

# Figure 1

## Le « Brass-Band »



L'ensemble de cuivres de type « Brass-Band » est constitué de :

- 1 chef, 1 cornet Mib, 9 cornets Sib, 1 bugle Sib, 3 saxhorns alto Mib, 2 euphoniums Sib, 2 saxhorns baryton Sib, 2 trombones ténor Ut, 1 trombone basse Ut (musiciens debout de gauche à droite).
- 3 percussionnistes, 2 saxhorns contrebasse Mib, 2 saxhorns contrebasse Sib (musiciens accroupis de gauche à droite).

# Figure 2

## Le « Quintette de cuivres »



L'ensemble de cuivres de type « Quintette de cuivres » est constitué de :

- 2 trompettes en Ut (musiciens 2<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> en partant de la gauche), 1 cor en Fa (musicien à l'extrême droite), 1 trombone en Ut (musicien à l'extrême gauche), 1 tuba en Fa (musicien au centre).

## Figure 3

Cuivres anciens :

- un cornet à bouquin (à gauche sur la photo) et un ophicléide (à droite).



Remerciements à la « Collection d'instruments de musique historiques de l'université d'Edimbourg ». Le cornet à bouquin et l'ophicléide en photo ci-dessus et beaucoup d'autres instruments peuvent être consultés sur le site web suivant <http://www.music.ed.ac.uk/euchmi/>.

## Figure 4

### « Masque » facial d'un tromboniste



- Le musicien configure son « masque » facial au mieux pour obtenir ce qu'il souhaite. Pour cela il configure la toile d'araignée de muscles du visage qui entourent les lèvres et appuie ces dernières contre l'anneau extérieur de l'embouchure. Le contact lèvre embouchure est étanche (pas de fuite latérale d'air) et gêne le moins possible le « buzz » (aptitude des lèvres à vibrer).

- Le terme « embouchure » est souvent employé à la place du terme « masque ». Nous préférons ce dernier afin d'éviter toute confusion avec l'embouchure métallique dont il est question plus haut. Notons qu'en anglais le risque de confusion disparaît car il existe deux mots différents : « embouchure » et mouthpiece.

## Figure 5

### Série harmonique basée sur un si bémol (Sib)



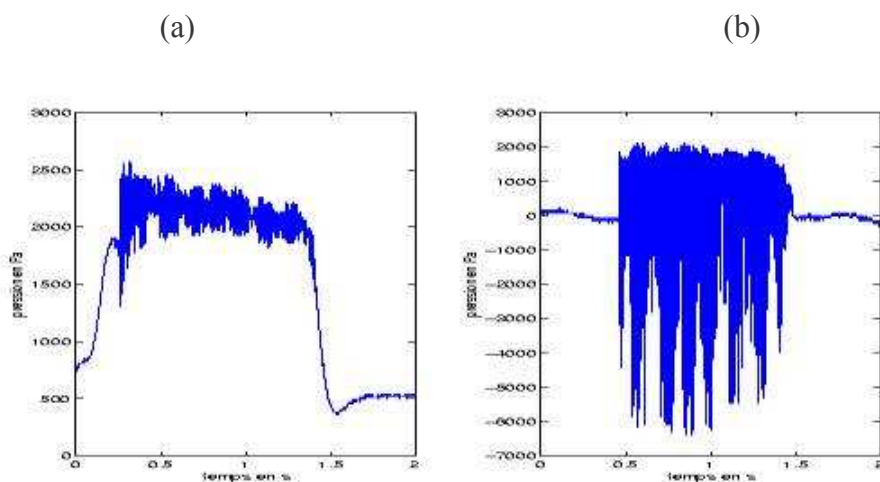
Sib, Sib, Fa, Sib, Ré, Fa, Lab, Sib, etc ... (de gauche à droite sur la portée).

## Figure 6

### Signaux de pression mesurés (en Pa)

correspondant à un Fa médium joué durant 1 seconde :

- (a) surpression dans la bouche d'un tromboniste,
- (b) pression acoustique en sortie de pavillon de trombone (5 cm à l'extérieur).



Les deux signaux peuvent être découpés en trois parties. (1) L'attaque de la note (régime transitoire d'une

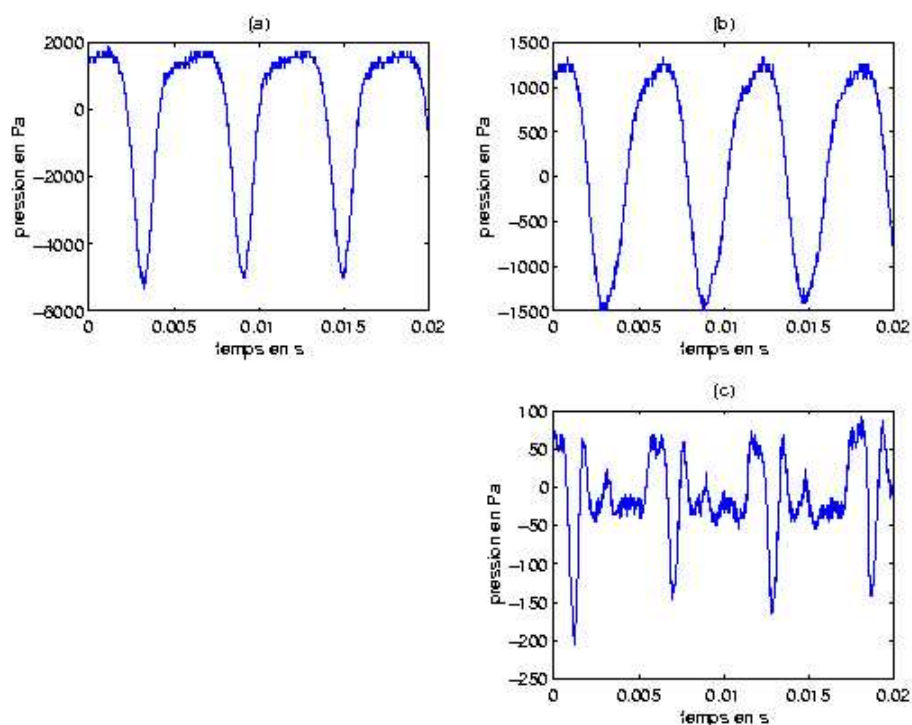
durée de l'ordre de 0.1s sur l'exemple ci-dessus), (2) la partie stationnaire correspondant à une surpression constante dans la cavité buccale (régime permanent d'une durée de 0.8s), (3) l'extinction de la note (régime transitoire d'une durée de 0.1s).

La surpression (quasi-constante dans la partie stationnaire) dans la cavité buccale du tromboniste de 2000 Pa est transformée en un signal de sortie oscillant (pression acoustique de valeur efficace de l'ordre de 3000 Pa).

## Figure 7

Signaux de pression acoustique mesurés (en Pa), mesures effectuées en différents points du trombone pour un Fa médium joué durant 1 seconde. Trois périodes du signal sont extraites de la partie stationnaire de la note jouée :

- (a) dans l'embouchure,
- (b) en sortie de coulisse,
- (c) 5 cm à l'extérieur du pavillon.



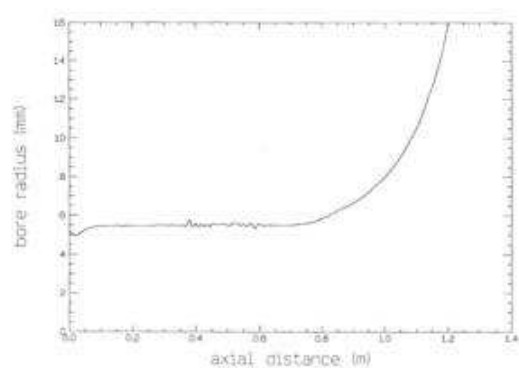


## Figure 8

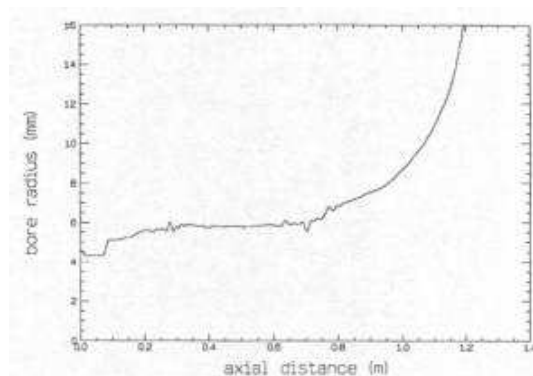
### Perces de cuivres :

- tracé du rayon intérieur (en mm) en fonction de la distance (en mm) à partir de l'entrée de l'instrument (plan d'entrée de l'embouchure). Résultats obtenus par mesure de « réflectométrie impulsionnelle » ;
- les perces ci-dessous (trompette, cornet, bugle) ont été mesurées pour le doigté « à vide ».

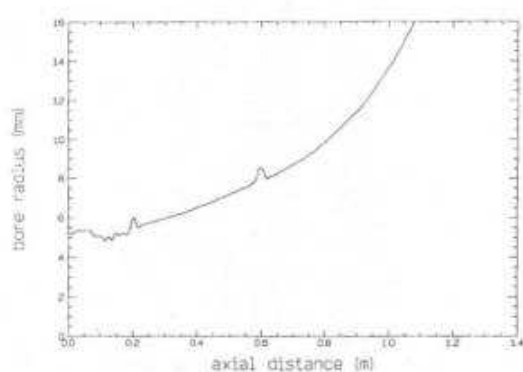
**(a)** Trompette Boosey & Hawkes (1931)



**(b)** Cornet Courtois (1862)



**(c)** Bugle Besson (1900)



Les figures ci-dessus sont empruntées dans les travaux de thèse de A. Myers : « Characterization and taxonomy of historic brass musical instruments from an acoustical standpoint », Ph. D. of the University of Edinburgh (1998), United Kingdom.

## Figure 9

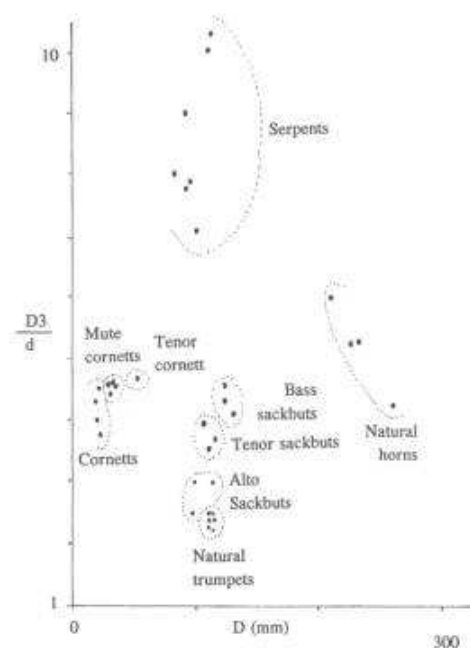
## Classement des cuivres dans le plan D3/d en fonction de D (en mm) :

(a) cuivres anciens, (b) cuivres modernes.

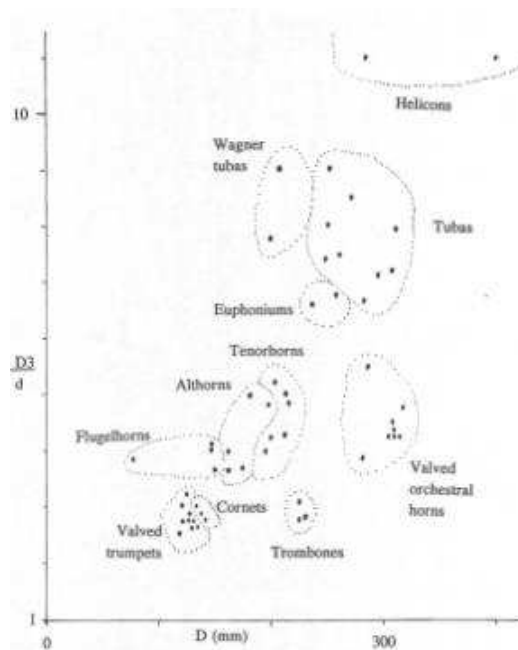
Définition des diamètres d, D et D3 extraits de la perce de l'instrument :

- d est le diamètre minimum de la perce (en pratique le diamètre d'entrée de l'instrument lui-même, sans l'embouchure).
- D est le diamètre maximum (en pratique le diamètre de sortie du pavillon).
- D3 est le diamètre interne mesuré à une distance D de la sortie du pavillon.

