instruments.

La mise en place de ces mesures au sein de l'entreprise Henri Selmer Paris a permis de comprendre le fonctionnement des instruments et ainsi corriger plus facilement des défauts trouvés par les musiciens.

Les différentes analyses déjà menées et la littérature concernant l'acoustique instrumentale permettent de mettre en avant le rôle des premiers pics d'impédance. Mais très peu d'études ont été effectuées sur l'influence des hautes fréquences. Les hautes fréquences ne se comportant pas comme les pics en basse fréquence, le calcul de l'harmonicité n'est pas pertinent. C'est pourquoi, la mise en place de l'analyse par la fonction de réflexion par bande de fréquence semble adaptée.

La mise en place de cet outil a nécessité de faire des essais sur des systèmes simples, tels qu'un tube cylindrique ouvert percé, afin de mettre en place le système de fenêtrage. Une analyse générale est effectuée sur un saxophone pour enfin se concentrer sur la compréhension du problème de la difficile émission du Si grave d'un saxophone Alto.

## 2 La fonction de réflexion comme outils d'analyse

### 2.1 Généralités

La fonction de réflexion est une fonction mathématique calculée à partir de la mesure d'impédance d'entrée d'un système. L'utilisation de cette fonction, ou du principe de réflectométrie est souvent utilisée en génie civil et principalement pour la détection de fuites dans les conduits. L'utilisation de ce principe en acoustique musicale est plus rare et est surtout utilisée pour de la reconstruction de perce de cuivre [1].

L'objectif étant d'étudier les hautes fréquences de l'impédance, ou au-delà des trois premiers pics d'impédance, la fonction de réflexion se justifie par le fait que l'analyse de l'harmonicité de ces pics supérieurs est

difficile car ils ne suivent pas de peigne fréquentiel théorique. L'utilisation de cette fonction permet d'avoir une représentation spatiale, ou temporelle, de la géométrie « acoustique » du système mesuré. La condition d'ondes planes est respectée pour les mesures d'impédance, les fonctions de réflexion peuvent donc être tracées et analysées.

La formule de la fonction de réflexion est la suivante :

$$r(t) = TF^{-1}[R(f)] \quad (1)$$

Avec  $R(f)$  le coefficient de réflexion dans le domaine fréquentiel :

$$R(f) = \frac{Z(f)-1}{Z(f)+1} \quad (2)$$

Où  $Z(f)$  est l'impédance normalisée mesurée.

### 2.2 Fenêtrage fréquentiel

L'objectif du fenêtrage fréquentiel est d'analyser l'impédance par bande de fréquence en s'affranchissant de l'analyse de l'harmonicité. L'analyse par bande de fréquence implique donc de mettre en place un fenêtrage fréquentiel.

Différentes études portant sur la fonction de réflexion et le fenêtrage [2, 3] montrent que les limites hautes et basses fréquence doivent être choisies de sorte que ces limites correspondent à des minima du module de l'impédance, ainsi le phénomène de Gibbs est diminué. Malgré cette précaution le phénomène d'ondulation parasite est visible. C'est pourquoi nous choisissons d'appliquer une fenêtre à bords doux à la plage de fréquence souhaitée.

Dans [2] le fenêtrage n'est pas conseillé car il s'agit d'une application à de la synthèse sonore, mais comme nous travaillons par comparaison de différentes mesures, nous acceptons le défaut d'amplitude et de décalage temporel induit par le fenêtrage fréquentiel.

De plus, l'utilisation d'une fenêtre à bords doux permet de pallier au fait qu'en hautes fréquences, au-delà de la fréquence de coupure du saxophone, la détection de minima d'impédance est plus difficile.

La Figure 1 montre l'influence du type de fenêtrage appliqué sur la mesure d'impédance d'un tube cylindrique de 481mm de longueur et 12.8mm de diamètre intérieur, pour une plage de fréquence de [50 ;5878] Hz.

