

Les Bois : Résonateurs

1- Le plus vieil instrument du monde est-il la flûte ?

Parmi les objets datant du paléolithique que la fouille a exhumé, se trouvent des os de vautour datés d'environ 25000 ans avant JC. Certains de ces os portent des trous latéraux au nombre de 3 et éventuellement 4. La présence d'autres témoins sonores ainsi que le soin apporté par l'homme périgordien à la réalisation et au décors de ces os ont amené le chercheur Michel Dauvois à envisager la possibilité qu'il s'agisse d'instruments de musique. Une collaboration entre préhistoriens et acousticiens a permis une étude acoustique de ces tubes.

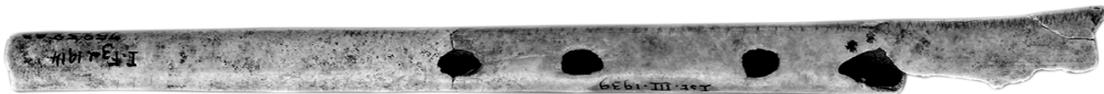


figure 1 : Flûte périgordienne de la grotte d'Isturitz (pyrénées atlantiques) conservée au musée des aintiquités nationales de Saint-Germain-en-Laye. Cliché L. Hamon (D'après Dauvois [1]).

S'agissant de tubes à trous latéraux et ouverts aux deux extrémités, l'hypothèse qui vient naturellement est d'envisager un mode de fonctionnement type flûte. Cependant, rien ne permet d'affirmer qu'il n'existait pas un bec portant une anche, construit dans un matériau végétal qui n'aurait pu se conserver dans les sédiments. Le temps aurait transformé un instrument à anche en flûte ! L'hypothèse « flûte » s'est confirmée lors de l'étude qui a suivi.

Les fragments conservés sont malheureusement dans un état qui ne permet pas de les jouer. Plusieurs voies se sont offertes à nous pour étudier l'instrument :

- réaliser une réplique au sens de la copie des instruments, en reprenant au maximum les matériaux et techniques de l'époque. Cette voie s'est avérée délicate principalement par la rareté du matériau (cubitus de vautour) ,
- réaliser une réplique dans un matériau différent, en conservant au maximum les propriétés acoustiques pertinentes que l'on peut déduire de l'observation de la géométrie,
- synthétiser, à partir des données géométriques, le son que pouvait produire un tel instrument.

L'objectif de la première partie de ce chapitre est de présenter le fonctionnement acoustique du résonateur d'un instrument de la famille des bois. A travers les divers éléments présentés, on pourra identifier les paramètres de l'instrument qui sont déterminants pour le fonctionnement acoustique du résonateur et aboutir ainsi, en fin de cette première partie, au calcul des résonances acoustiques de l'instrument d'Isturitz.

2- Le tuyau sonore

2.1 ondes planes et ondes sphériques

L'équation des ondes acoustiques dans l'air, en l'absence de mécanismes dissipatifs, est rappelée dans le lexique :

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - c_0^2 \Delta p' = 0$$

Cette équation admet deux solutions simples : les ondes planes et les ondes sphériques.

Les ondes planes sont caractérisées par des fronts d'ondes plans. La recherche d'une solution propagative harmonique pour la pression mène à considérer une pression formée de deux termes:

$$p'(x,t) = A e^{j(\omega t - kx)} \text{ pour les ondes se propageant vers les } x \text{ croissants}$$

$$p'(x,t) = B e^{j(\omega t + kx)} \text{ pour les ondes se propageant suivant les } x \text{ décroissants}$$

où k est le nombre d'onde.

Ces formes de solution, insérées dans l'équation d'onde ci-dessus, mène à l'équation de dispersion :

$$k = \omega/c_0$$

caractéristique d'une propagation non dispersive à la vitesse c_0 indépendante de la fréquence.

L'équation d'Euler linéarisée :

$$\partial v / \partial t = -\rho_0 \text{grad}(p')$$

où ρ_0 est la densité de l'air, permet d'obtenir l'expression des ondes de vitesse associées aux ondes de pression ci-dessus :

$$v(x,t) = 1/\rho_0 c_0 A e^{j(\omega t - kx)}$$

$$v(x,t) = -1/\rho_0 c_0 B e^{j(\omega t + kx)}$$

La recherche de solutions en ondes sphériques divergentes et convergentes mène à considérer des solutions de la forme :

$$p'(r,t) = A/kr e^{j(\omega t - kr)} \text{ pour les ondes divergentes}$$

$$p'(r,t) = B/kr e^{j(\omega t + kr)} \text{ pour les ondes convergentes}$$

Ces formes de solutions, reportées dans l'équation d'onde mènent à la même relation de dispersion que ci-dessus, la propagation des ondes sphériques est donc aussi non dispersive.

Les ondes de vitesse associées sont de la forme :

$$v(r,t) = 1/\rho_0 c_0 A/kr (1 - j/kr) e^{j(\omega t - kr)} \text{ pour les ondes divergentes}$$

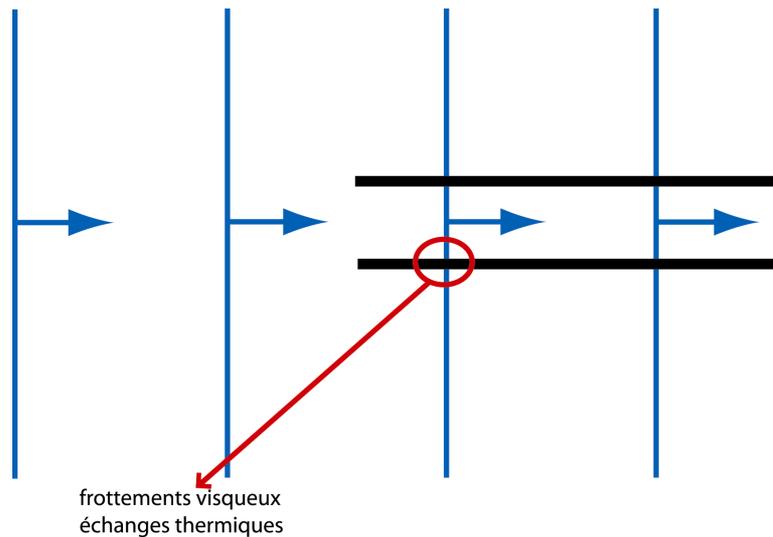
$$v(r,t) = 1/\rho_0 c_0 B/kr (-1 - j/kr) e^{j(\omega t + kr)} \text{ pour les ondes convergentes}$$

On distingue deux comportements différents selon que l'on est en champ lointain ($kr > 1$) car pression et vitesse sont alors en phase, la relation entre pression et vitesse étant alors identique au cas de l'onde plane, ou que l'on est en champ proche ($kr < 1$) car vitesse et pression sont alors en quadrature de phase. On peut remarquer que dans les bois, l'ordre de grandeur de la longueur d'onde pour les premières résonances du tuyau est donné par la longueur de ce dernier. Du point de vue de l'onde sphérique, on est alors dans une situation de champ proche.

2.2 tuyaux sonores

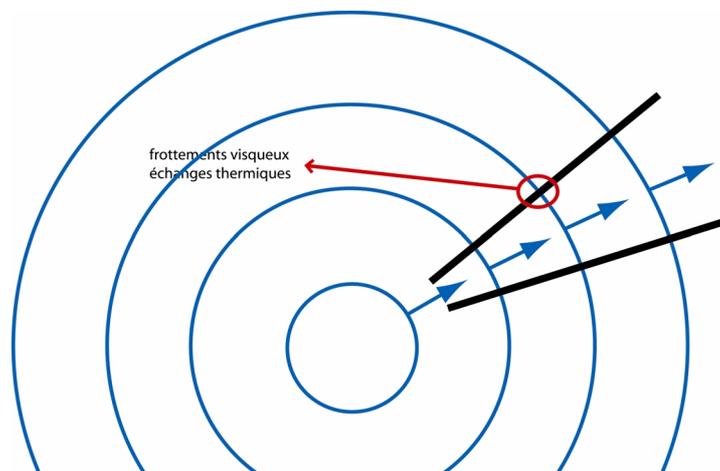
2.2.1 Un peu d'intuition

Si on considère une onde plane dans l'air, et que l'on place un tuyau cylindrique aux parois très fines dont l'axe coïncide avec la direction de propagation de l'onde plane, celle-ci se propage dans le tube de manière similaire à ce qu'elle aurait fait dans l'espace libre. En première approximation, le tube ne perturbe pas l'onde. L'onde plane semble être une bonne solution pour la propagation dans un tube de section constante.



frottements visqueux
échanges thermiques
*figure 2 : l'onde plane constitue une solution "intuitive"
de propagation à l'intérieur d'un tuyau cylindrique*

On peut envisager de manière identique la propagation d'une onde sphérique dans un cône.



*figure 3 : l'onde sphérique constitue une solution "intuitive"
de propagation à l'intérieur d'un tuyau conique.*

2.2.2 L'imparfait du fluide.

Si cette description simpliste permet de se représenter le type d'onde qui se propage dans les tubes, il faut constater qu'elle ne peut convenir à proximités des parois du tuyau : la viscosité du fluide s'oppose à un mouvement tangentiel du fluide le long de la paroi. La vitesse acoustique associée à l'onde dans le tuyau est nulle sur les parois transversales du tube et il apparaît une couche limite acoustique dans laquelle la vitesse augmente rapidement.