(a) Cuivres anciens



(b) Cuivres modernes



Les figures ci-dessus sont empruntées dans les travaux de thèse de A. Myers : « Characterization and taxonomy of historic brass musical instruments from an acoustical standpoint », Ph. D. of the University of Edinburgh (1998), United Kingdom.

Figure 10

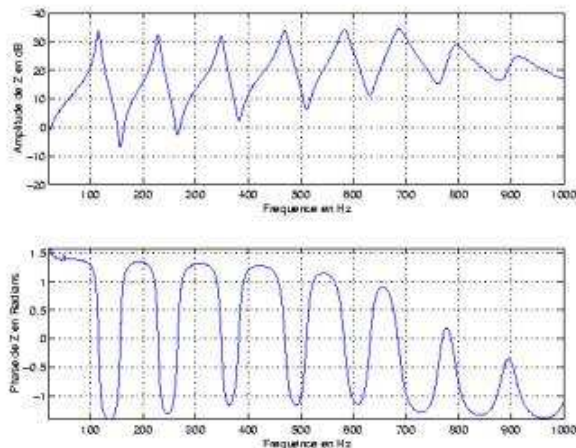


## Impédances d'entrées réduites (amplitude en dB, phase en radians)

### de cuivres (trompette, bugle) :

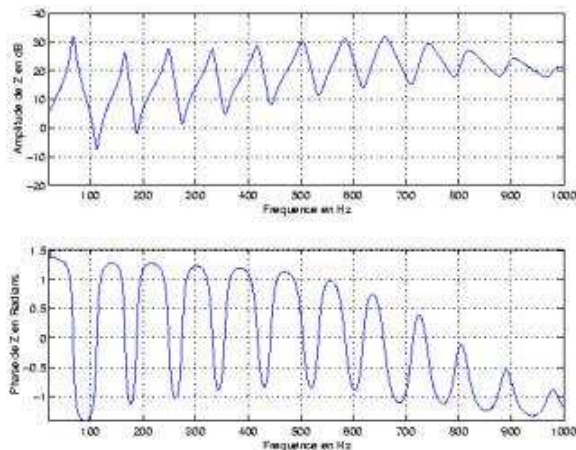
(a)

Impédances d'entrée réduite, amplitude (en dB) et phase (en Rad) en fonction de la fréquence (de 0 à 1000 Hz) d'un bugle King (doigté à vide).



(b)

Impédances d'entrée réduite, amplitude (en dB) et phase (en Rad) en fonction de la fréquence (de 0 à 1000 Hz) d'un bugle King (doigté 123, c.a.d les 3 pistons enfoncés).



(c)

Impédances d'entrée réduite, amplitude (en dB) et phase (en Rad) en fonction de la fréquence (de 0 à 1000 Hz) d'une trompette Bach en sib (doigté à vide).

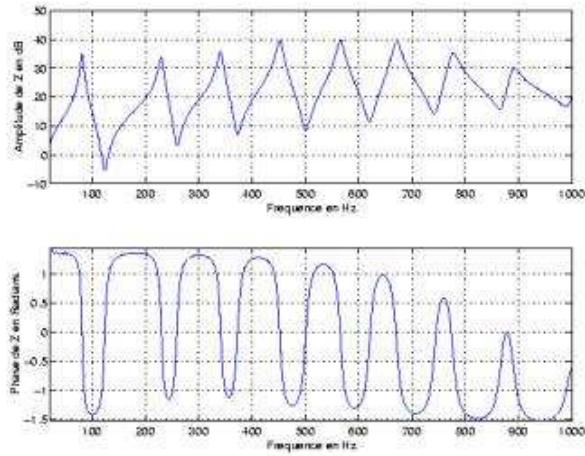


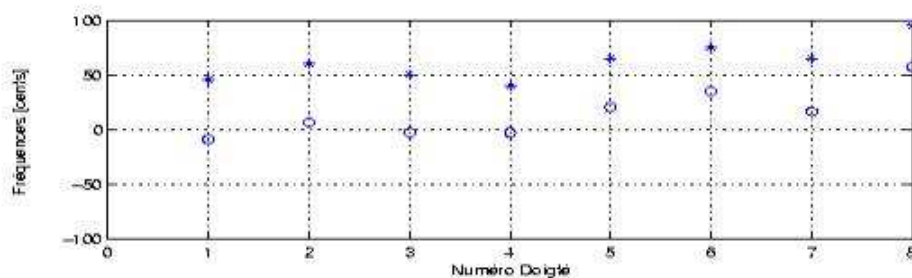
Figure 11

### Justesse comparée

des 3<sup>èmes</sup> fréquences de résonance d'une trompette (o sur la figure)

et des 3<sup>ème</sup> partiels joués par un trompettiste (\* sur la figure) correspondant aux 8 doigtsés.

Trompette Yamaha modèle 6335 et embouchure Yamaha.



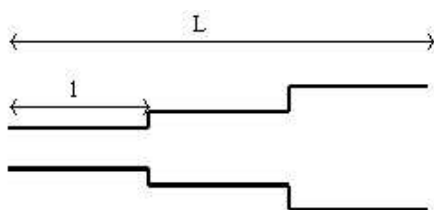
La justesse est définie comme étant l'écart en cents de la fréquence analysée (fréquence de résonance ou fréquence de jeu du partiel) à la fréquence théorique calculée à partir de la gamme tempérée basée sur le  $la_{440Hz}$ .

Les doigtés numérotés de 1 à 8 sur l'axe des abscisses correspondent successivement au doigtés « à vide », piston 1 enfoncé (noté 1), 2, 3, 12, 13, 23, 123.

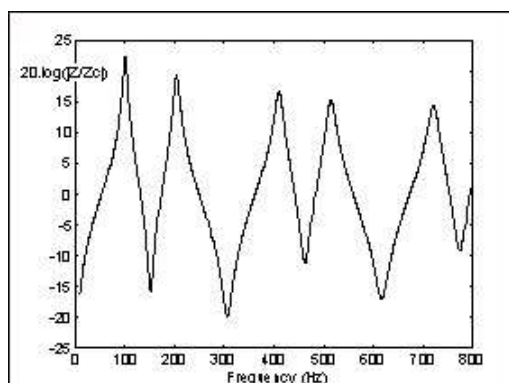
## Figure 12

### Résonateur constitué d'une succession de cylindres :

(a) géométrie (perce) d'un résonateur à 3 cylindres



(b) amplitude de l'impédance d'entrée réduite (en dB) en fonction de la fréquence (de 0 à 800 Hz) pour un résonateur à 2 cylindres.

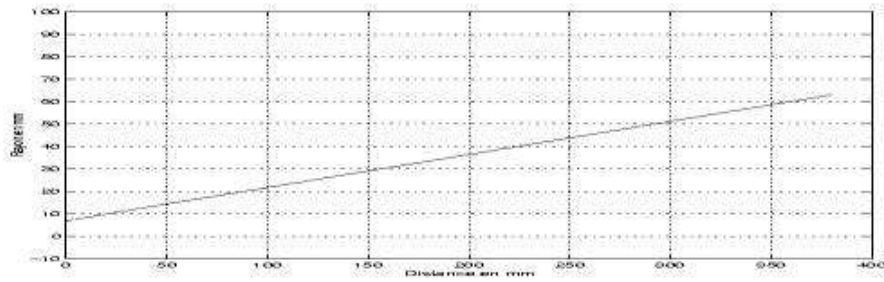


## Figure 13

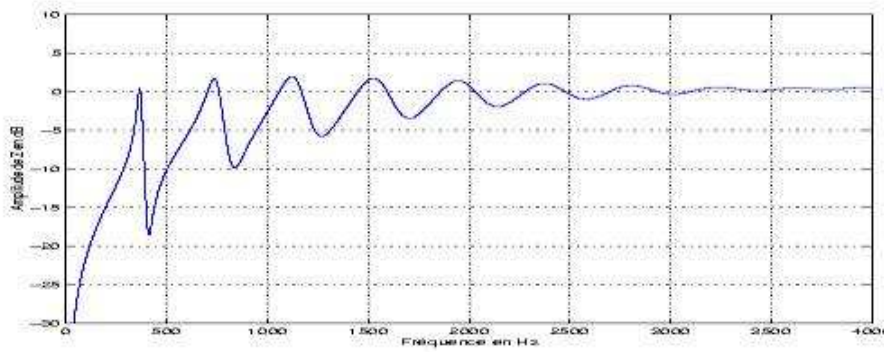
### Résonateur "cône tronqué"

(longueur 0.380m, rayon d'entrée .007m, rayon de sortie 0.063m)

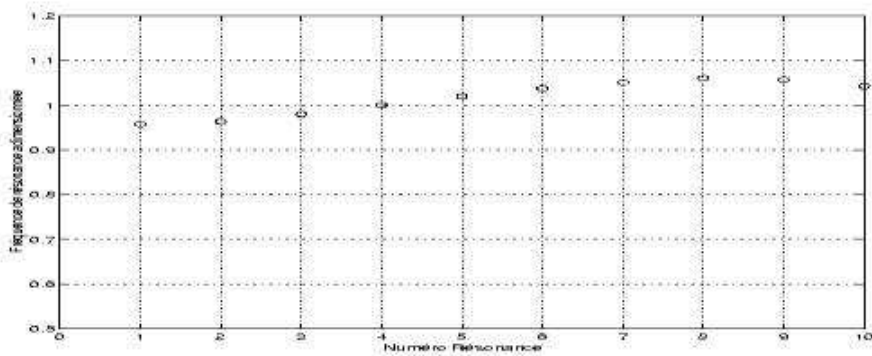
(a) Perce



(b) Amplitude (en dB) de l'impédance d'entrée réduite calculée



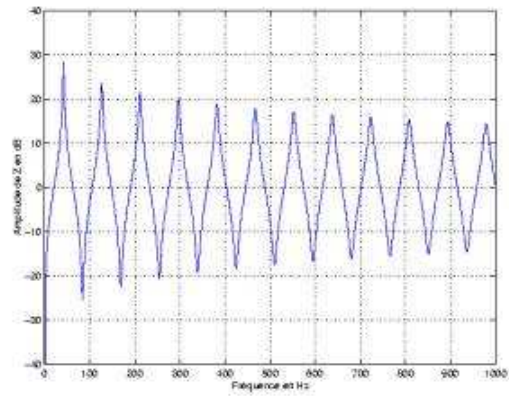
(c) Fréquences de résonance adimensionnées en fonction du numéro de la résonance



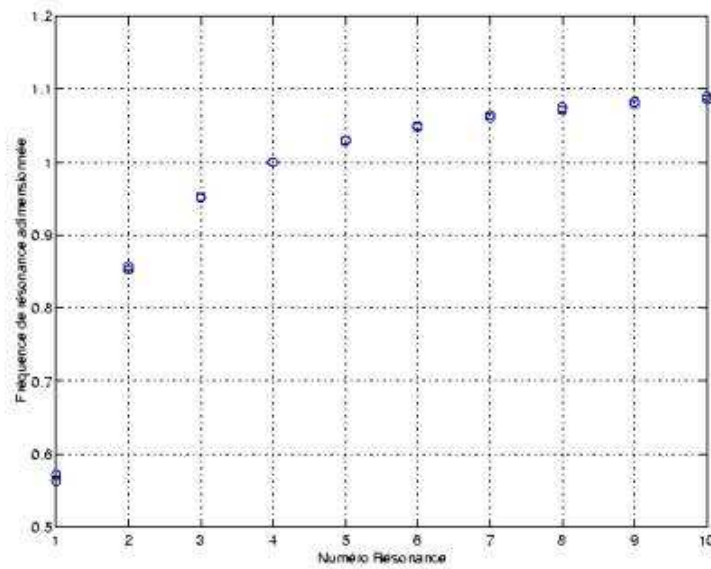
## Résonateur cylindrique

cylindre : longueur  $l = 2$  m , rayon  $R = 0.010$  m.

(d) Amplitude (en dB) de l'impédance d'entrée réduite calculée



(e) Fréquences adimensionnées en fonction du numéro de la résonance



Deux calculs ont été effectués pour le même cylindre : un calcul sans perte d'une part, un calcul avec pertes d'autre part. Dans le mode de représentation ci-dessus, les fréquences de résonance du cylindre diffèrent peu que les pertes soient prises en compte ou non.