La Figure 1 montre que le fenêtrage à bords doux annule les oscillations parasites par rapport à la fenêtre rectangle. Mais on peut également observer que le fenêtrage

diminue nettement l'amplitude du pic de la fonction de réflexion. La fonction de réflexion avec le fenêtrage à bords doux s'éloigne également de la fonction de réflexion théorique d'un tube. En effet, un tube ouvert sans perte, présente un pic d'amplitude -1 à la première réflexion. Si l'on considère que la différence entre les courbes de réflexion issues de la mesure d'impédance et la courbe théorique est constante sur une même bande de fréquence, on peut utiliser la fonction de réflexion avec fenêtrage à bords doux pour la comparaison de deux instruments.

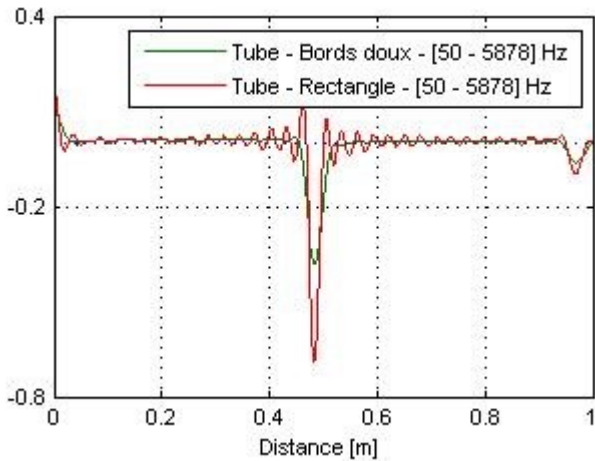


Figure 1 : Fonction de réflexion d'un tube de 0.48m. En rouge avec un fenêtrage rectangulaire, en vert avec un fenêtrage à bords doux.

Dans un second temps, un fenêtrage par bande de fréquence plus fine est mis en place. Ce fenêtrage a pour objectif de mettre en évidence les réflexions des ondes acoustiques par bande de fréquence.

Le tube utilisé précédemment est percé d'un trou de 5mm de diamètre à 51.35 mm de l'extrémité ouverte. La Figure 3 représente la fonction de réflexion de ce tube avec le trou fermé et ouvert. En Figure 2 sont représentées les impédances d'entrée correspondantes.

On peut remarquer en Figure 2 que l'ouverture du trou n'a d'impact qu'en basses fréquences. En effet, les quatre premiers pics d'impédance du tube avec trou ouvert suivent un peigne théorique fonction de la longueur du tube, alors qu'ensuite les pics d'impédance semblent s'aligner sur les pics d'impédance du tube avec trou fermé. La fréquence à partir de laquelle les pics d'impédance se superposent peut être considérée comme la fréquence de coupure du trou ouvert. Cette fréquence de coupure est différente de la fréquence de coupure d'un réseau de cheminées (ou trous) ouverts, car un réseau de cheminées ouvertes agit comme un filtre passe-bande sur l'impédance d'entrée du système [4]. En Figure 3 sont tracées les fonctions de réflexions, issues d'un fenêtrage à bords doux, de ces deux mesures d'impédance sur la bande de fréquence [50;6750]Hz.

Les deux courbes de réflexion présentées confirment que les pics d'impédances présents sur la mesure du tube avec le trou ouvert peuvent correspondre à la réponse du tube dans toute sa longueur.

Sont tracées en Figure 4 les courbes de réflexion des deux configurations du tube pour la plage de fréquence [50;1420]Hz qui correspond à la bande de fréquence des 4 premiers pics d'impédance des deux configurations. Ces deux courbes présentent les mêmes caractéristiques concernant l'amplitude et la largeur du pic de réflexion,

excepté que l'un correspond à la position de la fin du tube et l'autre à la position du trou. Le trou, dans cette bande de fréquence est donc vu comme la fin du tube.