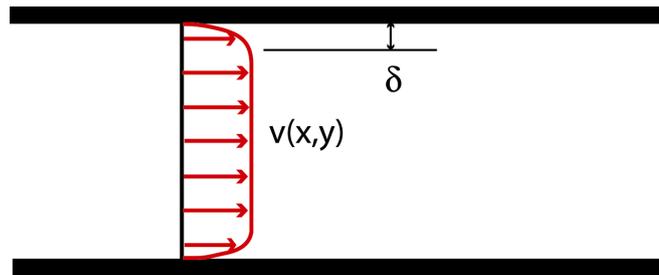


figure 4 : le profil de vitesse acoustique fait apparaître une couche limite visqueuse à proximité des parois

L'effet de la viscosité sur la propagation est double : une perte d'énergie de l'onde se propageant ainsi qu'une augmentation de la masse apparente des tranches de fluide. Ce second effet se traduit par un ralentissement de la propagation (la densité apparente vaut alors $\rho = \rho_0(1 + \delta/a)$ si a est le rayon du tube considéré et δ l'épaisseur de la couche limite).

En plus des effets visqueux, la présence du tube peut aussi induire des pertes thermiques. En effet, l'onde de pression qui se propage est accompagnée d'une onde de température. En première approximation, on considère en champ libre que la compression s'effectue en régime adiabatique. Dans un tube, on s'attend plutôt à un régime isotherme au niveau des parois. Il apparaît donc une couche limite thermique aux parois qui va contribuer à modifier la propagation.

Globalement les effets visco-thermiques se concentrent au voisinage direct des parois. L'épaisseur des couches limites variant comme l'inverse de la racine carrée de la fréquence (la couche limite visqueuse vaut environ $100\mu\text{m}$ à 440Hz), la propagation des basses fréquences est plus lente que celle des fréquences élevées. La figure ci-dessous présente les vitesses de propagation obtenues dans des tubes de rayon 5mm , $9,5\text{mm}$ et $13,5\text{mm}$.

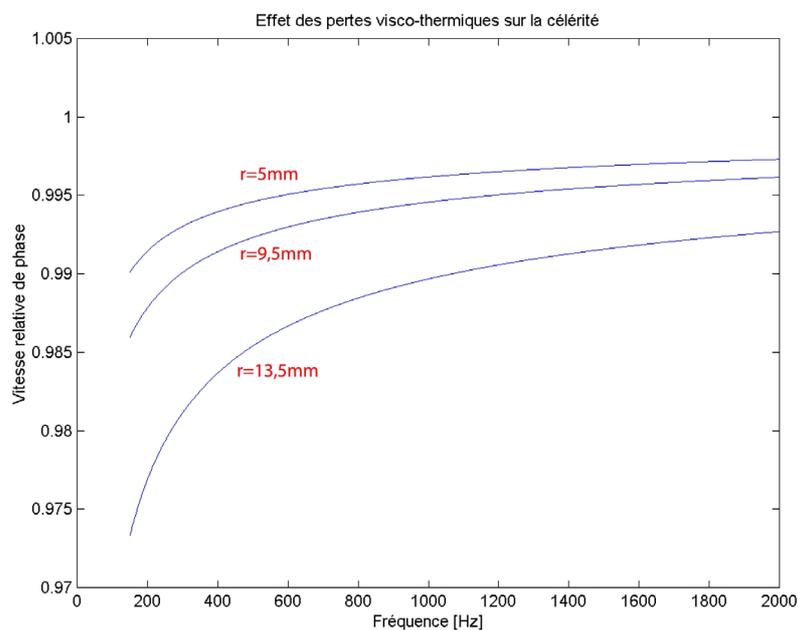


figure 5 : les pertes visco-thermiques aux parois du tuyau (de rayon 5mm [courbe du bas], $9,5\text{mm}$ et $13,5\text{mm}$ [courbe du haut]) affectent la vitesse de propagation des ondes. Les couches limites étant d'autant plus épaisses que la fréquence est basse, l'effet de ralentissement de la propagation est plus marqué aux fréquences basses.

Si des variations des vitesses de propagation de quelques pourcent peuvent paraître dérisoire à première vue, il n'en est rien dans un problème de facture instrumentale car ils représentent des fractions importantes d'un demi-ton (6%) !

Dans une modélisation, on peut en première approximation considérer un nombre d'onde complexe qui permet de prendre en compte ces effets de manière simple.

3- Réflexion d'une onde à l'extrémité d'un tuyau

3.1 Facile mais frustrant

L'onde se propageant voit subitement, en fin de tube, son univers changer. Si le tube est fermé, le mouvement des particules est nul sur la paroi terminale et la vitesse acoustique s'annule. L'onde se réfléchit en créant une onde stationnaire par combinaison de l'onde aller et de l'onde retour. La vitesse acoustique, somme des deux ondes aller et retour est nulle sur la paroi et la pression est double de la pression incidente. Le coefficient de réflexion en pression vaut $+1$, le coefficient de réflexion en vitesse vaut -1 .

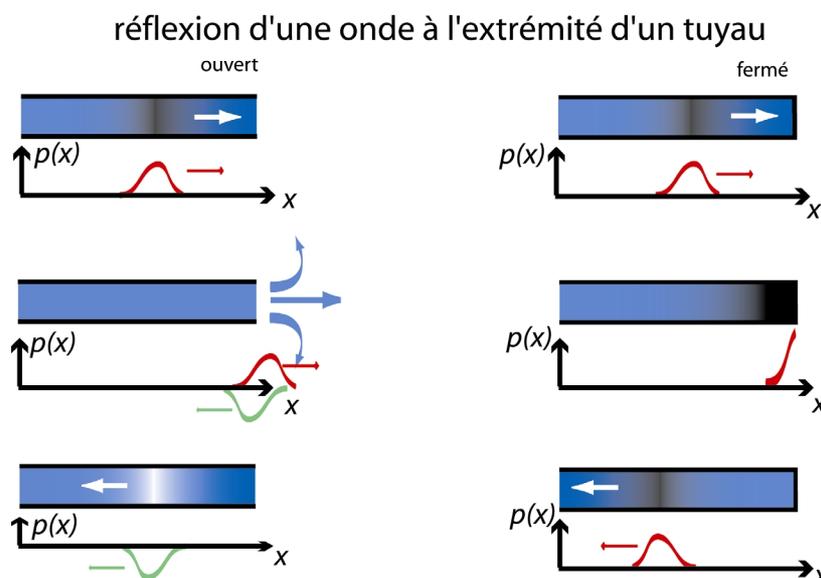


Figure 6 : réflexion d'une onde sur l'extrémité ouverte ou fermée d'un tuyau.
La pression change de signe lors de la réflexion sur une extrémité ouverte.

Si le tube est ouvert, le monde extérieur impose une pression acoustique quasiment nulle et l'onde de pression aller se réfléchit en créant une onde de pression retour en opposition de phase. La vitesse acoustique à l'extrémité est double de la vitesse acoustique de l'onde incidente. Le coefficient de réflexion en vitesse est $+1$ alors que celui en pression vaut -1 .

Si une onde progressive se réfléchit sur une extrémité ouverte ou fermée, la combinaison des ondes aller et retour ainsi obtenues forment une onde stationnaire (voir figure 7). Cette onde stationnaire présente des points de pression acoustique maximale, traditionnellement appelés ventre de pression, et des points où la somme des ondes aller et retour est nulle, appelés nœuds de pression. Deux ventres ou deux nœuds sont distants d'une demi longueur d'onde alors qu'un ventre et un nœud sont distants d'un quart de longueur d'onde. Une onde stationnaire de vitesse accompagne l'onde de pression et ses nœuds et ventres sont décalés d'un quart de longueur d'onde par rapport à ceux de l'onde de pression.

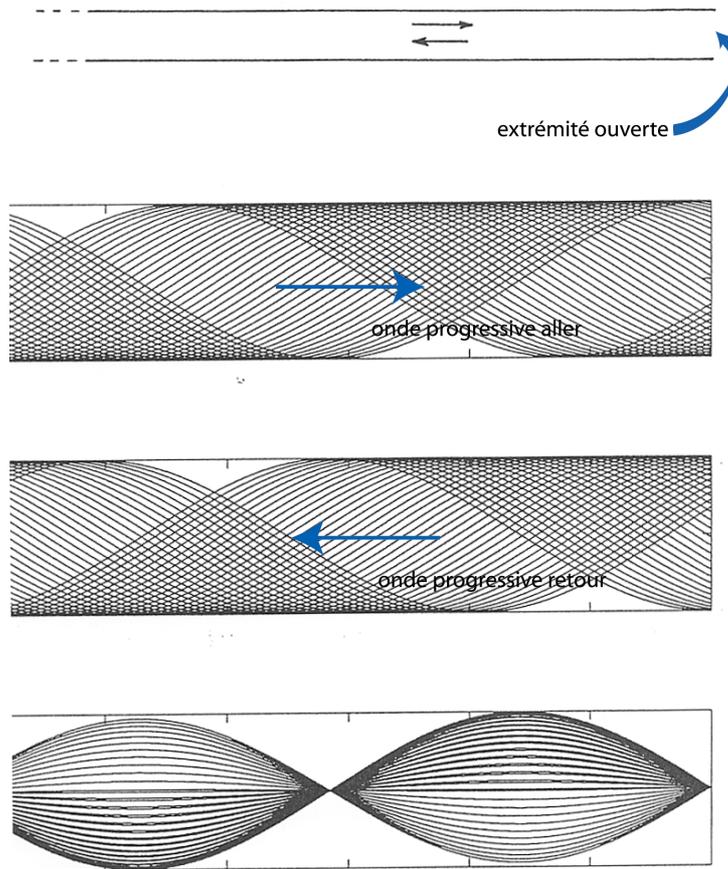


figure 7 : la combinaison d'ondes progressives aller et retour (réflexion sur une extrémité ouverte) forme des ondes stationnaires

Cette première approche permet d'expliquer pourquoi, à longueurs égales, un tube cylindrique ouvert à une extrémité et fermé à l'autre (clarinette, flûte de pan) sonnera environ une octave plus bas qu'un tube ouvert-ouvert (flûte traversière, flûte à bec...). Ceci tient au fait qu'une extrémité ouverte impose un nœud de pression alors qu'une extrémité fermée impose un nœud de vitesse, donc un ventre de pression. De plus, on comprend aussi que les divers modes de résonance d'un tuyau ouvert-fermé ont des fréquences voisines de multiples impaires de la fréquence du premier mode ($\lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4$ etc.) alors qu'un tuyau ouvert-ouvert aura une série de mode dont les fréquences sont approximativement des multiples paires et impaires de la fréquence du premier mode ($\lambda/2, 2\lambda/2, 3\lambda/2$ etc.).