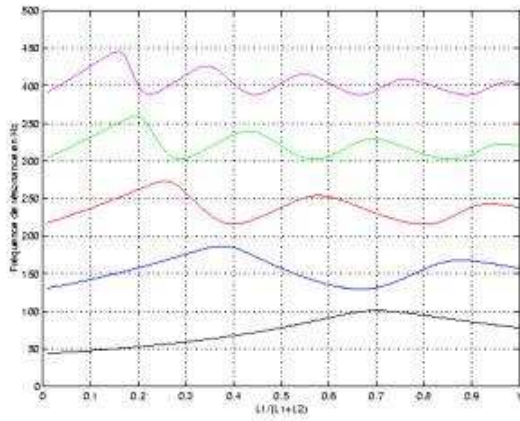
## Figure 14

Résonateur constitué d'un cylindre de longueur  $L_1$

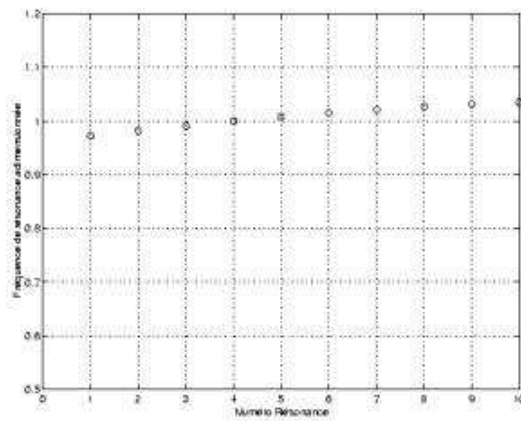
et d'un cône tronqué de longueur  $L_2$

(longueur totale  $L=L_1+L_2$ ),  $L_1$  variant de 0 (cas du cylindre) à  $L_1=L$  (cas du cône)

(a) 5 premières fréquences de résonance (en Hz) en fonction de  $L_1/(L_1+L_2)$  variant de 0 à 1



(b)  
Fréquences de résonance adimensionnées en fonction du numéro de la résonance pour le cas particulier  
 $L_1=L_2=L/2$



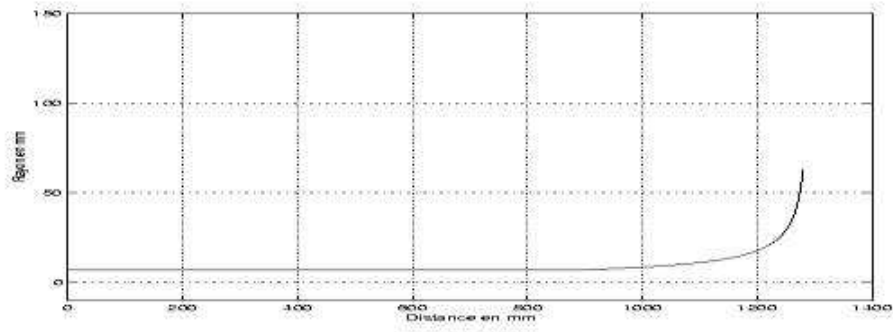
**Figure 15**

Résonateur constitué d'un cylindre et d'un pavillon de Bessel

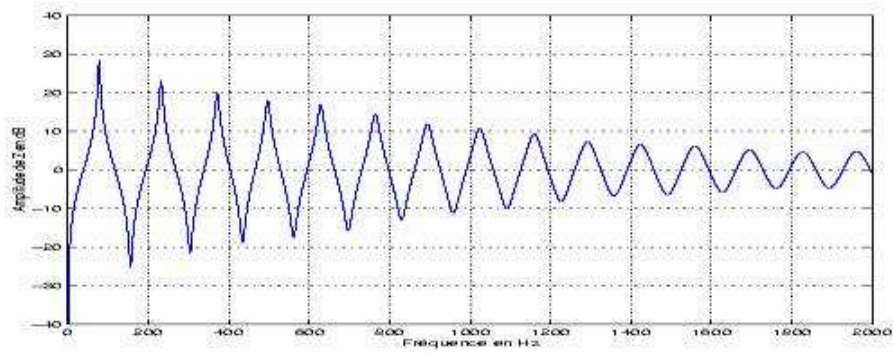
cylindre : longueur  $l_1 = 0.900\text{m}$  , rayon  $R_1 = 0.007\text{m}$ .

pavillon de Bessel : longueur  $l_1 = 0.380\text{m}$  , rayon  $R_1 = 0.007\text{m}$ ,  $R_2 = 0.063\text{m}$ , paramètre  $a = 0.645\text{m}^{-1}$ , distance  $z_0 = 0.013\text{m}$ .

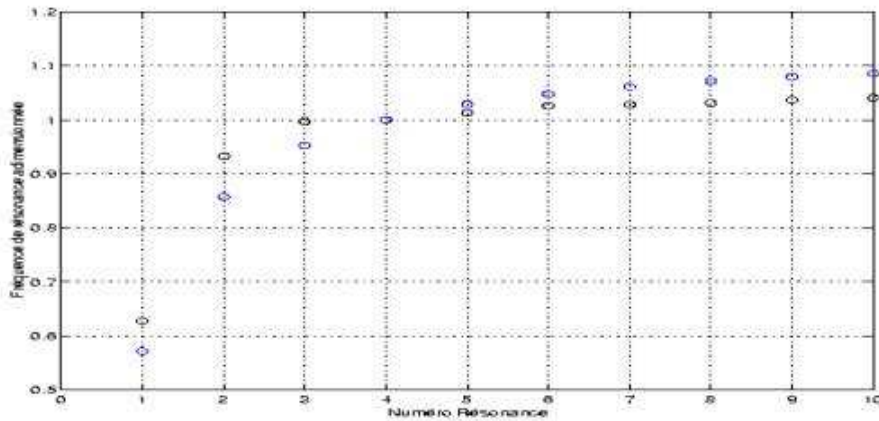
(a) Perce



(b) Amplitude (en dB) de l'impédance d'entrée réduite calculée



(c) Fréquences adimensionnées en fonction du numéro de la résonance



Les fréquences adimensionnées du résonateur analysé ici (o noirs) sont comparées aux fréquences adimensionnées d'un résonateur cylindrique (o bleus).

Pour chacun des deux cas, les fréquences de résonance sont adimensionnées par la 4<sup>ième</sup> fréquence.

Le rayon  $R(x)$  du pavillon de Bessel est calculé en fonction de la distance  $y$  (à partir de la sortie) par la formule suivante :

$$R(y) = \frac{R_f^{1+\alpha}}{(y+z_0)^\alpha}$$

Les paramètres  $\alpha$  et  $R_f$  sont calculés à partir de des rayons d'entrée et de sortie  $R_1$  et  $R_2$ , de la longueur  $L$  du pavillon par les formules suivantes :

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{\log\left(\frac{L+z_0}{z_0}\right)} \quad \text{et} \quad R_f = \frac{1}{1+\alpha} [\log(R_1) + \alpha \log(L+z_0)]$$

**Figure 16**

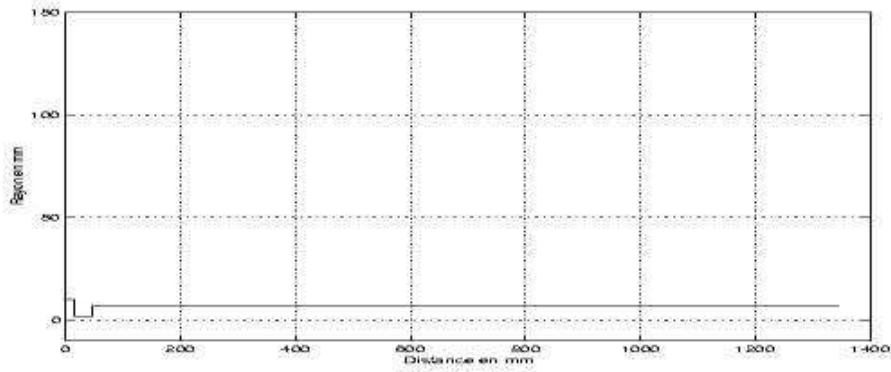
Résonateur constitué d'une « embouchure simplifiée » et d'un cylindre

Cylindre : longueur 1.3m, rayon 0.007m.

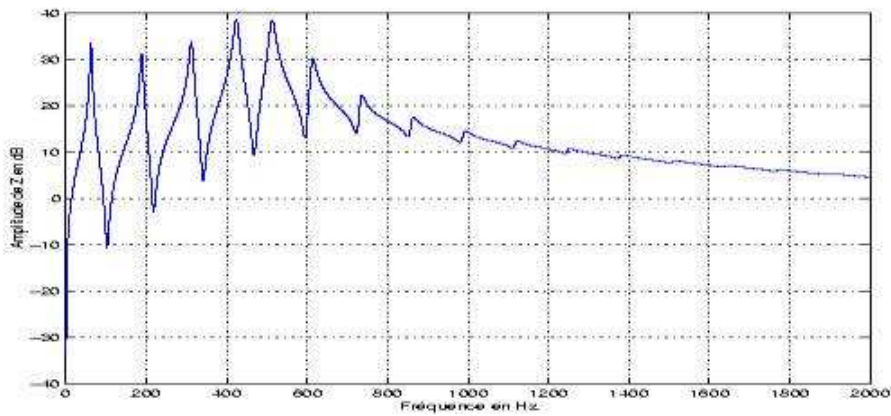


Embouchure simplifiée constituée d'un premier cylindre (longueur 0.015m, rayon 0.010m) et d'un second cylindre (longueur 0.030m, rayon .002m) :

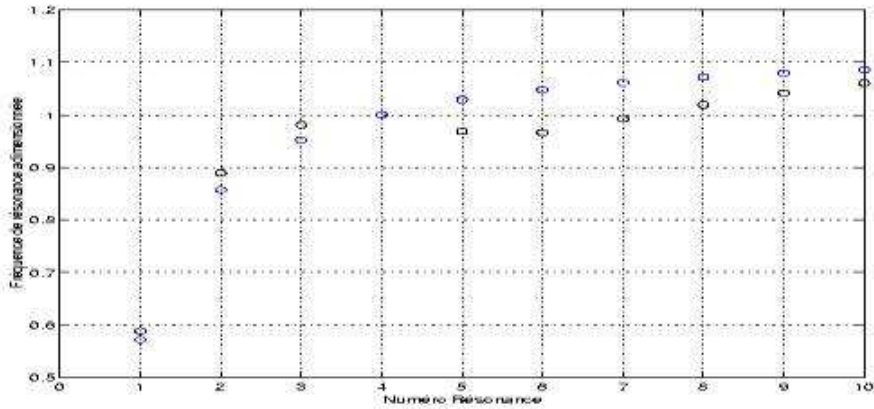
(a) Perce



(b) Amplitude (en dB) de l'impédance d'entrée réduite calculée du résonateur



(c) Fréquences adimensionnées en fonction du numéro de la résonance



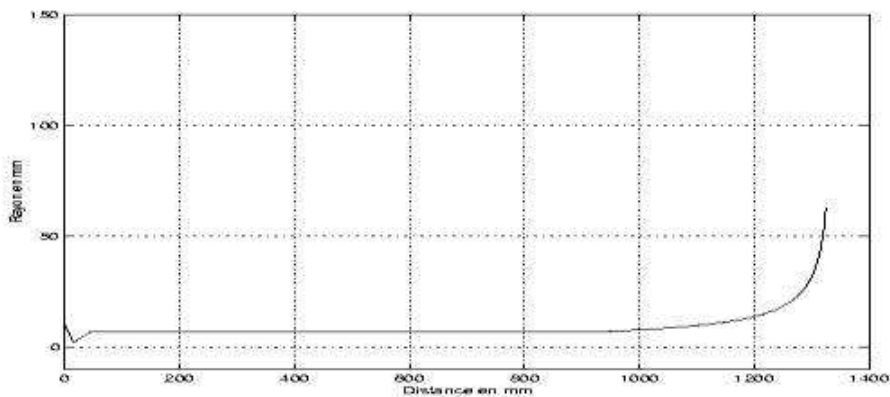
Les fréquences adimensionnées du résonateur analysé ici (o noirs) sont comparées aux fréquences adimensionnées d'un résonateur cylindrique (o en bleus).

Pour chacun des deux cas, les fréquences de résonance sont adimensionnées par la 4<sup>ième</sup> fréquence.