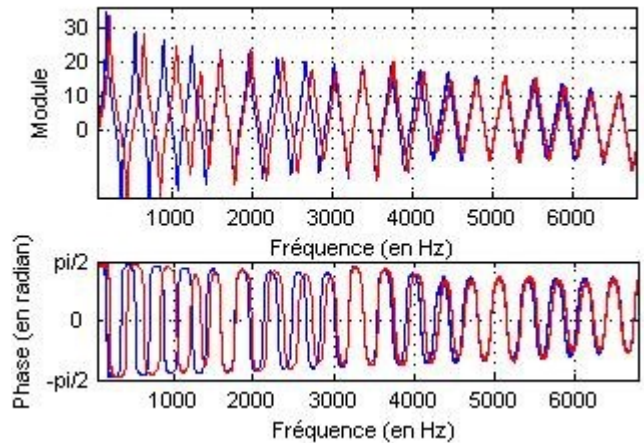


Figure 2: Impédance d'entrée du tube ouvert avec trou fermé en bleu et trou ouvert en rouge.

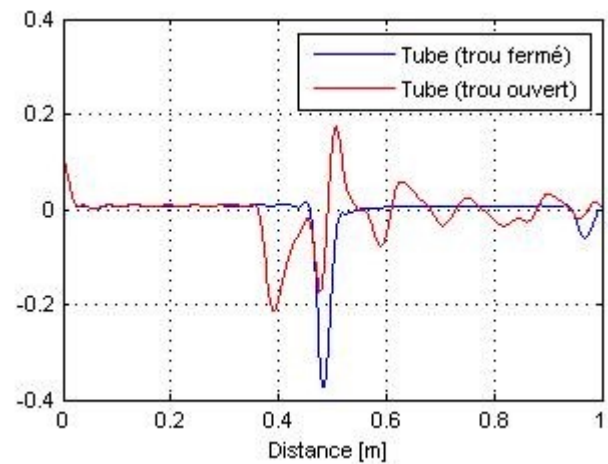


Figure 3: Fonction de réflexion du tube avec trou fermé (bleu) et trou ouvert (rouge) sur la bande de fréquence [50 6750] Hz.

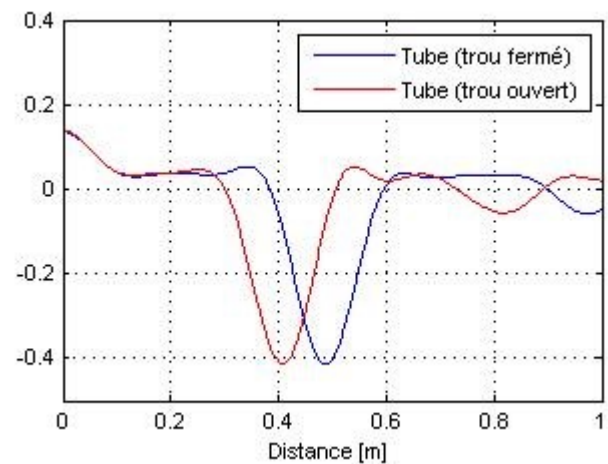


Figure 4: Fonction de réflexion du tube avec trou fermé (bleu) et ouvert (rouge) sur la bande de fréquence [50 1420] Hz.

Les fonctions de réflexion de ces deux configurations sur la bande fréquence [1420 ; 6750]Hz sont tracées en Figure 5.

On peut remarquer que n'apparaît pas uniquement le pic de fin de tube pour le cas où le trou est ouvert. Cela est dû au fait que les pics ne sont pas exactement alignés sur ceux pour la configuration « trou fermé ».

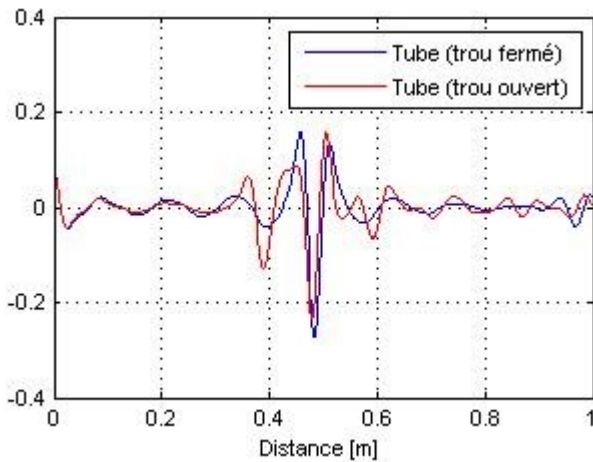


Figure 5: Fonction de réflexion du tube avec trou fermé (bleu) et ouvert (vert) sur la bande de fréquence [1450 ; 6750]Hz.