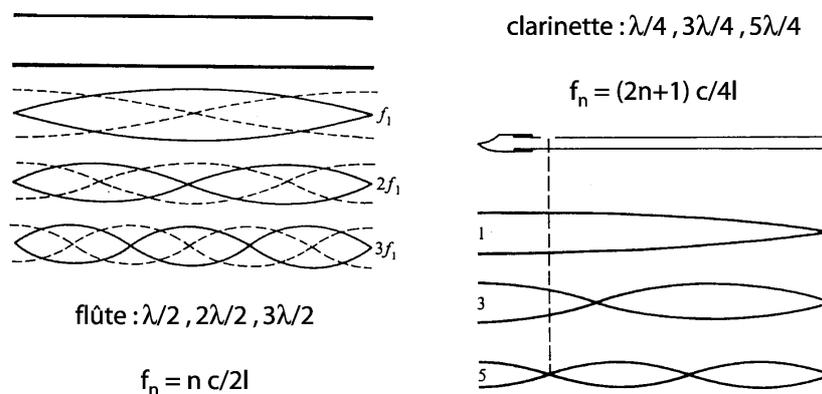


figure 8 : résonances d'une flûte et d'une clarinette

Cette description est basée sur une réflexion « idéalisée » rappelée ci-dessus. Cette approximation est frustrante car elle prévoit qu'aucun son ne s'échappe de l'instrument puisque la pression à une extrémité ouverte et donc la pression rayonnée à l'extérieur sont nulles !

3.2 Un peu plus réaliste

3.2.1 Piston plan

En pratique, bien heureusement pour notre plaisir auditif, la pression extérieure n'est pas rigoureusement nulle puisque l'instrument rayonne. Pour prendre en compte ce rayonnement, il faut considérer le raccordement entre l'onde interne au tube et l'onde sphérique externe rayonnée à basse fréquence.

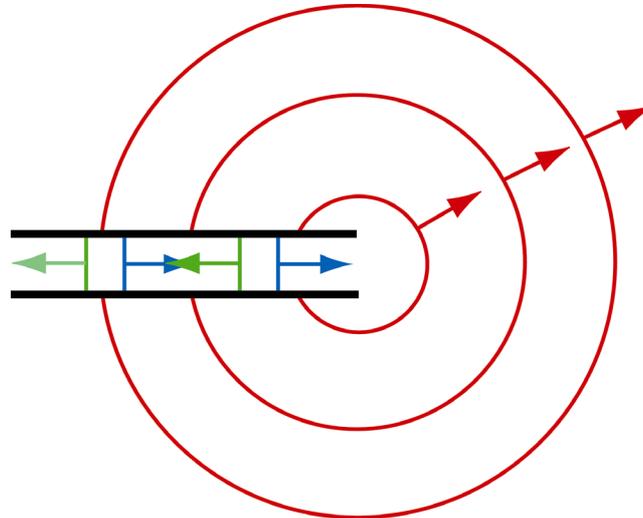


figure 9 : en basses fréquences, l'expression de l'impédance de rayonnement à l'extrémité peut se calculer en écrivant le raccordement d'une onde plane interne à une onde sphérique externe.

Ceci est similaire à l'étude du rayonnement du piston plan (cf Lexique). L'extrémité du tube peut alors être caractérisée par une relation entre pression et débit acoustique en fonction de la fréquence, appelée impédance. Cette impédance de rayonnement peut être approximée en basses fréquences, pour un tube de rayon a aux parois fines, par :

$$Z_{ray} = \rho_0 c_0 S [1/4 (ka)^2 + j 0.61 ka]$$

Où ρ_0 est la densité moyenne de l'air, $S = \pi a^2$ est la section du tube et $k = \omega / c_0$ est le nombre d'onde. La partie réelle de l'impédance de rayonnement correspond à la composante en phase de la pression acoustique et de la vitesse acoustique rayonnées : elle quantifie la puissance rayonnée. La partie imaginaire de l'impédance de rayonnement correspond à pression et vitesse en quadrature : il n'y a pas d'énergie acoustique associée à ce terme qui représente l'inertie de l'air mis en mouvement au voisinage de l'extrémité ouverte. Du point de vue de l'onde interne, cette partie imaginaire se comporte comme une masse dont la valeur apparente correspond à la masse d'air comprise dans un cylindre de même section que le tube et de hauteur $0.61a$.

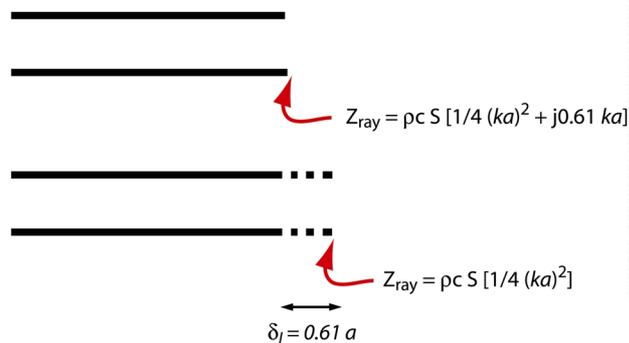


figure 10 : En basses fréquences la partie imaginaire de l'impédance de rayonnement peut être décrite de manière équivalente comme une "correction d'extrémité" qui affecte les fréquences de résonance du tuyau

On peut alors considérer de manière équivalente un tuyau auquel on aurait ajouté une correction de longueur de $0.61 a$ et à l'extrémité de laquelle la réflexion s'accompagnerait uniquement d'une petite perte d'énergie. C'est de cette « petite » perte que nous allons discuter maintenant.

3.2.2 Relation champ interne / champ externe

L'efficacité de rayonnement est très faible pour les fréquences de jeu des instruments : ceci tient au fait que les dimensions des extrémités qui rayonnent sont très petites par rapport à la longueur d'onde que l'on tente de rayonner. Pour une flûte traversière moderne jouant un Do grave (261 Hz) le rayon du tube est de 9,5 mm pour une longueur d'onde rayonnée d'environ 1,30m.

Pour une onde plane interne :

$$p'(x,t) = A e^{j(\omega t - kx)} + B e^{j(\omega t + kx)}$$

$$v(x,t) = 1/\rho_0 c_0 [A e^{j(\omega t - kx)} - B e^{j(\omega t + kx)}]$$

se réfléchissant en fin de correction de longueur en $x=0$, l'impédance

$$p'/Sv = \rho_0 c_0/S (A+B)/(A-B)$$

doit être égale à :

$$Z = \rho_0 c_0 S \frac{1}{4}(ka)^2$$

de sorte que le coefficient de réflexion en pression vaut :

$$B/A = (z-1)/(z+1) = -(1-1/4(ka)^2)$$

Si z est l'impédance réduite (normalisée à $\rho_0 c_0/S$).

Pour une flûte de rayon 9.5mm à 260Hz, le module du coefficient de réflexion en pression vaut 99,95%. L'auditeur ne perçoit qu'une fraction infime du champ interne.

Cependant, le rapport entre pression rayonnée et pression interne augmente avec le carré de la fréquence. Ainsi, ce coefficient de réflexion pour le même tube chutera à une valeur de 90% vers 3500 Hz, dans la zone sensible de l'oreille. Le rayonnement agit donc sur le spectre de pression interne au tube comme un filtre passe-haut. Il en ressort que l'énergie à basse fréquence est littéralement confinée dans le tube et que les amplitudes des grandeurs acoustiques dans le tube sont très élevées à basse fréquence.

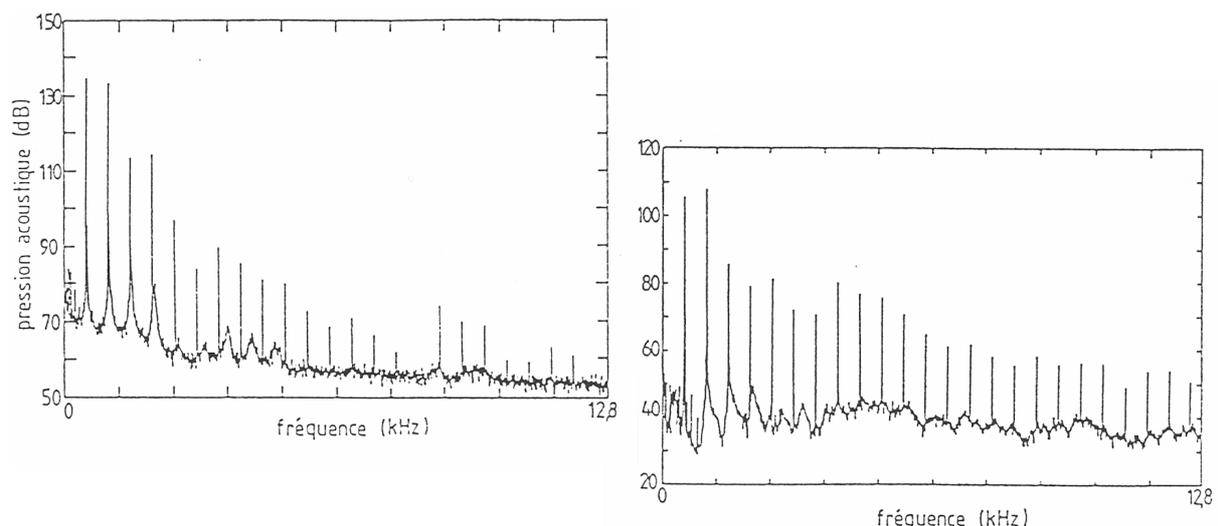


Figure 11 : spectre interne (gauche) et externe (droite) de la pression acoustique interne et externe d'une flûte à bec. La pression rayonnée (externe) est captée par un microphone à environ 20cm de la bouche de l'instrument.