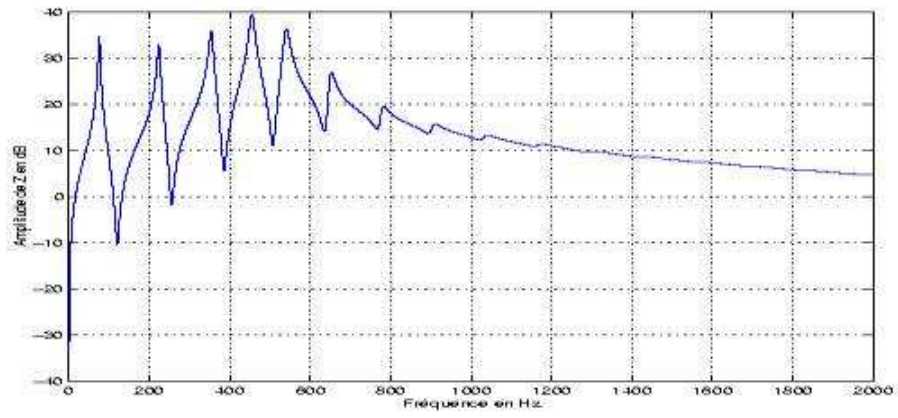
## Figure 17

Résonateur constitué de l'embouchure simplifiée définie à la figure 2.1.10 qui précède, et de l'ensemble cylindre plus pavillon de Bessel défini à la figure 2.1.9 :

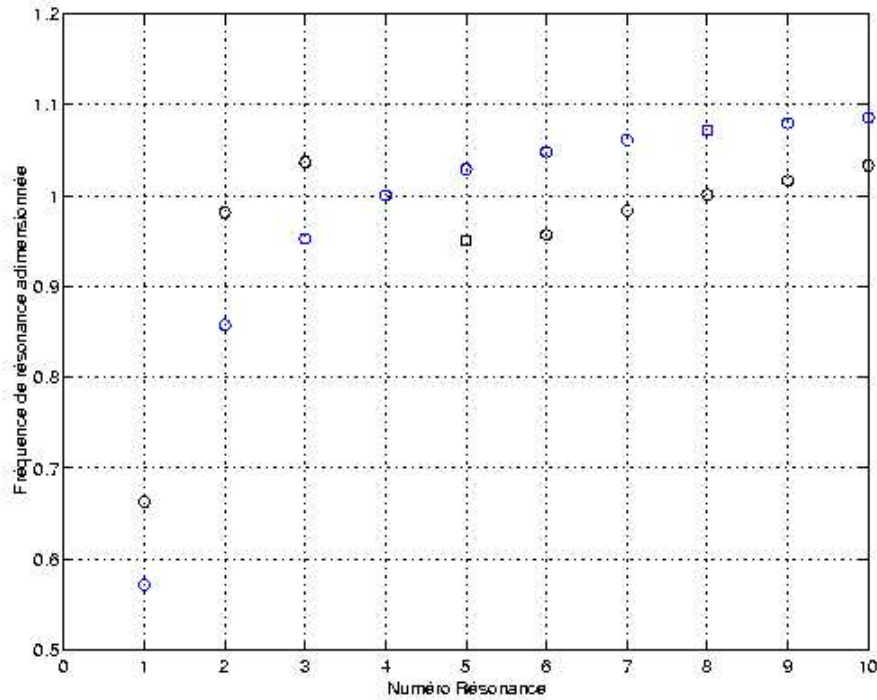
(a) Perce



(b) Impédance d'entrée réduite calculée du résonateur



(c) Fréquences adimensionnées en fonction du numéro de la résonance



Les fréquences adimensionnées du résonateur analysé ici (o noirs) sont comparées aux fréquences adimensionnées d'un résonateur cylindrique (o bleus).

Pour chacun des deux cas, les fréquences de résonance sont adimensionnées par la 4<sup>ème</sup> fréquence.

## Figure 18

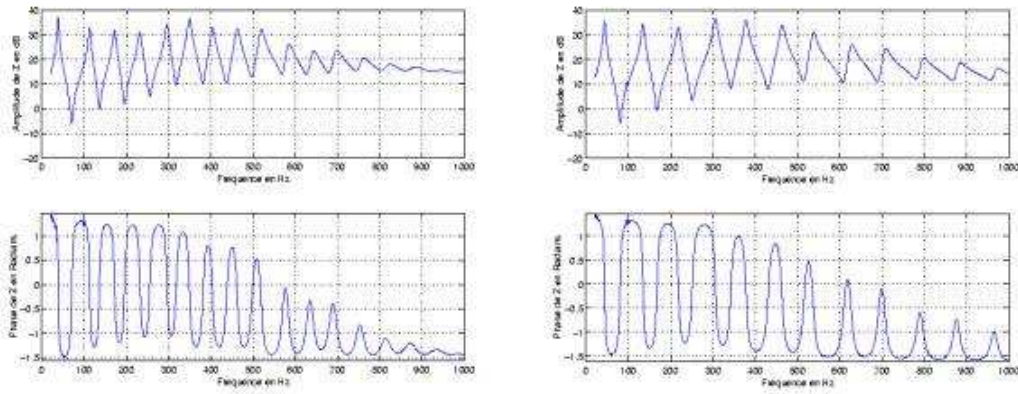
Impédances d'entrée mesurées d'un trombone ténor

Trombone en 1<sup>ère</sup> position, avec puis sans son pavillon

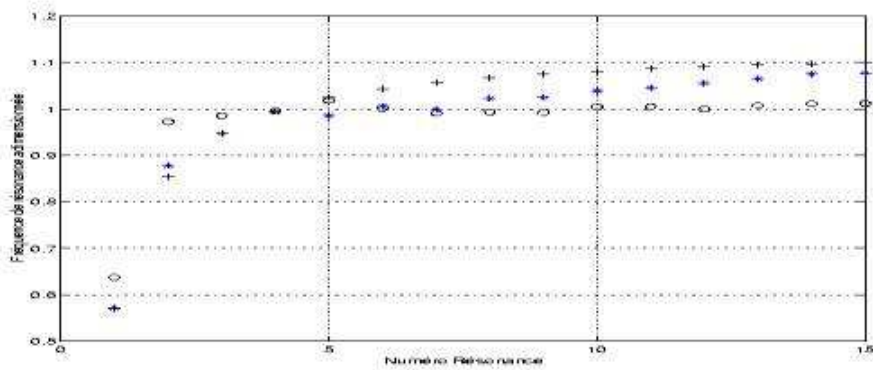
trombone ténor Courtois modèle 149

(a) Trombone avec pavillon

(b) Trombone sans pavillon (en pratique la pompe d'accord a été retirée, ce qui a pour effet de déconnecter le pavillon de l'instrument)



(c) Fréquences adimensionnées en fonction du numéro de la résonance



Trois résonateurs :  $\circ$  trombone avec pavillon ,

\* (bleus) trombone sans pavillon, + cylindre (fréquences mesurées pour les 2 premiers résonateurs, fréquences calculées pour le cylindre).

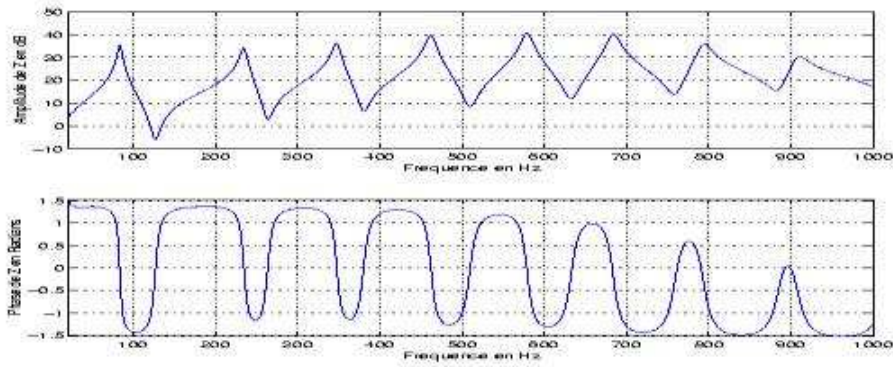
Pour chacun des trois cas, les fréquences de résonance sont adimensionnées par la 4<sup>ème</sup> fréquence.

**Figure 19**

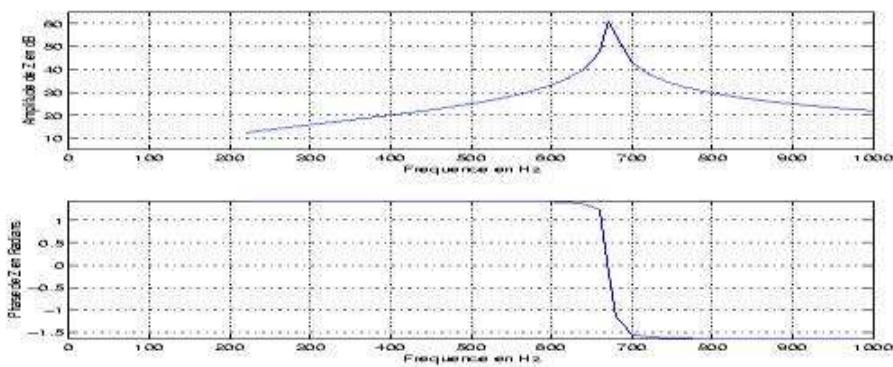
Impédances d'entrée mesurées d'une trompette (doigté à vide)  
et embouchure seule

trompette Yamaha modèle 6335, embouchure Yamaha modèle 15C4

(a) Trompette



**(b) Embouchure de trompette**

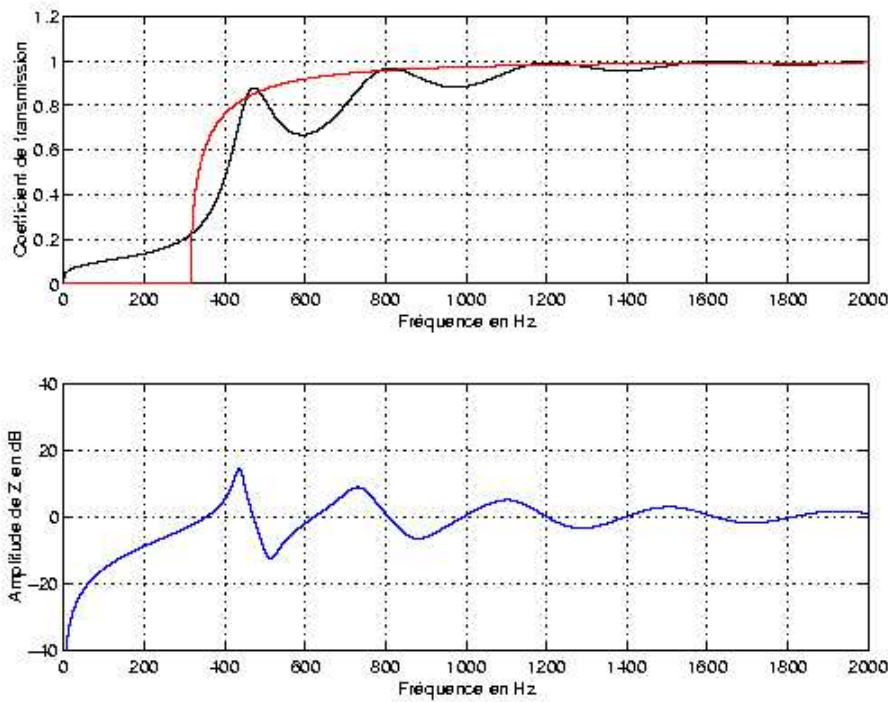


**Figure 20**

**Coefficients de transmission calculés**

**(a) pavillon exponentiel infini** avec un paramètre  $m = 5.78\text{m}^{-1}$  et un rayon d'entrée  $R_1 = 0.007\text{m}$  (coefficient de transmission, courbe rouge figure du haut).

**(b) pavillon exponentiel fini** avec un paramètre  $m = 5.78\text{ m}^{-1}$ , longueur  $L = 1.28\text{m}$ , rayon d'entrée  $R_1 = 0.007\text{m}$ , un rayon de sortie  $R_2 = 0.063\text{m}$  (coefficient de transmission et impédance d'entrée, respectivement courbe noire figure du haut et courbe bleue figure du bas).