L'analyse de ce cas simple par la fonction de réflexion permet de mettre en avant certaines caractéristiques des mesures d'impédance avant de commencer à analyser un système plus complexe tel qu'un saxophone. Le cas concret de l'analyse de l'impédance d'un saxophone porte sur la difficile émission du grave du saxophone Alto et plus particulièrement sur la différence de difficulté d'émission entre un Sib grave et un Si grave.

### 3 Le problème du grave du saxophone

Le saxophone est connu auprès des musiciens pour être un instrument assez facile d'émission, excepté dans le grave du premier registre, du Sib2 au Ré2.

Plusieurs études ont montrées qu'un certain alignement des fréquences des premiers pics d'impédance aidait pour l'émission du premier registre du saxophone [5].

L'utilisation de la fonction de réflexion par bande de fréquence sur deux saxophones supposés identiques, excepté la géométrie du pavillon, permet de mettre en évidence l'influence des pics d'impédance supérieurs aux trois premiers.

#### 3.1 Etat des lieux, généralités

Le saxophone est un instrument conique comportant un pavillon et d'un réseau de cheminées que l'on peut ouvrir ou fermer pour pouvoir jouer les notes souhaitées. Le pavillon comme le réseau de cheminées, lorsqu'elles sont ouvertes, ont une caractéristique acoustique commune : une fréquence de coupure. La Figure 6, montre que la fréquence de coupure de l'instrument dans sa globalité se situe donc autour de 2000Hz. Cette fréquence de coupure est due à la discontinuité de section entre le bec et l'entrée du bocal. La lisibilité des fréquences de coupure du

pavillon et du réseau de cheminées est donc peu lisible, mais des expériences préliminaires ont montré qu'elles coïncidaient à la fréquence de coupure de la discontinuité dans le bec.

En Figure 7 et Figure 8 sont tracées les fonctions de réflexion correspondant aux mesures d'impédance d'entrée mesurée en Figure 6, respectivement sur les bande de fréquence [50;7000]Hz et [50;2000]Hz. La différence principale entre ces deux graphiques est que de petites oscillations apparaissent en plus des réflexions de fin de tube. Ces réflexions correspondent aux réflexions acoustiques faites au niveau des cheminées fermées de l'instrument. Les cheminées sont donc vues comme un élargissement et un rétrécissement du tube acoustique.

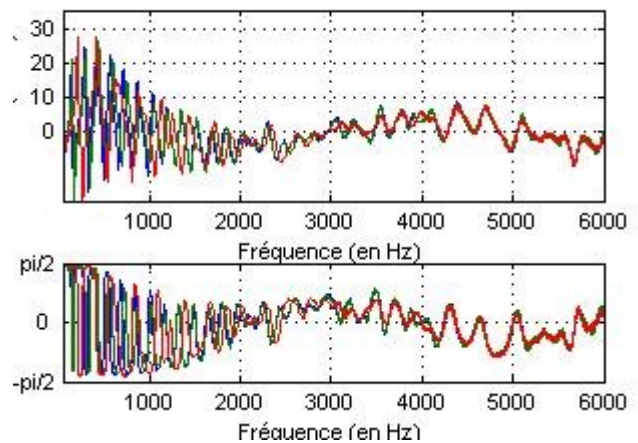


Figure 6 : Courbes d'impédance d'entrée du Sib grave (bleu), Si grave (vert) et Fa# grave (rouge) du saxophone Alto.