4- Les trous latéraux

Pour construire la tessiture d'un instrument de la famille des bois, plusieurs solutions s'offrent au facteur :

- construire un tuyau par note dont la longueur est ajustée pour produire la hauteur désirée : c'est la solution retenue dans l'orgue et dans la flûte de pan ;
- construire un tuyau de longueur variable. C'est le jazzoflûte et les autres flûtes « à coulisse »
- enfin, la solution utilisée pour de nombreux instruments consiste à ouvrir successivement des trous latéraux depuis l'extrémité passive de l'instrument vers l'embouchure afin de monter la gamme.

Les instruments de la famille des bois à trous latéraux font presque toujours appel à plusieurs régimes d'oscillation du tuyau : une fois tous les trous latéraux ouverts pour monter une gamme sur le premier régime, le musicien continue sa gamme ascendante sur le second régime en refermant tous les trous puis en les ouvrant un à un. Il obtient le second régime en modifiant les paramètres d'embouchure et éventuellement en ouvrant un trou « de registre », trou de petit diamètre situé dans la première moitié du corps de l'instrument (cf fig. 8). A l'image du violoniste ou du guitariste qui force la corde à vibrer sur son second régime en effleurant du doigt la corde en son milieu, les trous de registre ouvrent une « fuite » à la position d'un ventre de pression du premier mode, par exemple, qui coïncide avec la position d'un nœud de pression du second mode (pour un passage du premier au second mode dans ce cas).

Pour une flûte traversière moderne, le second régime sonne une octave au dessus ($f_2/f_1=2$) du premier régime et le facteur doit ménager 12 trous latéraux pour obtenir une gamme chromatique alors que pour une clarinette, le second régime sonne une douzième au dessus ($f_2/f_1=3$) et le facteur doit ménager 18 trous latéraux pour obtenir une gamme chromatique.

Le positionnement des trous « de note » détermine la justesse de l'instrument à l'intérieur d'un même régime. Le trou latéral, lorsqu'il est ouvert, se comporte approximativement comme une extrémité ouverte du tuyau à condition que son diamètre soit voisin de celui du tuyau. Si son diamètre est plus petit, il convient de placer le trou plus près de l'embouchure afin d'obtenir la même hauteur de note.

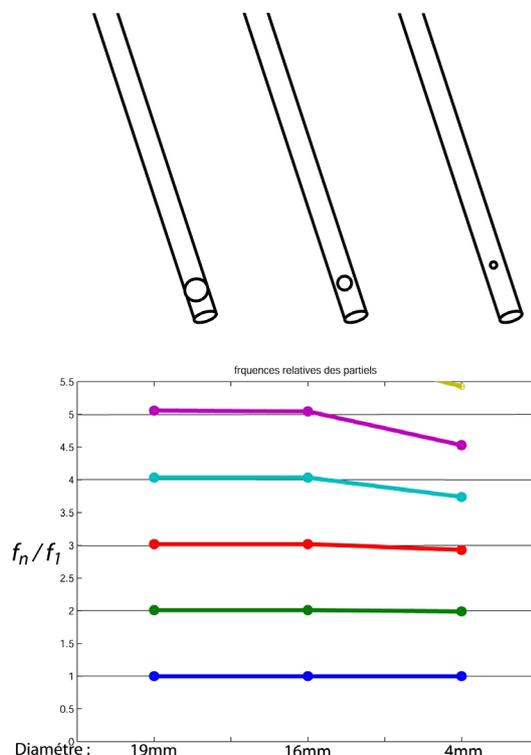


Figure 12 : pour une même fréquence de résonance du premier partiel du tuyau, un trou latéral de diamètre plus faible peut être placé plus proche de l'embouchure. Les fréquences relatives des partiels supérieurs s'en trouvent fortement affectées. Tuyau de 19mm de diamètre, de 63 cm de long.

Le facteur peut donc opérer un compromis entre position et diamètre relatif du trou. Cependant, la possibilité d'ouvrir un trou de diamètre plus petit en le plaçant plus proche de l'embouchure se paie au niveau des rapports de fréquence entre les divers régimes du tuyau. Ceci influencera donc la justesse de l'instrument entre ses différents régimes. La figure 12 présente les fréquences des trois premières résonances d'un tuyau de 19mm de diamètre et 63cm de long ouvert avec un trou latéral permettant d'obtenir une note un ton au dessus de celle obtenue trou bouché. Trois cas sont présentés, correspondant à un diamètre du trou latéral de 19mm, 16mm ou 4mm, le trou étant positionné à distance de plus en plus grande de l'extrémité afin d'obtenir même fréquence de résonance du premier régime.

Il apparaît que l'inharmonicité des partiels du tuyau augmente à mesure que le diamètre du trou diminue.

5- tout rassembler pour « construire » la réponse acoustique d'un instrument

A partir de la description des divers éléments ci-dessus, propagation dans le tube, impédance de rayonnement, nous pouvons maintenant déterminer le comportement acoustique du résonateur d'un instrument de la famille des bois. Pour cela, les tubes sont vus comme des lignes de transmission. Dans le cas d'un tube cylindrique par exemple, pression et vitesse acoustique en un point d'abscisse x s'écrivent, en régime harmonique :

$$\begin{aligned} p'(x,t) &= (A e^{-jkx} + B e^{jkx}) e^{j\omega t} \\ v(x,t) &= 1/\rho_0 c_0 (A e^{-jkx} - B e^{jkx}) e^{j\omega t} \end{aligned}$$

On peut alors exprimer une impédance locale d'onde :

$$Z(x,\omega) = \rho_0 c_0 (1 + B/A e^{2jkx}) / (1 - B/A e^{2jkx})$$

ou, de manière équivalente, un coefficient de réflexion en pression, rapport entre les amplitudes complexes des ondes retour et aller :

$$r(x,\omega) = B e^{jkx} / A e^{-jkx}$$

Impédance d'onde et coefficient de réflexion sont liés par les relations :

$$z = 1+r / 1-r \quad r = 1+z / 1-z$$

ou z est l'impédance réduite $z = Z / \rho_0 c_0$

Un observateur qui se déplace suivant les x croissants sur une ligne sans pertes voit le coefficient de réflexion tourner sur un cercle :

$$r(x,\omega) = B/A e^{-2jkx} = r(0,\omega) e^{-2jkx}$$

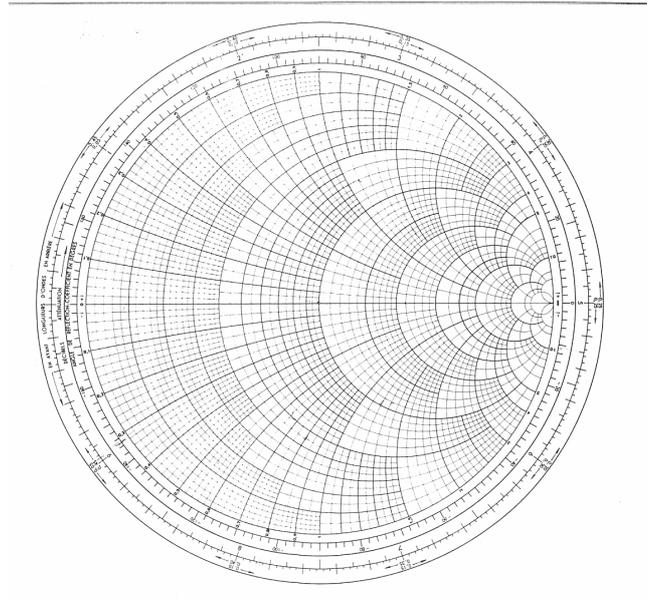


figure 13 : l'abaque de Smith, plan des coefficients de réflexion.

Le diagramme de la figure 13, connu par les spécialistes des lignes de transmission hyperfréquences sous le nom d'abaque de Smith, représente les transformations de l'équation ci-dessus et permet, dans le plan des coefficients de réflexion, de déterminer les impédances réduites correspondantes. Sur l'abaque, on pourra par exemple déterminer l'impédance d'entrée du résonateur avec une bifurcation qui modélise un trou latéral avec une cheminée sur un instrument à vent. Pour cela, partant de l'impédance de rayonnement au trou t_1 , on détermine le coefficient de réflexion et donc l'impédance réduite z_1 ramenée par le tronçon l_1 au point P. De manière équivalente, on détermine l'impédance réduite z_2 ramenée au point P par le tronçon l_2 . Les équations de continuité au point P (continuité de la pression, sommation des débits acoustiques) indiquent que les admittances y_1 et y_2 s'additionnent. Ces deux admittances se déduisent par symétrie par rapport à l'origine du plan et l'admittance au point P s'obtient en sommant parties réelles et imaginaires de y_1 et y_2 .