Le rayon  $R(x)$  du pavillon exponentiel est calculé en fonction de la distance  $x$  par la formule suivante :

$$R(x) = R_1 \cdot e^{m \cdot x}$$

Le paramètre  $m$  est calculé à partir des rayons d'entrée et de sortie  $R_1$  et  $R_2$ , de la longueur  $L$  du pavillon par la formule suivante :

$$m = \frac{1}{L} \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

## Figure 21

### Résonateur constitué d'un cylindre et d'un pavillon

- cylindre : longueur  $l_1 = 0.9\text{m}$ , rayon  $R_1 = 0.007\text{m}$ )

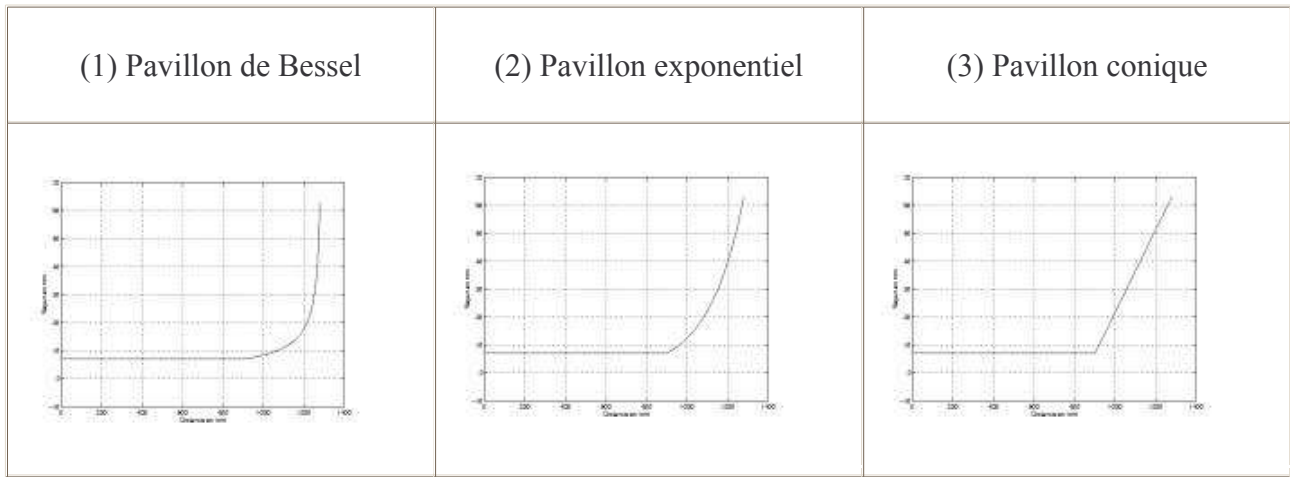
- pavillon : longueur  $l_2 = 0.38\text{m}$ , rayon d'entrée  $R_1 = 0.007\text{m}$ , rayon de sortie  $R_2 = 0.063\text{m}$  dans les 3 cas suivants.

(1) pavillon de Bessel (paramètre  $a = 0.645\text{m}^{-1}$ , distance  $z_0 = 0.013\text{m}$ ),

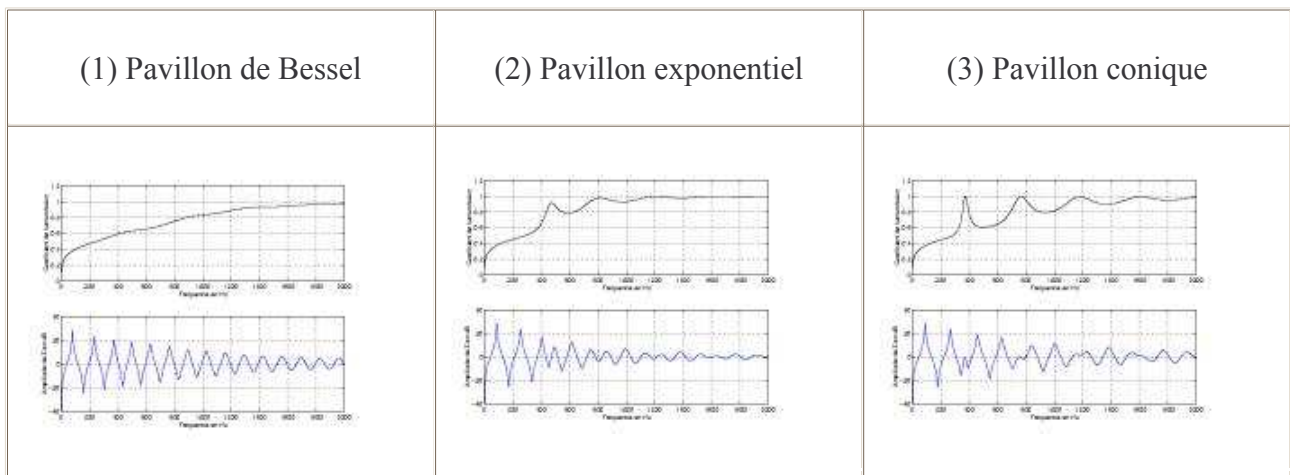
(2) pavillon exponentiel (paramètre  $m = 5.78\text{m}^{-1}$ ),

(3) pavillon conique.

(a) Perces



**(b) Coefficients de transmission (haut) et impédances (bas) calculées**



**(c) Fréquences adimensionnées en fonction du numéro de la résonance des résonateurs**

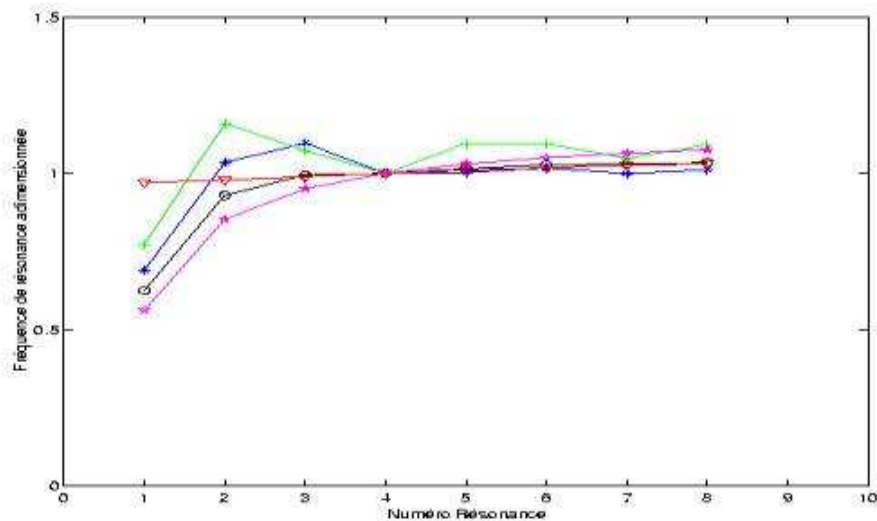
Cinq résonateurs :

- Cylindre raccordé au pavillon de Bessel (courbe en noir).
- Cylindre raccordé au pavillon exponentiel (courbe en bleu).
- Cylindre raccordé au pavillon conique (courbe en vert).
- Cône tronqué (courbe en rouge) de longueur  $l_1+l_2 = 1.28\text{m}$ , de rayon d'entrée  $R_1 = 0.007\text{m}$  et de rayon de sortie  $R_2 = 0.063\text{m}$ .



- Cylindre (courbe en rose) de longueur  $l_1+l_2 = 1.28\text{m}$ , de rayon  $R_1 = 0.007\text{m}$ .

Pour chacun des cinq cas, les fréquences de résonance sont adimensionnées par la 4<sup>ème</sup> fréquence.

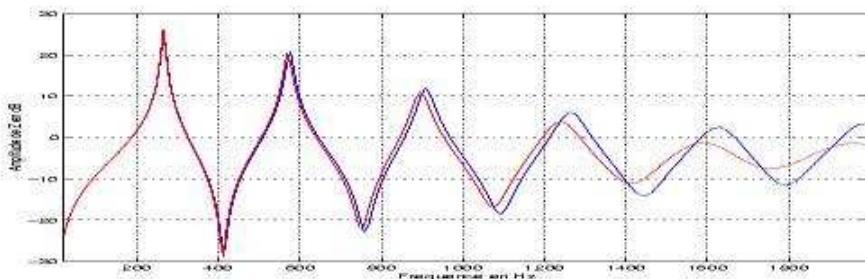


Des résonateurs à entrée cylindrique, le résonateur avec le pavillon de Bessel (courbe en noir) est le plus « juste » : les fréquences adimensionnées sont les plus proches de la valeur idéale 1 correspondant au résonateur idéal ayant une série complète de résonances harmoniques. Hormis pour les 2 premières résonances, les résultats sont comparables au cas presque idéal du cône tronqué.

## Figure 22

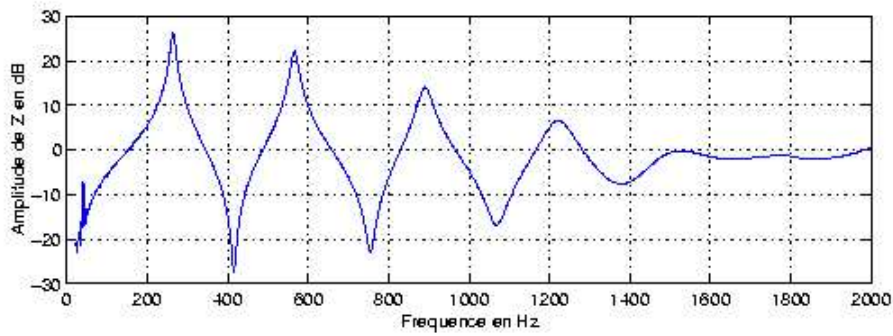
Impédances d'entrée (a) d'un pavillon de trompette, (b) du pavillon de trompette avec raccordement d'un tube cylindrique (longueur 780 mm).

(a) Pavillon de trompette

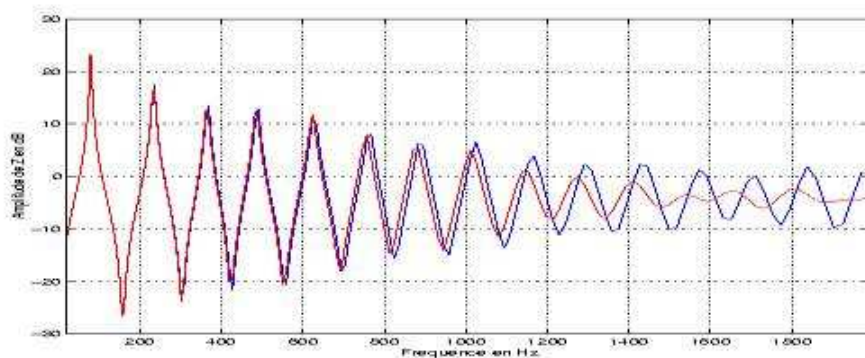


Ci-dessus : impédance calculée selon l'hypothèse ondes planes (courbe bleue), puis calculée en prenant en compte le premier mode supérieur en plus de l'onde plane (courbe rouge).

Ci-dessous : impédance mesurée.



**(b) Cylindre prolongé par le pavillon de trompette**



Ci-dessus : impédance calculée selon l'hypothèse ondes planes (courbe bleue), puis calculée en prenant en compte le premier mode supérieur en plus de l'onde plane (courbe rouge).

## Figure 23

### Evolution de l'onde au cours de la propagation

-  
-

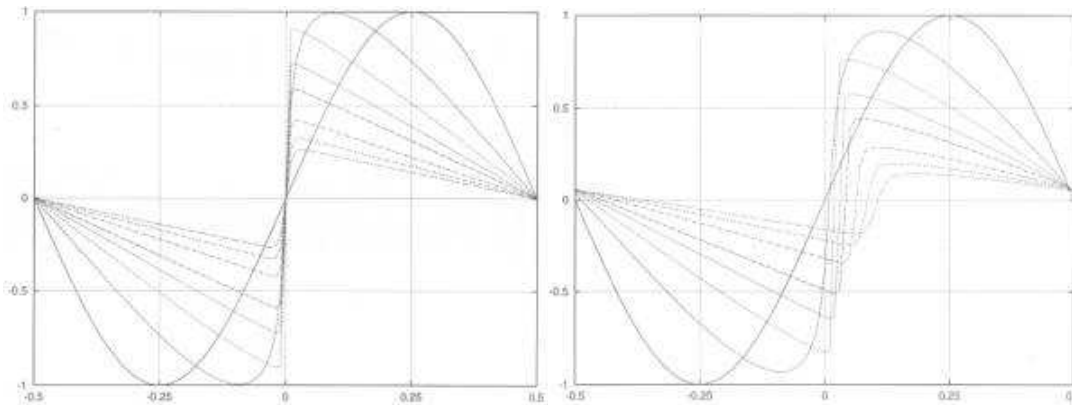
superposition des tracés d'une période de l'onde pour les distances de propagation (distances  $x$  adimensionnées par la distance de de formation de choc  $x_c$ ) à s égales successivement à 0, 1, 2, 3, 4, 6,

8, 10 (de l'onde sinusoïdale à l'onde N, l'amplitude décroissant pour s croissant);

deux cas analysés, (a) les solutions de l'équation de Burgers avec pertes visco-thermiques de volume, (b) les solutions de l'équation de Burgers avec pertes visco-thermiques aux parois.