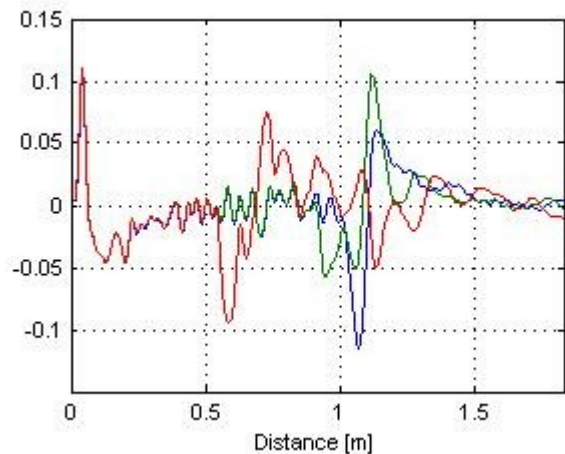


Figure 7 : Fonction de réflexion du Sib grave (bleu), Si grave (vert) et Fa# grave (rouge) sur la bande de fréquence [50;7000]Hz.

D'autre part, le Fa# grave du saxophone est un doigté dit de fourche, car la cheminée suivant la première cheminée ouverte est fermée, laissant ainsi une grande portion de tube fermé. En Figure 7, on observe que la fonction de réflexion du Fa# grave est composée de 2 pics principaux. Ces deux pics sont dus à la réflexion à la première cheminée ouverte et à la cheminée ouverte après la cheminée fermée. On observe le même phénomène sur le Si grave, qui peut donc être considéré comme un doigté de fourche.

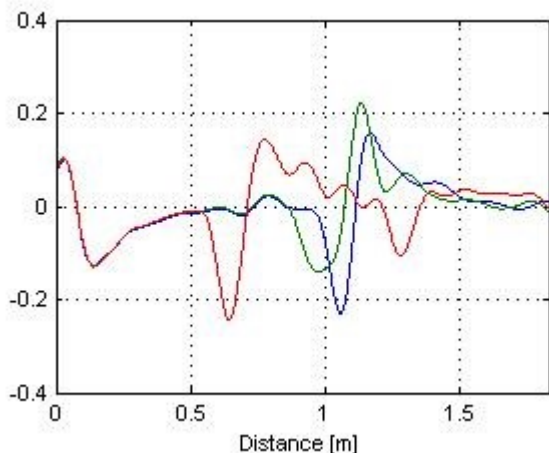


Figure 8 : Fonction de réflexion du Sib grave (bleu), Si grave (vert) et Fa# grave (rouge) pour la plage de fréquence [50;2000]Hz

### 3.2 Comparaison de deux pavillons

Les deux saxophones étudiés dans cette partie sont deux saxophones du même modèle, joués et mesurés avec le même bocal, afin de diminuer les risques de différences entre les deux instruments. La différence entre ces deux saxophones est la longueur du pavillon : l'un des deux saxophones a son pavillon coupé au pied de la première cheminée

Nous nous focaliserons sur deux notes en particulier : le Si et le Sib grave du saxophone. Le Sib grave du saxophone (toutes les cheminées sont fermées) n'est pas considéré comme une note difficile d'émission alors que le Si grave est considéré comme difficile.

Ces deux instruments ont été essayés par un musicien professionnel afin de déterminer si l'un des instruments a une émission du Si grave plus facile. Les deux instruments sont présentés en Figure 9.



Figure 9 : Les saxophones utilisés pour les mesures

L'essai musicien de ces deux instruments a montré que le Si grave du saxophone avec pavillon raccourci est plus facile d'émission que pour le saxophone normal. La facilité d'émission du Si grave avec pavillon coupé semble se rapprocher de l'émission du Sib grave du pavillon normal.

Nous nous intéressons tout d'abord à l'harmonicité des trois premiers pics d'impédance de ces deux notes pour ces deux saxophones en Tableau 1. On peut remarquer que

l'harmonicité des deux instruments est très proche. On suppose donc valable l'hypothèse que l'harmonicité des deux saxophones est la même sur les trois premiers pics.

Tableau 1: Calcul de l'inharmonicité des trois premiers pics pour le Si grave des deux instruments.