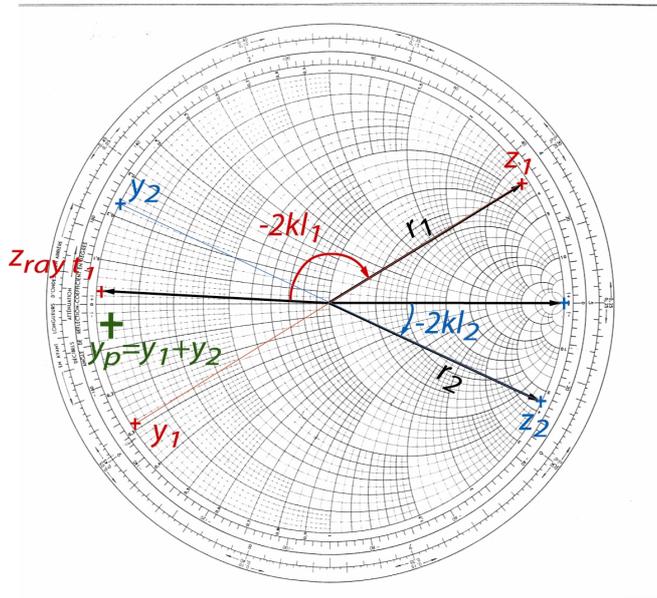
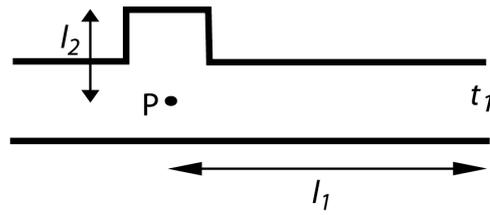
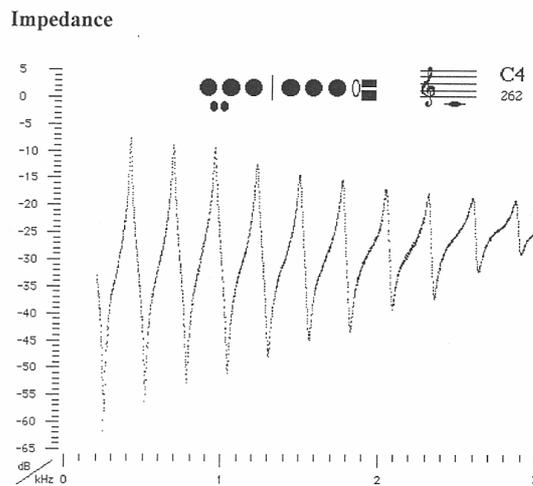


figure 14 : exemple d'utilisation de l'abaque de Smith

A l'inverse des problèmes classiques en hyperfréquences pour lesquels une fréquence de fonctionnement unique est imposée par la source, nous cherchons souvent à déterminer l'impédance du tube pour une plage de fréquence. La détermination graphique ci-dessus devrait donc être menée à différentes fréquences. Ce calcul est désormais réalisable par ordinateur. Pour la géométrie d'une flûte moderne, pour un doigté donné, on peut calculer la courbe d'admittance (ou d'impédance) d'entrée en fonction de la fréquence.



Impedance spectrum of a Boehm flute with a C foot measured at the embouchure hole using conventional fingering for C4.

Figure 15 : Impédance d'entrée mesurée sur une flûte traversière, tous trous fermés. (image du site : <http://newt.phys.unsw.edu.au/music/flute/>)

La courbe ci-dessus a été relevée expérimentalement J. Wolfe & al. La comparaison théorie / expérience confirme la pertinence de la modélisation dont nous avons donné les grandes lignes ci-dessus. La figure ci-dessus est extraite du site <http://newt.phys.unsw.edu.au/music/flute/> qui présente un outil fantastique pour l'analyse du fonctionnement acoustique passif de la flûte traversière moderne.

6- Comparaison entre flûte Boehm et flûte baroque

Nous allons montrer une application des principes exposés ci-dessus en comparant deux états historiques de la facture de la flûte traversière.

6-1 La flûte baroque

La flûte jouée au XVIII^{ème} siècle, aujourd'hui appelée traverso ou flûte à une clef, est une flûte à embouchure cylindrique, corps globalement conique dont le diamètre du corps diminue lorsque l'on s'éloigne de l'embouchure et patte conique ouvrant. La flûte est percée de 7 trous latéraux dont l'ouverture successive donne quasiment une gamme diatonique. Les trous sont placés de manière « ergonomique » pour trois doigts (index, majeur et annulaire) de la main gauche et trois doigts (les mêmes) de la main droite. Seul l'auriculaire droit actionne une clef pour ouvrir le trou le plus distant de l'embouchure.



fig 16 : Le positionnement des trous sur la flûte à une clef correspond à un placement naturel des doigts, sauf pour le petit doigt de la main droite qui actionne une clef permettant d'ouvrir un trou éloigné. D'après Jacques Hotteterre « Principes de la flûte traversière ou flûte d'Allemagne » (1707).

Le parti pris de facture est le suivant. Les positions des trous sont imposées par l'écartement quasi-naturel des doigts pour l'ergonomie du jeu et le diamètre des trous est limité aux 5 ou 7 millimètres que l'on peut aisément fermer avec la pulpe des doigts. Le facteur obtient alors l'échelle diatonique visée en optimisant finement la perce (diamètre intérieur) de l'instrument et les diamètres des trous. Ceci permet au flûtiste de jouer une gamme diatonique d'une octave. Il obtient la seconde octave en reprenant la même série de doigtés en ajustant son jeu à l'embouchure (positionnement, pression du souffle). Pour garantir la justesse de la flûte sur les deux premières octaves, le facteur doit optimiser

la perce de l'instrument de manière à ajuster correctement les fréquences des deux premiers maxima de la courbe d'admittance d'entrée. Lors d'un jeu chromatique, l'instrumentiste doit utiliser des doigtés « de fourche » caractérisés par le fait de refermer des trous ou delà du premier trou ouvert. Le calcul de l'admittance d'entrée montre que la perce permet un ajustement correct des deux ou trois premières résonances de l'instrument pour les doigtés sans fourches. Par contre, pour les doigtés de fourche, l'inharmonicité est forte et interdit, pour la plupart d'entre eux, d'utiliser les mêmes doigtés pour la première et la seconde octave de l'instrument.

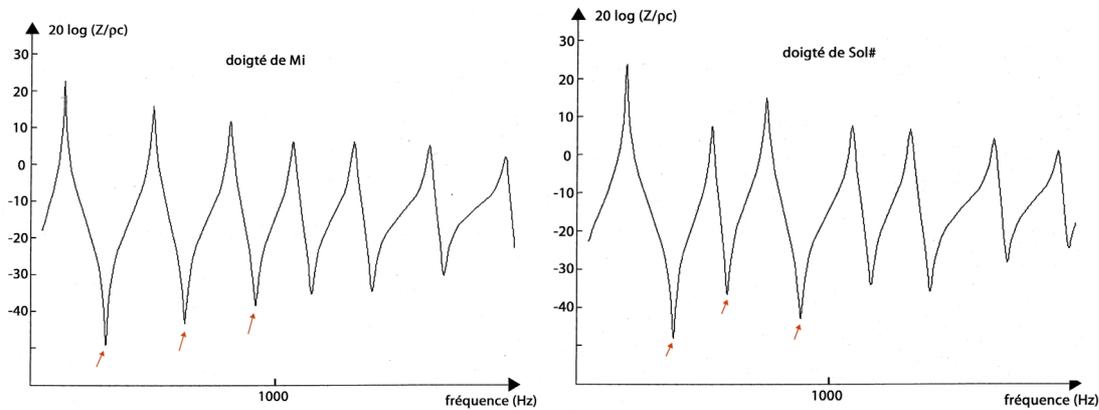


Fig. 17 Impédance d'entrée calculée d'une flûte à une clef pour deux doigtés : Mi et Sol#. Les fréquences de résonance de l'instrument correspondent aux maxima de l'admittance, signalés par les flèches. Ces fréquences deviennent très inharmoniques pour les doigtés de fourche (Sol#).

Au delà de la justesse de l'instrument, l'inharmonicité des modes de la flûte affecte le contenu spectral du son : les harmoniques seront d'autant plus intenses que leur fréquences, multiples entières de la fréquence du fondamental, seront proches des résonance passives de l'instrument. Le timbre d'une flûte baroque jouée chromatiquement est donc très inégal : les notes jouées avec des doigtés de fourche ont une sonorité plus sombre, caractéristique d'un contenu harmonique pauvre.

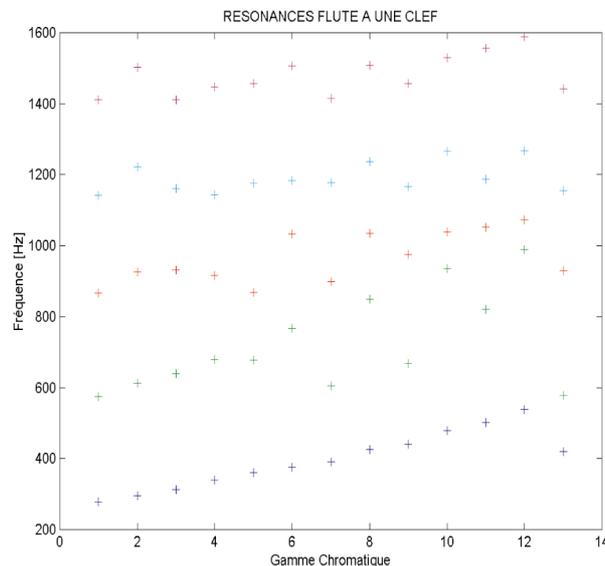


fig18. Fréquences de résonance d'une flûte à une clef pour les différents doigtés correspondant à une gamme chromatique (partant d'un Ré 277 Hz). L'harmonicité devient de plus en plus mauvaise à mesure que l'on monte la gamme.

6-2 La flûte traversière moderne

Dans les années 1800-1890, Gordon, Nicholson et Boehm cherchent à "améliorer" la facture de la flûte suivant le goût de l'époque, tendances que l'on retrouve à la même époque dans la facture de nombreux autres instruments : augmenter la puissance sonore de l'instrument, favoriser la virtuosité

instrumentale et l'égalité du timbre. Pour cela, plusieurs transformations de la facture sont réalisées. Les trous latéraux sont élargis jusqu'à un diamètre voisin de celui du tuyau, nécessitant des plateaux pour les obturer du doigt. La perce du corps de l'instrument devient cylindrique. L'instrument devient chromatique et possède maintenant un trou "large" par demi-ton. Les trous sont donc placés de manière très régulière sur le corps et la patte de l'instrument et sont difficilement atteignables par les doigts du flûtiste : un système mécanique complexes de clefs et de leviers permet d'actionner à distance les divers plateaux qui ferment les trous. Une bonne justesse des partiels du tuyau est optimisée en donnant une légère conicité à l'embouchure de l'instrument (le diamètre du corps est de 19mm alors que le diamètre au niveau du trou d'embouchure est de 17mm) et en ajustant le volume entre le trou d'embouchure et le bouchon qui ferme l'embouchure. La figure 19 compare les perces d'une flûte à une clef et d'une flûte Boehm.