(a) Eq. de Burgers avec pertes volumiques

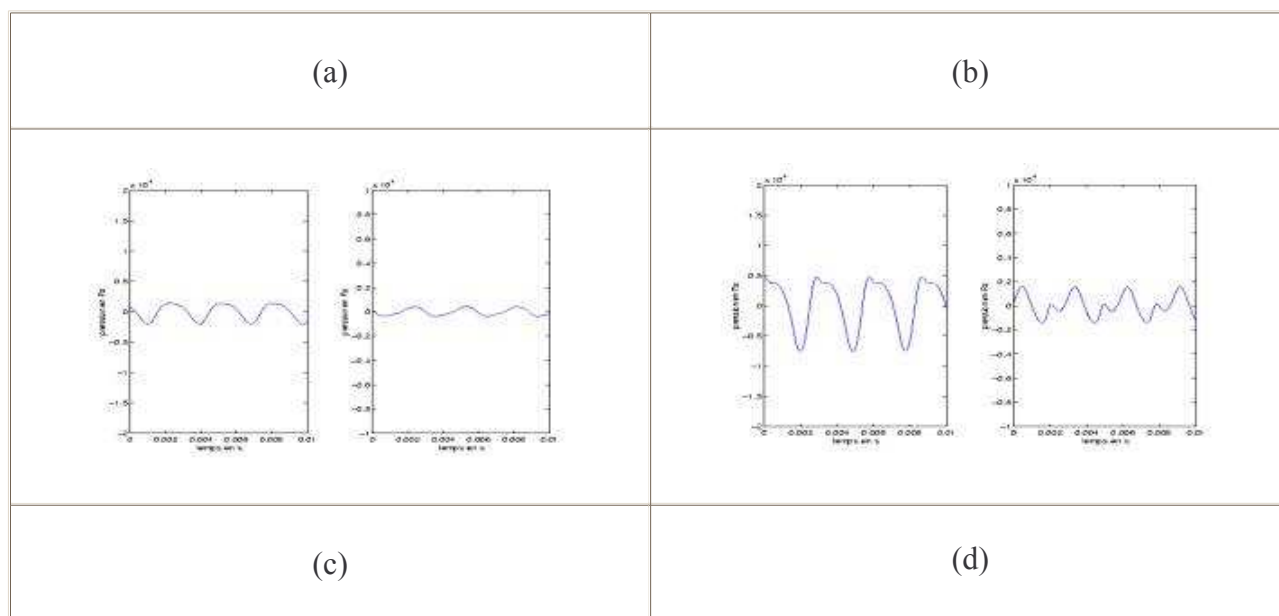
(b) Eq. de Burgers avec pertes aux parois

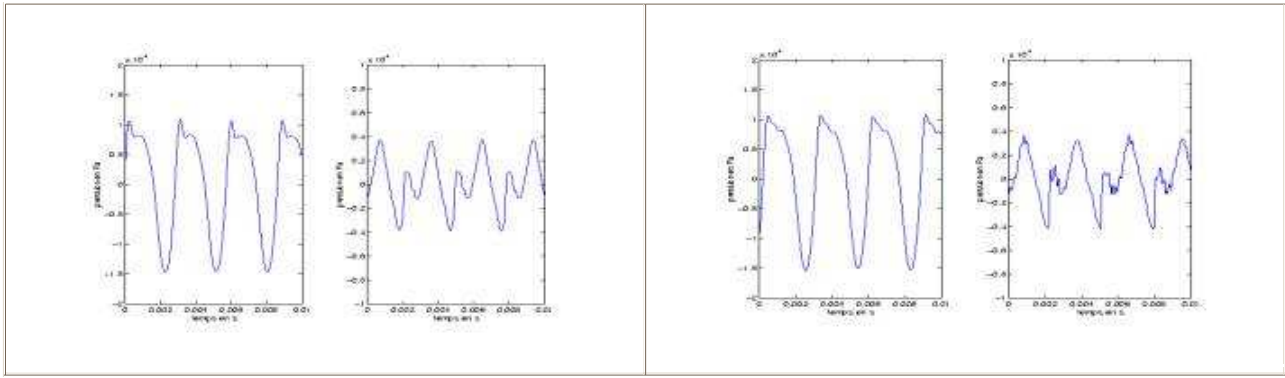


**Figure 24**

Pressions acoustiques mesurées dans un trombone

pour différentes nuances de jeu





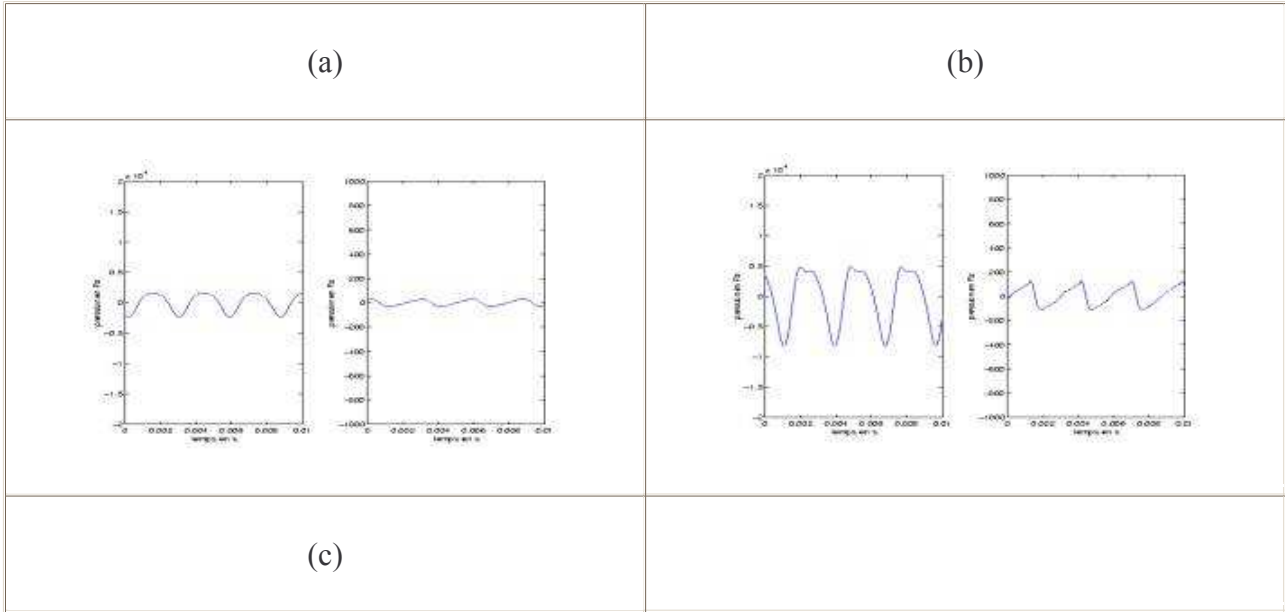
Signaux de pression acoustique mesurés pour un Fa aigu joué durant 1 seconde (4 périodes du signal sont extraites de la partie stationnaire de la note jouée) pour différentes nuances : (a) nuance pp, (b) nuance mf, (c) nuance ff, (d) nuance ff. Pour les cas (a), (b) et (c), le fa aigu est joué en 1<sup>ère</sup> position ; pour le cas (d) le fa aigu est joué en 6<sup>ième</sup> position.

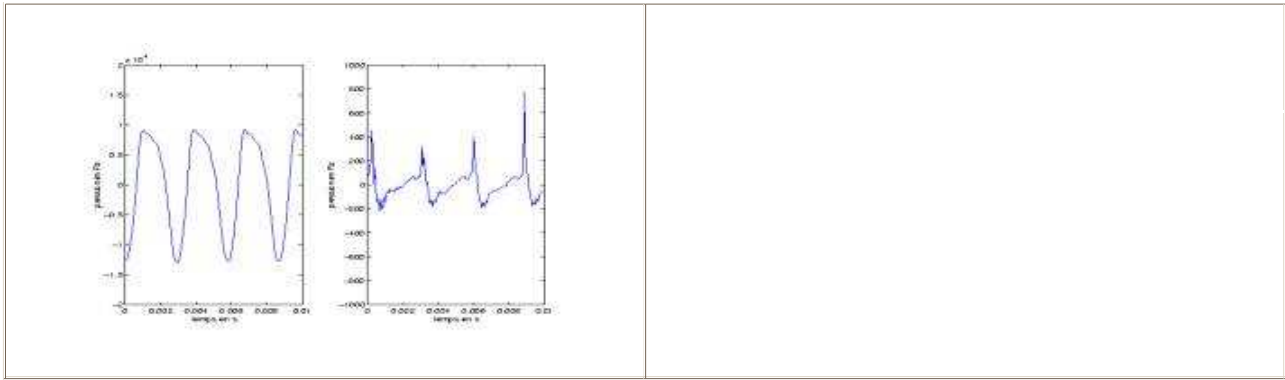
Pour chacun des 4 cas, les mesures sont effectuées en 2 points : dans l'embouchure (figures de gauche) et en sortie de coulisse (figures de droite). Pour les cas (a), (b) et (c), la distance inter-microphonique est 1.8m ; pour le cas (d) la distance inter-microphonique est 2.8m.

Même si la nuance est identique (ff) dans les cas (c) et (d), dans ce dernier cas la distance de propagation est sensiblement plus longue (1m en plus), ceci est favorable à la formation d'ondes de choc.

**Figure 25**

Pressions acoustiques mesurées à l'intérieur et à l'extérieur d'un trombone pour différentes nuances de jeu





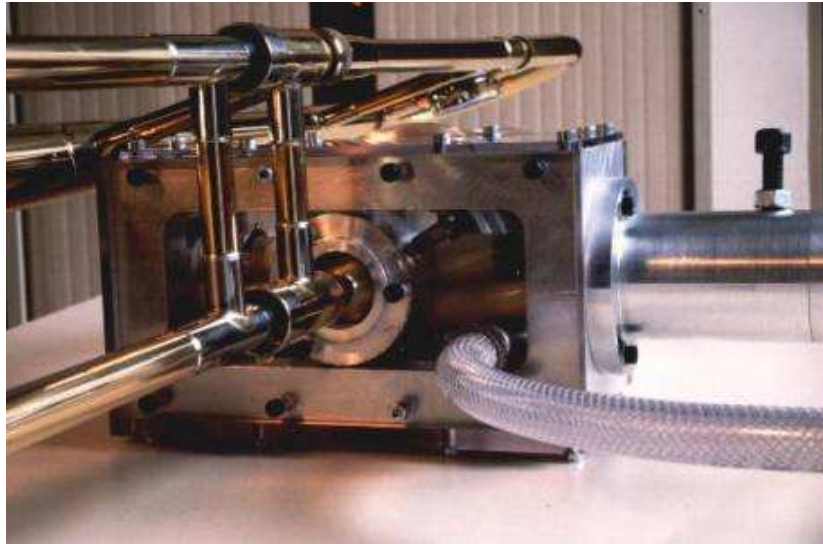
Signaux de pression acoustique mesurés pour un Fa aigu joué durant 1 seconde (4 périodes du signal sont extraites de la partie stationnaire de la note jouée) pour différentes nuances : (a) nuance pp, (b) nuance mf, (c) nuance ff. Le fa aigu est joué en 1<sup>ère</sup> position.

Pour chacun des 4 cas, les mesures sont effectuées en 2 points : dans l'embouchure (figures de gauche) et à l'extérieur de l'instrument, 5cm hors du pavillon (figures de droite).