Pavillon normal		Pavillon coupé		Comparaison différence des inharmonicité
Fréquence [Hz]	Inharmonicité [%]	Fréquence [Hz]	Inharmonicité [%]	
149		152.4		
297.4	99.60	305.00	100.13	0.53
443.4	-50.91	453.90	-51.18	-0.27

D'autre part, les fréquences des premiers pics d'impédance de ces deux notes ont une différence de 3.4 Hz. L'instrument est donc vu plus court ce que l'on observe en Figure 10 où sont tracées les fonctions de réflexion du Sib et Si grave du saxophone normal et du Si grave du saxophone avec pavillon coupé.

Sur cette même figure, on peut remarquer que le pic principal de réflexion du Si grave du saxophone dont le pavillon est coupé à la même forme que le Sib grave du saxophone normal. On peut donc supposer que leur comportement acoustique est semblable, ce qu'a montré l'essai musicien.

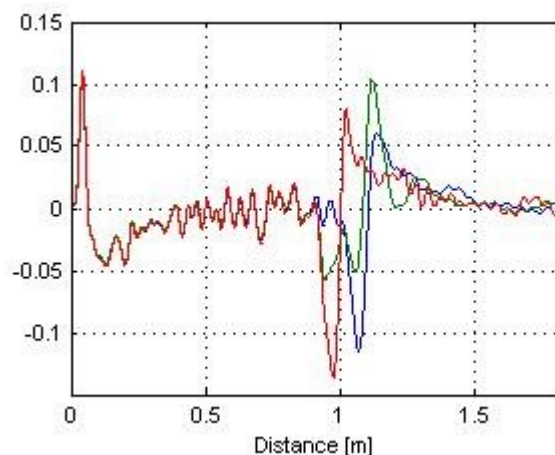


Figure 10 : Fonction de réflexion du Sib grave (bleu), Si grave (vert) du saxophone normal et du Si grave (rouge) du saxophone avec pavillon coupé sur la bande de fréquence [50 7000]Hz

En Figure 11 et Figure 12 sont représentées les fonctions de réflexion du Si grave des deux saxophones pour les bandes de fréquence [50;900]Hz, soit les trois premiers pics d'impédance, [50;2000]Hz, soit jusqu'à la fréquence de coupure de l'instrument. Les deux courbes de la Figure 11 ont des caractéristiques très proches (hauteur et largeur de pic). Ce qui est en accord avec l'analyse de l'harmonicité des trois premiers pics d'impédance.

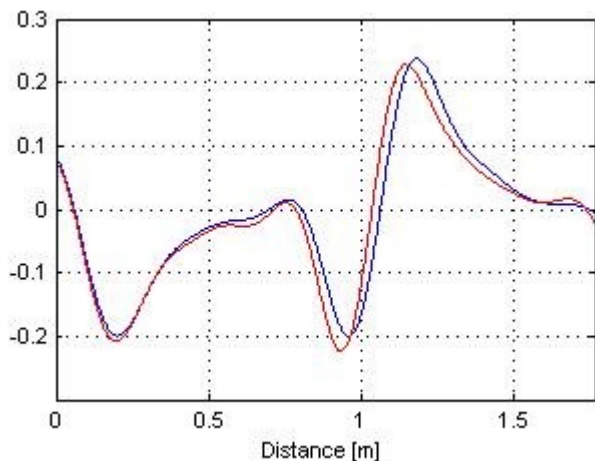


Figure 11 : Fonction de reflexion du Si grave du Saxophone Alto normal (bleu) et avec pavillon coupé (rouge) sur la bande de fréquence [50 900] Hz