Ces innovations de facture apportent :

- un timbre plus riche car les 4 ou 5 premières résonances ont maintenant des fréquences qui correspondent beaucoup mieux que pour la flûte baroque aux harmoniques du fondamental ($f_n \propto n f_1$)
- une sonorité plus égale puisque les doigtés de fourche utilisés pour le jeu chromatique de la flûte baroque ont disparu
- une émission plus facile.

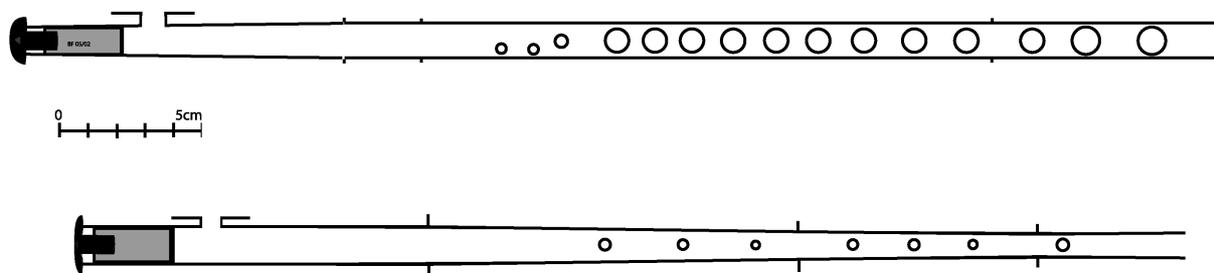


fig.19 : perces d'une flûte à une clef (en haut) et d'une flûte Boehm (en bas). La flûte à une clef a une embouchure cylindrique suivie d'un corps dont le diamètre diminue lorsque l'on s'éloigne de l'embouchure. Les 7 trous diatoniques sont de faible diamètre et positionnés de manière « ergonomique ». La flûte Boehm a une embouchure dont le diamètre augmente très légèrement (17 à 19 mm) en allant du trou d'embouchure vers le corps de la flûte. Ce dernier est cylindrique et percé de trous larges chromatiques, positionnés de manière régulière : le cléage (non représenté) est nécessaire pour fermer les trous.

Bien entendu, l'évolution de la facture accompagne une évolution du goût musical et du répertoire : le jeu chromatique utilisé ci-dessus comme exemple est beaucoup plus fréquent dans le répertoire de la fin du 19^{ème} siècle et du 20^{ème} siècle que dans le répertoire baroque.

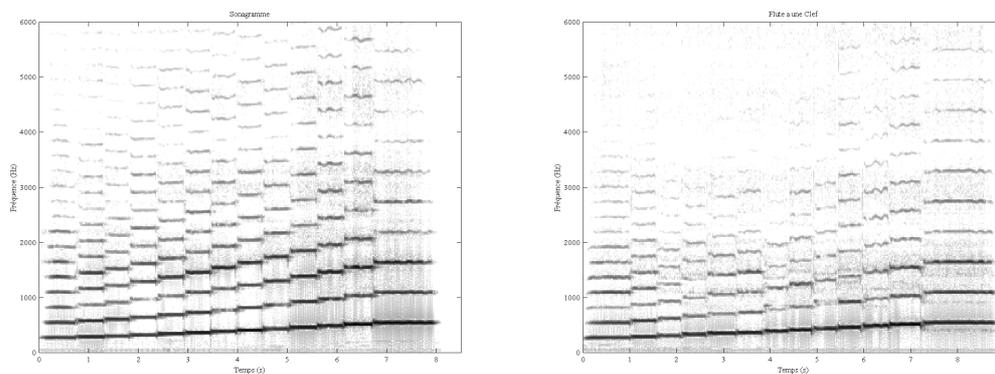


fig. 20.: analyse temps-fréquence d'une gamme chromatique jouée sur une flûte Boehm (à gauche) et sur une flûte à une clef (à droite). On remarque que les harmoniques supérieurs sont plus intenses dans le cas de la flûte Boehm et que la sonorité des différentes notes est plus égale dans le cas de la flûte Boehm. Les notes correspondant à des doigtés de fourche sur la flûte à une clef ont un contenu harmonique particulièrement pauvre.

Parmi les instruments modernes, le piccolo a conservé une géométrie proche de celle de la flûte baroque (corps conique convergent et embouchure cylindrique) même s'il est devenu chromatique et possède un clétage de type Boehm. Cela correspond en fait à la première étape de transformation de la facture effectuée par Boehm, le corps cylindrique n'étant venu que par la suite. Notons de plus que dans le cas des flûtes, le fonctionnement acoustique est plutôt celui d'un cylindre corrigé que d'un véritable cône tant la conicité (du corps de la flûte baroque ou de l'embouchure de la flûte Boehm) est légère. Le hautbois ou le saxophone présentent, eux, une conicité beaucoup plus forte. Enfin, le saxophone et la clarinette sont percés de trous "larges" et ont donc une perce très régulière alors que le hautbois et le basson se rapprochent plus de la description que nous avons faite de la flûte baroque avec des "petits" trous latéraux et une perce nettement moins régulière .

7- Pour conclure

Revenons maintenant à la flûte d'Isturitz citée au début de ce chapitre. La figure 21 présente les courbes d'admittance d'entrée calculées à partir de la géométrie interne de l'os : même si celui-ci n'est plus en état d'être joué, ses dimensions (perce, position des trous) sont facilement mesurables. Les 5 courbes obtenues en ouvrant successivement les 4 trous montrent une coïncidence qui ne peut être fortuite : la fréquence du premier maximum d'admittance obtenue tous trous ouverts coïncide avec celle du second maximum d'admittance tous trous fermés. De plus, cette fréquence est à une octave de la note la plus grave (tous trous fermés). L'instrument possède donc le même type de continuité des hauteurs musicales entre les deux premiers registres que ce que l'on observe aujourd'hui dans la plupart des flûtes. Ceci incite donc fortement à penser qu'il s'agissait bien d'une flûte et non pas d'un instrument dont l'anche aurait disparue car, si tel était le cas, il faudrait considérer les maxima d'impédance et non plus d'admittance. Or, ces derniers ne présentent pas la même continuité des hauteurs que celle décrite ci-dessus pour une excitation "flûte".

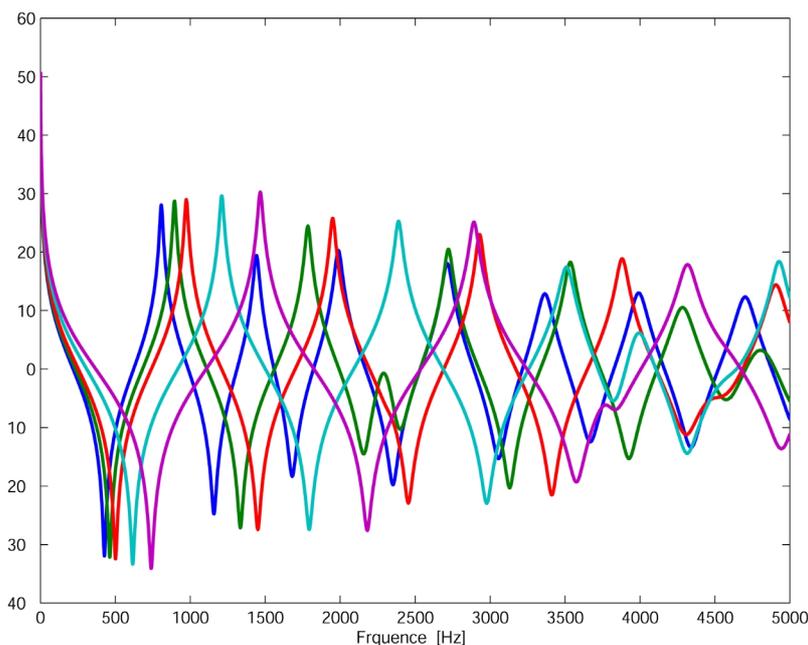


fig.21 : admittances d'entrée de la flûte d'Isturitz pour les différents doigtés obtenus en ouvrant successivement les quatre trous de la flûte. On remarque que la fréquence du premier mode tous trous ouverts (courbe mauve) coïncide avec la fréquence du second mode tous trous fermés (courbe bleue) ce qui indique une continuité de la tessiture entre premier et second régime que l'on trouve dans de très nombreuses flûtes.

Les systèmes excitateurs des bois

Introduction

Le résonateur de l'instrument est passif : les différentes pertes (pertes visco-thermiques, pertes par rayonnement etc...) induisent un amortissement rapide de l'onde acoustique. Par opposition à une corde de piano, la vibration libre dans un tube ne dure que quelques dizaines de périodes et ne permet pas, sauf dans certaines techniques de jeu utilisées notamment en musique contemporaine, de jouer l'instrument sans entretenir l'oscillation. On trouve deux systèmes d'excitation des bois : soit un jet d'air soit une anche (simple ou double).

A Les flûtes

1- Instabilité d'un jet

Il suffit d'observer la fumée monter d'une cigarette pour se convaincre qu'un jet d'air est naturellement instable. Après une dizaine de centimètres, le jet de fumée s'incurve, oscille puis finit par perdre sa structure ordonnée pour former un nuage. Pour observer cela, l'air ambiant doit être calme : un très léger mouvement à proximité perturbera fortement le phénomène tant le jet est sensible.