## Figure 26

### Bouches artificielles

#### (a) Bouche artificielle pour cuivres (trombone)

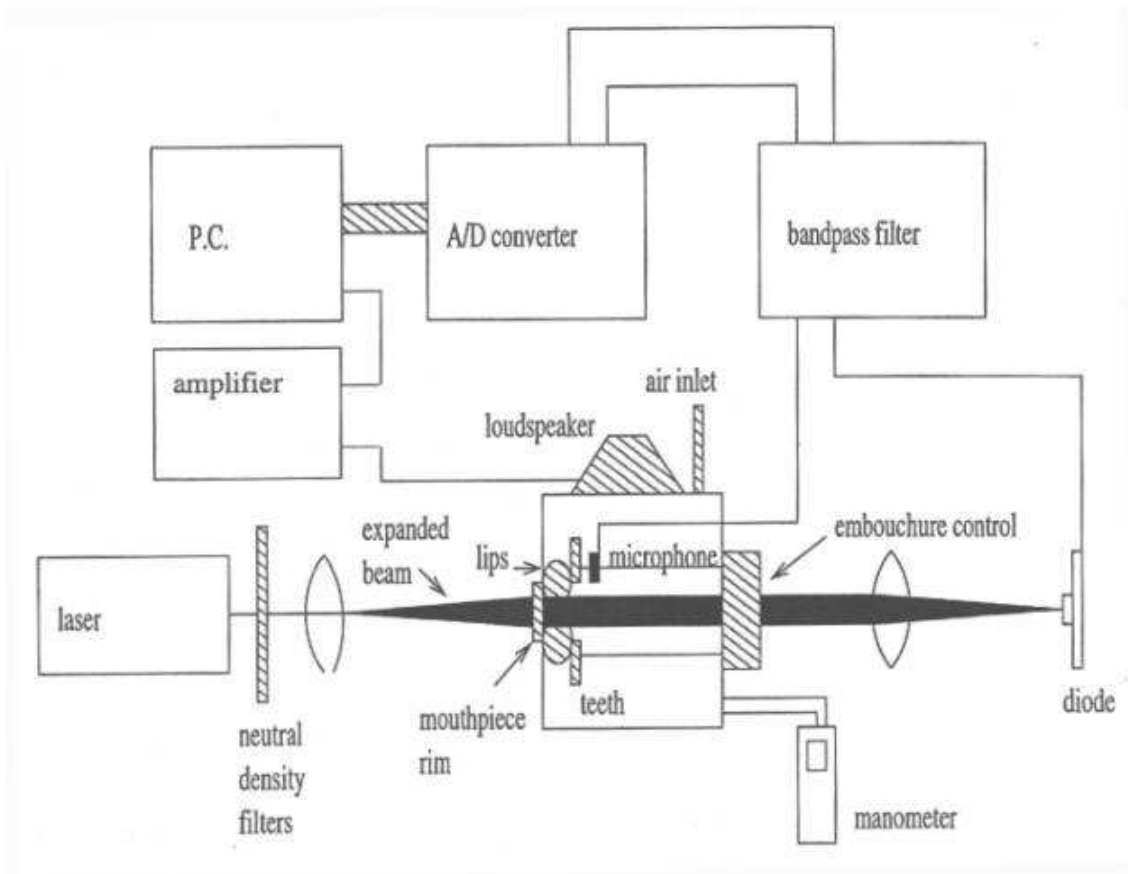


#### (b) Bouche artificielle pour bois à anche simple (saxophone)

Vue d'ensemble	Vue éclatée du bec et de la bouche
 A photograph showing the artificial mouthpiece assembly in a laboratory setting. The device is mounted on a stand, and a saxophone is visible in the background, indicating its use in an experimental setup.	 A photograph showing an exploded view of the mouthpiece and reed assembly. The components are arranged horizontally, showing the reed, the mouthpiece body, and the reed holder.

## Figure 27

Dispositif expérimental autour de la bouche artificielle pour la mesure de la réponse mécanique des lèvres :

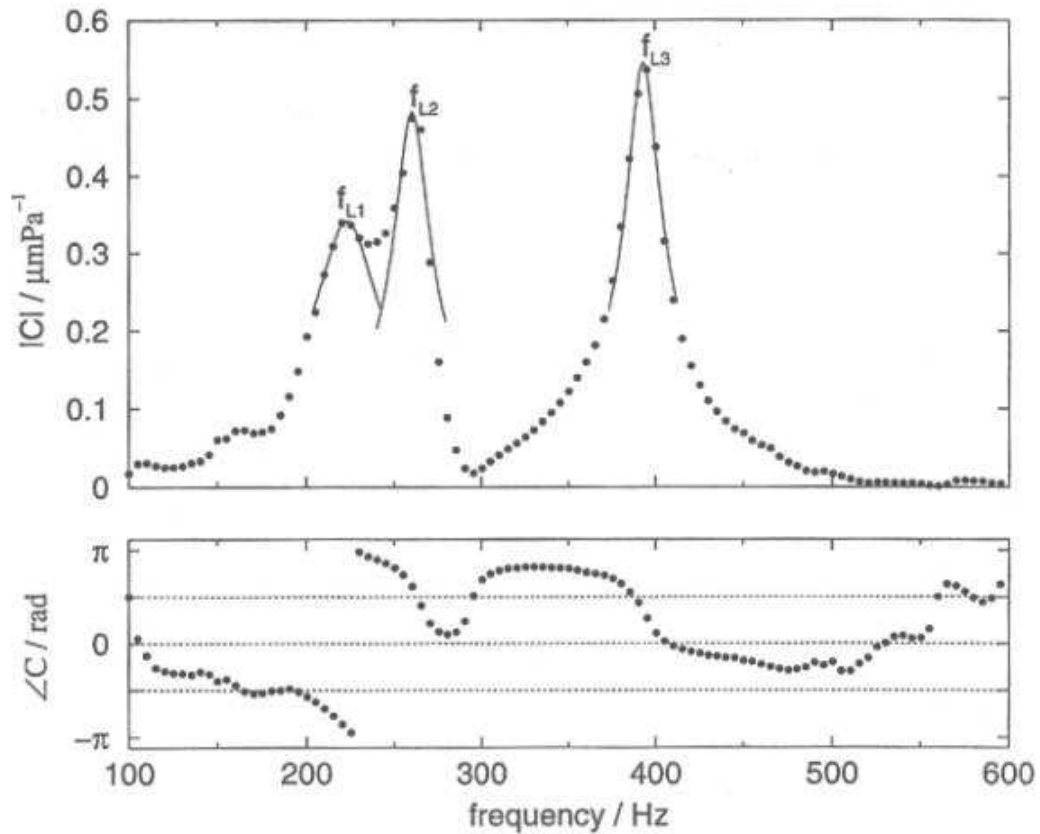


Un haut-parleur génère un champ sonore à l'intérieur de la « cavité buccale », ce dernier met les lèvres en vibration (régime oscillations forcées). Un microphone mesure la pression acoustique (signal  $V_m$ ) dans la cavité buccale au voisinage des lèvres. Un faisceau laser éclaire l'espace inter-lèvre. Le signal recueilli par la photodiode est modulé de par le mouvement vibratoire des lèvres. Le rapport des amplitudes complexes de  $V_d$  sur  $V_m$  est la réponse mécanique caractéristique du « masque » étudié.

**Figure 28**

### Réponse mécanique mesurée des lèvres artificielles

Une réponse mécanique mesurée (amplitude et phase) des lèvres artificielles (dispositif expérimental décrit **figure 27**). Le résonateur acoustique appliqué est une embouchure de trombone :



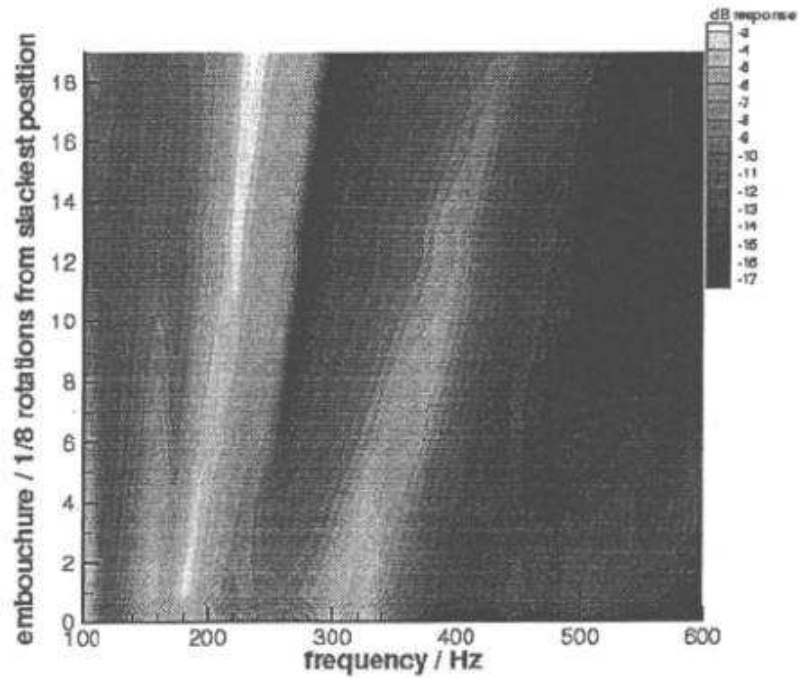
Dans ce cas particulier, la réponse mécanique exhibe clairement 3 résonances mécaniques au voisinage de 225 Hz, 270 Hz et 380 Hz.

## Figure 29

Diagramme de réponses mécaniques de lèvres artificielles en fonction du « masque »

Diagramme de réponses mécaniques de lèvres artificielles en fonction du « masque » (en ordonnée) et de la fréquence (en abscisse). Les mesures ont été effectuées sans résonateur et à surpression statique nulle dans la cavité buccale. Le « masque » est défini par l'appui des lèvres sur un anneau (anneau extrait d'une embouchure). L'unité de l'axe des ordonnées est arbitraire : il s'agit du 1/8 de tour de la mollette de serrage (l'unité croissante correspond à des lèvres appuyées de plus en plus fortement sur l'anneau). Le niveau de gris de la figure est lié à l'amplitude de la réponse mécanique : les maximums correspondent aux teintes claires.



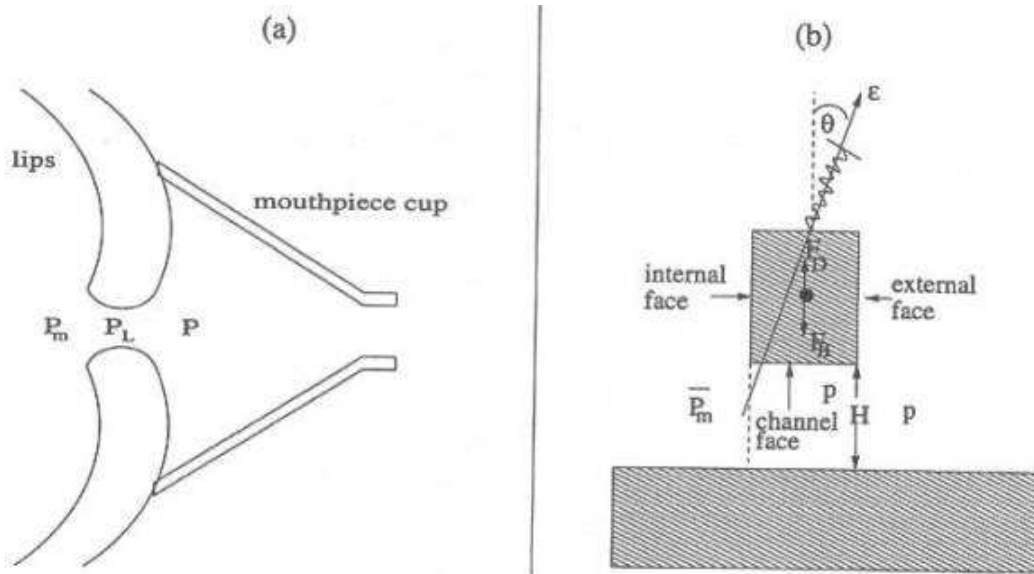


Sur ce contour il apparait clairement que les fréquences de résonances mécaniques (teintes claires de la figure) sont croissantes lorsque les lèvres sont de plus en plus appuyées sur l'anneau de l'embouchure.