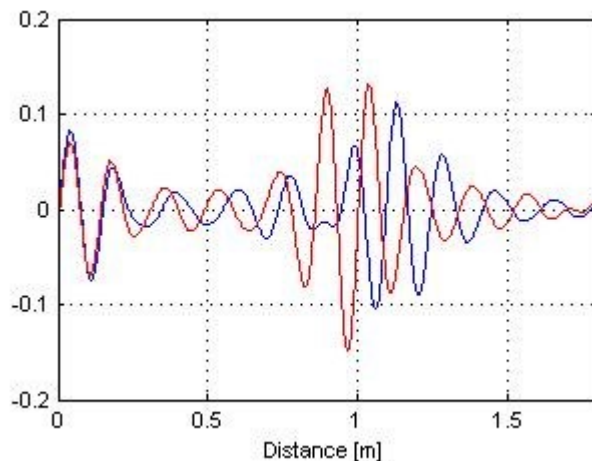


Figure 13 : Fonction de reflexion du Si grave du Saxophone Alto normal (bleu) et avec pavillon coupé (rouge) sur la bande de fréquence [900 ;2000] Hz

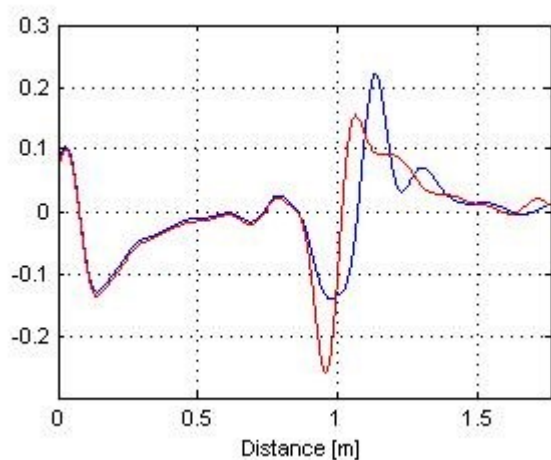


Figure 12 : Fonction de reflexion du Si grave du Saxophone Alto normal (bleu) et avec pavillon coupé (rouge) sur la bande de fréquence [50 2000] Hz

Par comparaison à la Figure 11, les deux courbes de la Figure 12 montrent l'influence des fréquences supérieures au troisième pic d'impédance. Le pic de réflexion du saxophone normal est de plus faible amplitude et plus large que le pic de du Si grave du saxophone dont le pavillon est coupé.

La Figure 13 représentant les courbes de réflexion des deux Si grave sur la bande de fréquence [900;2000]Hz, montre effectivement que les réflexions principales ont lieu au bout du tube acoustique, soit au niveau du pavillon pour l'instrument normal et au niveau de la première cheminée pour le pavillon coupé.

## 4 Conclusion

L'utilisation de la fonction de réflexion pour l'analyse des mesures d'impédance d'entrée par bande de fréquence a permis de mettre en avant le phénomène acoustique supposé en partie responsable de la difficulté d'émission du Si grave du saxophone Alto. Des réflexions acoustiques, donc des modes acoustiques se créent sur la totalité de l'instrument alors qu'une cheminée est ouverte. La mise en vibration du mode fondamental de l'instrument est donc perturbée.

Malgré cette étude, l'importance relative des modifications du contenu des bandes de fréquence n'est pas connue. Les très faibles modifications des basses fréquences ont peut-être plus d'effet sur la facilité d'émission que les grands changements en hautes fréquences.

## Références

- [1] D. B. Sharp. *Acoustic pulse reflectometry for the measurement of musical wind instruments*, Thèse de Doctorat, Université d'Edimbourg, 1994.
- [2] B. Gazengel. *Caractérisation objective de la qualité de justesse, de timbre et d'émission des instruments à vent à anches simples*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 1994.
- [3] S.Rodriguez, V.Gibiat, S.Guilain, A.Lefebvre, *The Reflection Map : A New Tool for Frequency to Time Domain Study of 1D Acoustical Systems*. Acta Acustica United With Acustica, Vol. 95, 2009.
- [4] A. Chaigne et J. Kergomard. *Acoustique des instruments de musique*. Belin, 2008
- [5] J.-B. Doc, C. Vergez. *Oscillation regime produced by an alto saxophone : Influence of the control parameters and the bore inharmonicity*. Journal of the Acoustical Society of America, Acoustical Society of America, 2015, <10.1121/1.4916197>. <hal-01229842>.