Dans une flûte, le jet est soufflé à proximité d'une extrémité ouverte du tuyau subit donc une vitesse acoustique forte qui va le perturber. La figure 1 montre l'effet d'une perturbation acoustique apportée par un haut-parleur à un jet plan de 1mm d'épaisseur et de 20mm de large, comparable à celui que l'on pourra trouver dans une flûte à bec. On constate tout d'abord que le mouvement du jet se synchronise avec la perturbation. Deux phénomènes apparaissent : d'une part la perturbation se propage sur le jet, d'autre part l'onde de perturbation s'amplifie à mesure qu'elle se propage. Ces deux aspects permettent d'interpréter bon nombre des comportements observés dans une flûte

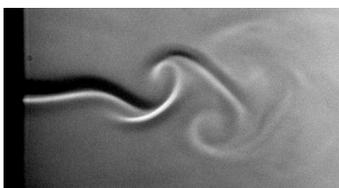


fig. 1 : mouvement oscillant d'un jet perturbé par un champ acoustique. Dans une flûte, le champ acoustique est généré par le résonateur. Dans l'expérience ci-dessus, le champ acoustique transversal au jet est généré par des haut-parleurs.

2- Source et auto-oscillation

Dans une flûte à bec, le jet parcourt une courte distance depuis la lumière (le point de formation du jet) et rencontre le biseau de l'instrument. Le mouvement oscillant du jet de part et d'autre du biseau crée une source acoustique qui permet l'entretien de l'oscillation : en effet, en soufflant alternativement de part et d'autre du biseau, le jet se comporte comme deux sources de débit acoustique en opposition de phase. Ces deux sources constituent donc un dipôle source dont l'effet est équivalent à une force ou une différence de pression acoustique appliquée à l'entrée du tuyau. En réponse à cette excitation, le tuyau impose une vitesse acoustique qui va à nouveau perturber le jet. On obtient ainsi un système bouclé qui permet de comprendre l'auto-oscillation.

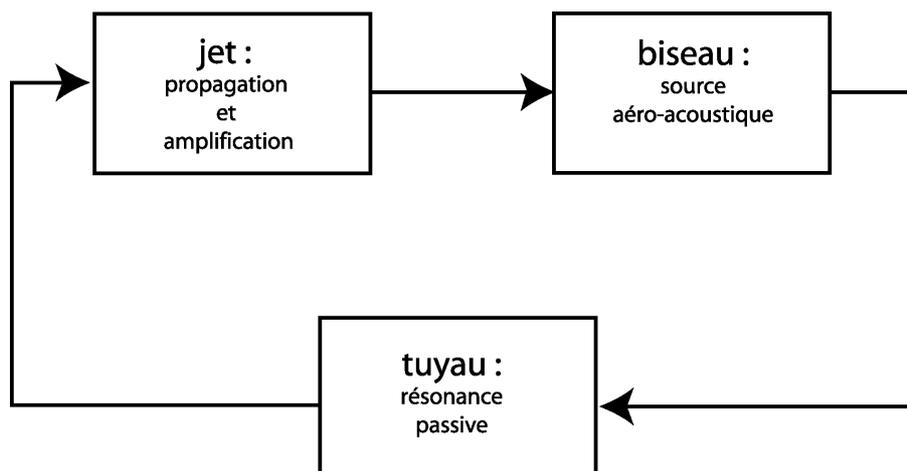


figure 2 : l'auto-oscillation dans les instruments à embouchure de flûte peut être modélisée par un système bouclé

Les visualisations de l'écoulement à l'embouchure d'une flûte à bec ont montré la présence de nombreux tourbillons. Ce sont des structures organisées qui sont connues en aéro-acoustique pour être des sources de son, comme par exemple dans le sifflement humain. A partir des informations recueillies sur les visualisations (instant d'apparition des tourbillons, durée et de vie etc...) nous avons évalué la puissance acoustique générée par les tourbillons les plus proches du biseau car ce sont ceux qui sont le mieux placés pour produire de la puissance acoustique. Il est apparu que la puissance est négative dans des conditions normales de jeu d'une flûte à bec. Les tourbillons en question constituent donc un mécanisme d'absorption du son. De par son côté fortement non-linéaire, ce mécanisme est celui qui limite l'amplitude de l'auto-oscillation dans la flûte à bec. Pour d'autres géométries de la bouche de l'instrument (jet « épais »), comme par exemple dans la flûte traversière dans certaines conditions de jeu, la source qui entretient l'oscillation acoustique dans le résonateur peut directement être ces tourbillons.

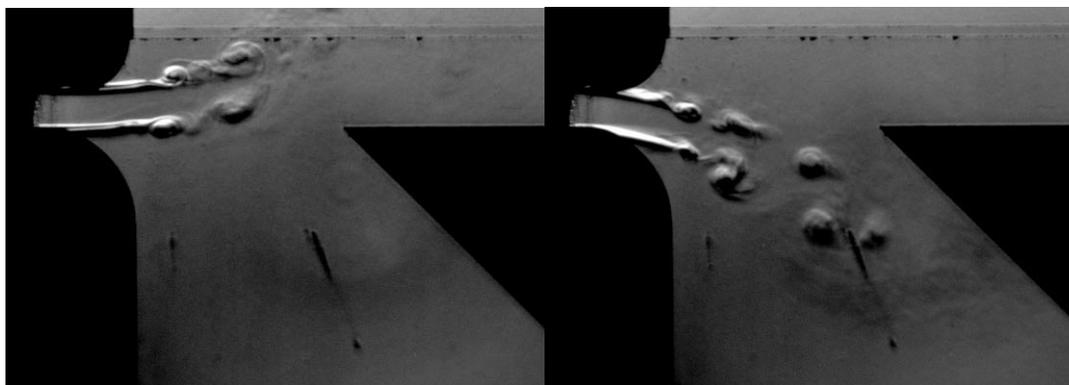


figure 3 : deux phases de l'oscillation du jet à l'embouchure d'une flûte traversière

En revenant à la description de l'auto-oscillation au moyen d'un système bouclé, on peut analyser la fréquence de jeu obtenue sur une flûte. La fréquence d'oscillation est voisine d'une fréquence de résonance du tuyau car c'est seulement autour de ces fréquences que le tuyau peut accumuler suffisamment d'énergie pour permettre l'auto-oscillation. On peut prévoir la fréquence de jeu en considérant qu'en régime stabilisé, le déphasage total sur la boucle doit être un multiple entier de 2π : en soufflant doucement dans une flûte à bec, le retard lié à la propagation sur le jet est voisin d'une demi période de la fréquence de la première résonance du tuyau. Le déphasage lié à la réponse acoustique du tuyau correspond alors au complément modulo 2π , soit une demi période aussi. En soufflant plus fort dans l'instrument, la vitesse du jet augmente et la propagation des ondes de perturbation sur le jet est plus rapide. Le déphasage lié à cette propagation diminue et celui qui provient de la réponse du tuyau doit donc augmenter : c'est pourquoi la fréquence de jeu augmente légèrement. En soufflant encore plus fort, le retard lié à la propagation sur le jet devient trop petit par

rapport à la période de la première résonance du tuyau et l'instrument passe sur le second régime, pour lequel le même retard constitue un déphasage plus important. C'est donc en contrôlant, via la pression de son souffle, la vitesse de propagation des ondes de perturbation sur le jet que l'instrumentiste peut sélectionner, pour un doigté donné, le régime sur lequel l'instrument oscille.

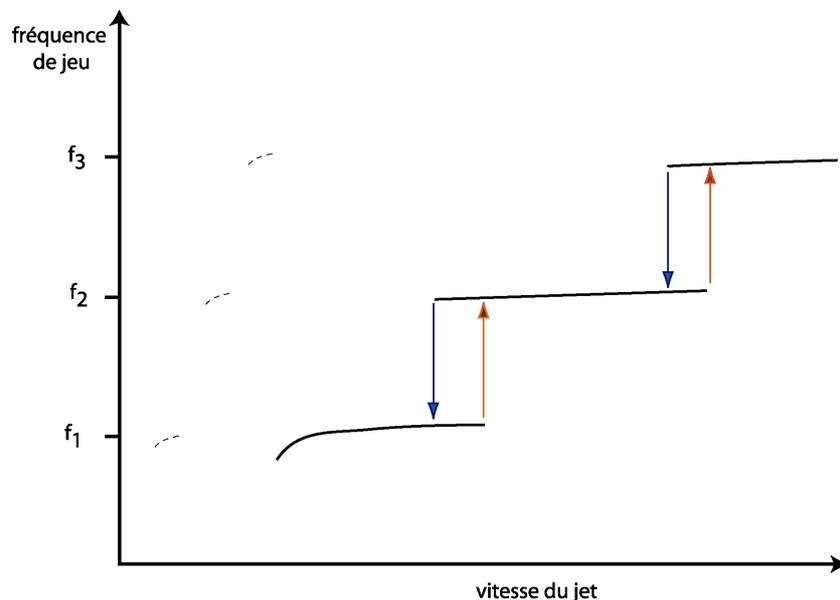


figure 4 : fréquence de jeu en fonction de la vitesse de jet. Les changements de régime d'oscillation ne s'effectuent pas pour la même valeur de la vitesse de jet selon que cette dernière augmente (flèches rouges) ou diminue (flèches bleues) : il apparaît un hystérésis.