**Figure 30**

### Modèle de « masque » du musicien

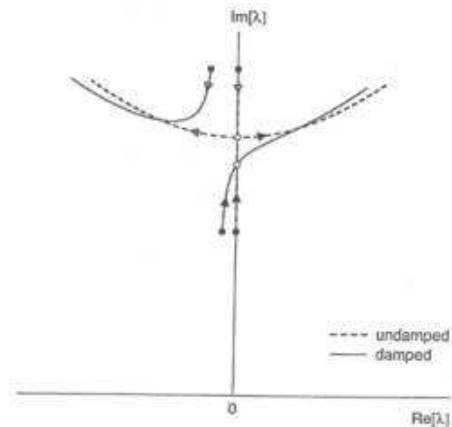
- (a) Deux lèvres du musicien appuyées sur l'embouchure.  $P_m$ ,  $P_L$ ,  $P$  sont les pressions respectivement dans la cavité buccale, dans le canal inter lèvres, à la sortie des lèvres (entrée de l'embouchure).
- (b) Modèle de lèvres dit « à une masse » (la face interne donne sur la cavité buccale, la face externe donne sur l'intérieur de l'embouchure).



**Figure 31**

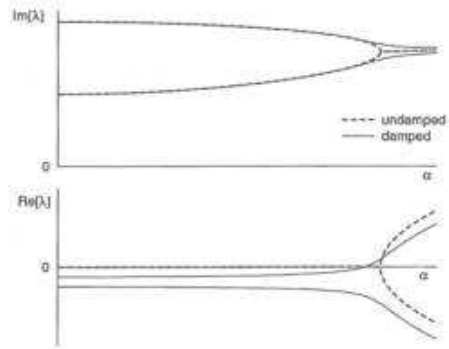
Evolution des valeurs propres dans le plan complexe en fonction d'un paramètre de contrôle

La courbe en « tirets » correspond au système constitué de deux oscillateurs couplés sans perte. La courbe en trait continu correspond au même système avec pertes. Les points du plan représentés par des petits cercles (o) sont les points de bifurcation de Hopf obtenus pour une valeur particulière du paramètre de contrôle. Le sens des flèches représente le sens croissant du paramètre de contrôle, zéro étant la valeur initiale.



Diagrammes de bifurcation :

Parties imaginaire et réelle des valeurs propres en fonction du paramètre de contrôle pour le système constitué de deux oscillateurs couplés (cas sans et avec pertes). Cette figure illustre la coalescence des fréquences propres (cf. la partie imaginaire) dans le cas sans perte, coalescence obtenue pour une valeur particulière  $a_c$  du paramètre de contrôle  $a$ . La prise en compte des pertes structurelles diminue légèrement la valeur de  $a_c$ .  $a_c$  est la valeur particulière de  $a$  pour laquelle une partie réelle de valeur propre devient strictement positive.



**Figure 32**

Description du pharynx humain en vue de l'étude du ronflement

<p>(a) description schématique</p>	<p>(b) dispositif expérimental (« ronfleur artificiel »)</p>

Description du dispositif mécanique (figure de droite ci-dessus) :

(1) languette flexible (voile du palais), (2) film piézo-électrique (capteur sensible au mouvement de flexion de la languette), (3) parois ajustables, (4) accéléromètre, (5) pot vibrant, (6) liaisons avec l'analyseur de signal, (7) réservoir d'air (poumons), (8) débitmètre, (9) pompe à vide.

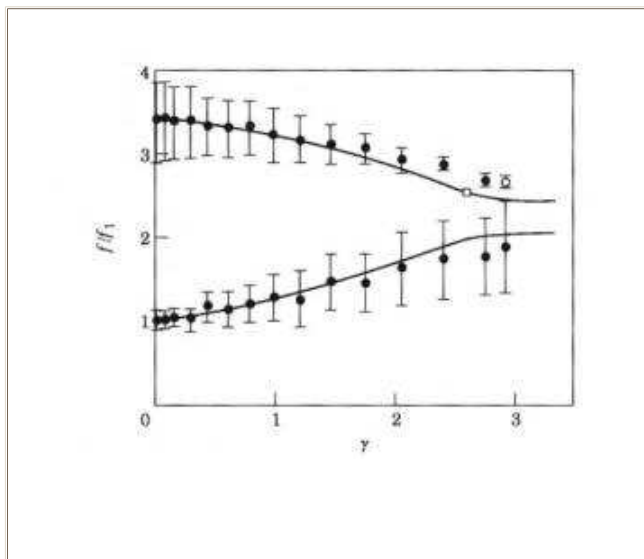


Diagramme de bifurcation (ci-contre)

(représentatif du mécanisme de déstabilisation par coalescence de fréquences propres, voir également la **figure 31**).

- fréquences propres (adimensionnées) mécaniques de la languette en fonction du paramètre de contrôle  $g$  du système ( $g$  fonction croissante du débit d'air) : théorie (trait plein), mesures (points noirs avec barre d'erreur).

- point de bifurcation (fréquence au seuil de l'auto oscillation) : théorie (carré blanc), mesure (cercle blanc).

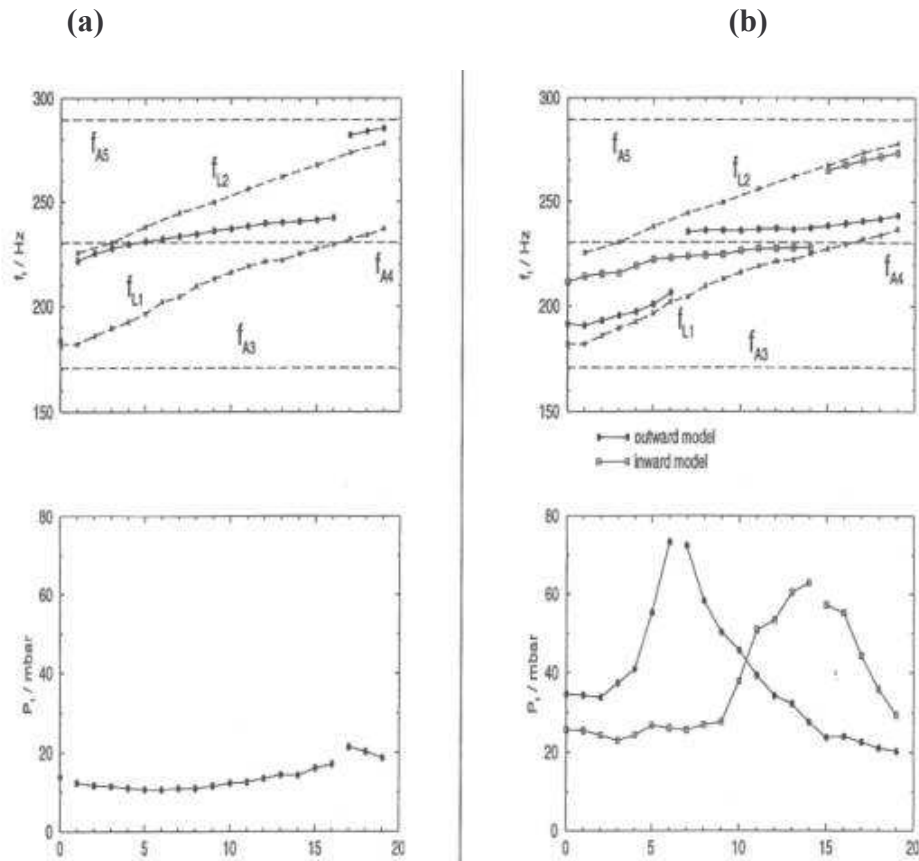
## Figure 33

### Evolution des valeurs de seuil avec le « masque »,

la coulisse de trombone étant bloquée en première position. Les valeurs des fréquences de seuil (respectivement pression de seuil) sont affichées sur les figures du haut (respectivement figures du bas) :

- (a) Mesures au seuil (mesures effectuées avec la bouche artificielle).
- (b) Seuils simulés à partir des modèles à une masse dit « inward » et « outward ».

Les paramètres acoustiques fixes correspondent aux résonances 3, 4 et 5 (fréquences  $f_{A3}$ ,  $f_{A4}$  et  $f_{A5}$ ). Les paramètres mécaniques variables correspondent aux deux premières résonances ( $f_{L1}$ ,  $f_{L2}$ ) extraites de chaque réponse mécanique des lèvres artificielles.



La quantité en abscisse est représentative du « masque » de la bouche artificielle.

Le « masque » est défini par l'appui des lèvres sur un anneau (anneau extrait d'une embouchure). L'unité de l'axe des ordonnées est arbitraire : il s'agit du 1/8 de tour de la mollette de serrage (l'unité croissante de 0 à 20 correspond à des lèvres appuyées de plus en plus fortement).

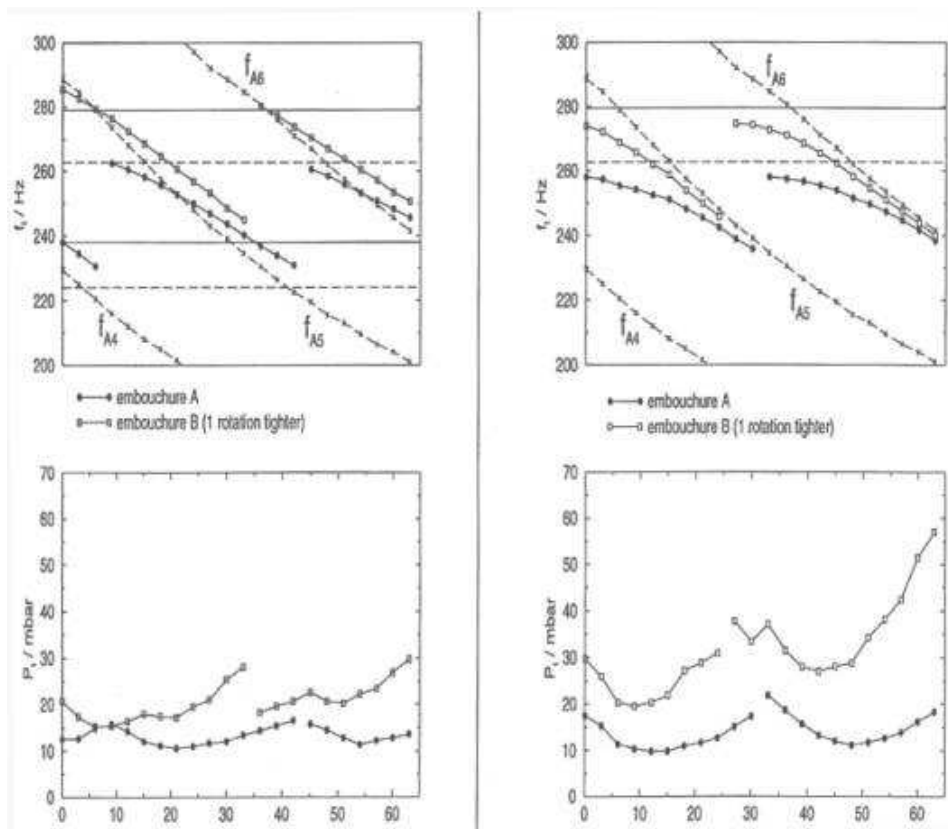
## Figure 34

## Evolution des valeurs de seuil avec le résonateur,

le « masque » du tromboniste (la bouche artificielle) étant fixé. Les valeurs des fréquences de seuil (respectivement pression de seuil) sont affichées sur les figures du haut (respectivement figures du bas) :

- (a) Mesures au seuil d'oscillations (mesures effectuées avec la bouche artificielle).
- (b) Seuils simulés à partir des modèles à une masse dit « inward » et « outward ».

Les paramètres acoustiques correspondent aux résonances 4, 5 et 6 (fréquences  $f_{A3}$ ,  $f_{A4}$  et  $f_{A6}$ ) mesurées sur le trombone utilisé de la position 1 (abscisse 0 sur les figures) à la position 7 (abscisse 63 cm). Les paramètres mécaniques correspondent aux deux premières résonances ( $f_{L1}$ ,  $f_{L2}$ ) extraites de la réponse mécanique des lèvres artificielles.



La quantité en abscisse est caractéristique du résonateur ; il s'agit de la position de la coulisse du trombone utilisé de la position 1 (abscisse 0 sur les figures) à la position 7 (abscisse 63 cm).