En soufflant très doucement, pour des pressions de jeu nettement inférieures à celles d'un jeu traditionnel, l'instrumentiste peut produire des sons de faible amplitude, à des fréquences voisines d'une des résonance du tuyau. Dans ce mode de jeu, le retard induit par la propagation sur le jet devient voisin d'une période et demi alors qu'il est voisin d'une demi période en mode de jeu traditionnel. Ce mode de jeu est baptisé « whistle-tone » ou « son éolien » dans le vocabulaire des flûtistes (flûte traversière) et correspond au « pialement » émis par un orgue en gardant une touche enfoncée au clavier alors que le ventilateur d'alimentation des soufflets est coupé, laissant la pression dans les soufflets chuter progressivement. Ce mode de jeu n'apparaît généralement pas avec les flûtes à bec car ces dernières ont une distance lumière-biseau trop courte. Enfin, notons que ces modes d'oscillation peuvent apparaître fugitivement durant le transitoire d'attaque sur certains tuyaux d'orgue ou certaines flûtes, avant que le jet n'ait atteint sa vitesse stationnaire en mode de jeu traditionnel.

3- Turbulence

Le jet induit aussi un autre type de source : la turbulence qui correspond au mouvement chaotique qui disperse la structure du jet et que l'on observe sous forme d'un nuage sur les visualisations d'écoulement figure 1 et 3 génère un bruit large bande, comme un souffle. Ce bruit, filtré par les résonances passives du tuyau, accompagne le son périodique lié à l'auto-oscillation décrite ci-dessus. On peut le remarquer sur les spectres figure 11 du chapitre précédent. Les travaux de synthèse sonore par modèle physique ont confirmé l'importance perceptive de cette composante du son de la flûte à bec. Ce bruit est fortement lié à l'identité perceptive des instruments à embouchure de flûte. Des mesures [2] ont montré que ce bruit augmente avec une intensité proportionnelle à la sixième puissance de la vitesse du jet.

Dans les flûtes utilisées en plein air (musiques traditionnelles), la puissance sonore de l'instrument est primordiale. Ce sont généralement des flûtes qui nécessitent de la part du musicien un important débit d'air. Pour cette raison, le jet devient turbulent avant d'atteindre le biseau comme on l'observe sur la figure 5.

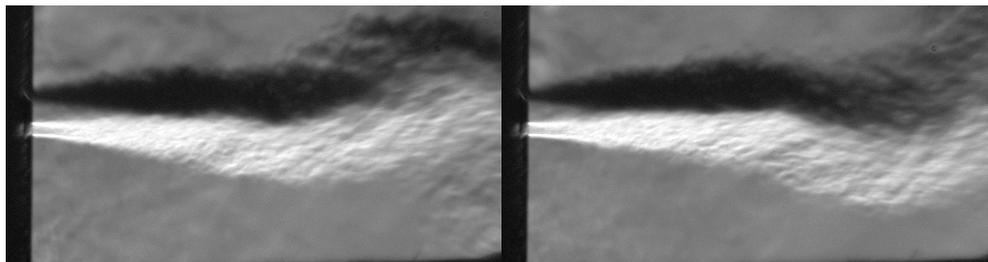


figure 5 :deux phases de l'oscillation d'un jet turbulent perturbé par un champ acoustique transversal

4- Synthèse

En rassemblant les divers éléments décrits ci-dessus, tuyau résonateur, jet instable, différentes sources aéro-acoustiques dans un programme informatique qui calcule pas à pas l'évolution temporelle des différentes grandeurs physiques dans l'instrument, on peut obtenir un son de synthèse.

Cette technique de synthèse par modèle physique permet d'une part d'obtenir un son synthétique très réaliste et, d'autre part, de piloter le synthétiseur par des paramètres comme la pression de jeu qui sont ceux utilisés par un instrumentiste réel. L'exemple ci-dessus a été réalisé par le logiciel Tassman qui utilise la description physique des divers éléments présentée ci-dessus (www.applied-acoustics.com).

5- Qui fait quoi : facteur ou instrumentiste ?

Deux personnes coopèrent pour produire un son de flûte : le facteur d'instrument et l'instrumentiste. Selon le type de flûte considéré, la ligne de partage entre les deux se déplace. Dans l'orgue, l'instrumentiste ne détermine que les instants d'attaque et d'extinction du son. De plus, il peut éventuellement modifier très légèrement l'établissement du son en jouant sur une ouverture « contrôlée » de la soupape dans le cas des orgues à traction mécanique. L'intensité, la sonorité, la hauteur du son sont exclusivement l'œuvre du facteur. A l'opposé, dans une flûte traversière, l'instrumentiste contrôle de nombreux paramètres comme la pression d'alimentation, y compris sa forme temporelle globale qui détermine la forme temporelle du son ; d'éventuelles résonances acoustiques dans sa bouche ; la forme de l'ouverture entre les lèvres qui conditionne les caractéristiques du jet ; la position des lèvres et du jet par rapport au trou d'embouchure et au biseau etc.... On comprend facilement pourquoi il est plus facile au non initié d'obtenir un son correct avec une flûte à bec qu'avec une flûte traversière ! Le facteur de flûte traversière quant à lui est responsable de la justesse relative des différents registres de la flûte en jouant sur la forme « conique » de l'embouchure, ainsi que de la facilité d'émission et de certains aspects de la sonorité dans les différents registres en jouant sur la géométrie du trou d'embouchure et du biseau. Cependant, les expériences effectuées avec différentes flûtes de qualité correcte et différents flûtistes montrent que le flûtiste peut corriger les différents aspects du son (justesse, sonorité etc...) de manière à produire quasiment le même son sur différents instruments : un auditeur différenciera aisément deux flûtistes indépendamment de l'instrument joué alors qu'il ne saura pas reconnaître deux instruments joués par le même flûtiste !

B La clarinette

Dans les instruments à anche, l'auto-oscillation se traduit par la mise en mouvement mécanique de l'anche. L'anche vibrante se comporte comme une valve qui laisse entrer dans l'instrument plus ou moins d'air soufflé par l'instrumentiste selon son degré d'ouverture.

On distingue les modes de fonctionnement selon que le mouvement de l'anche va ou non jusqu'à obturer totalement le bec de l'instrument : ainsi, la clarinette jouée très doucement laisse toujours une petite ouverture entre l'anche et la table du bec alors que lorsqu'elle est jouée fort, l'anche vient s'enrouler sur la table et fermer totalement l'embouchure.

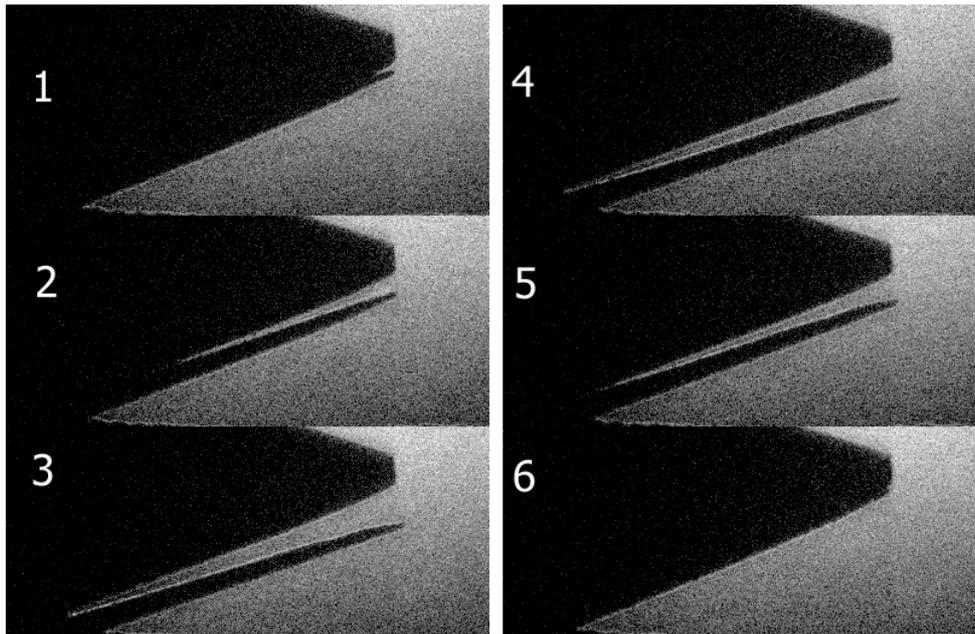


fig. 6 : mouvement de l'anche sur le bec de la clarinette en jeu. Les six images présentent le détail de la période d'ouverture de l'anche.

1- mouvement de l'anche et débit entrant

En première approximation, on peut se représenter l'anche comme une valve dont la fermeture dépend de la différence entre les pression sur les deux faces de l'anche : la pression p_m dans la bouche de l'instrumentiste qui tend à fermer l'ouverture de l'anche et la pression p_{in} à l'intérieur de l'instrument qui tend à augmenter l'ouverture de l'anche. Dans une description élémentaire, la position de l'anche est proportionnelle à la différence entre les deux pression ci dessus.

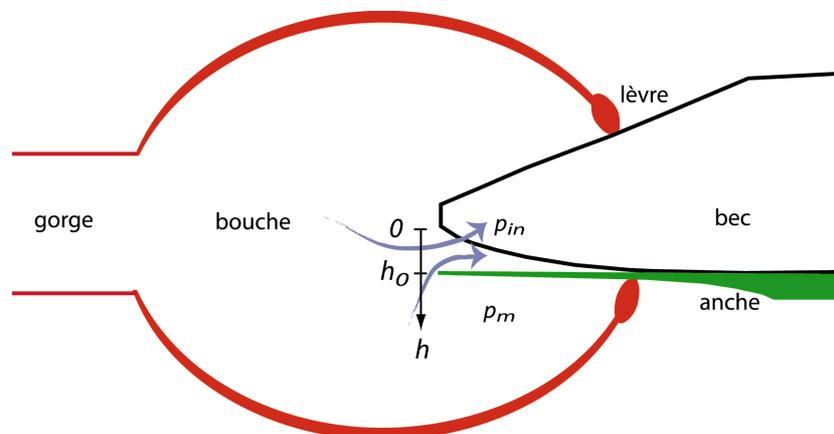


figure 7 : géométrie du bec de la clarinette

$$h = h_0 + S (p_{in} - p_m) / K$$

où K est une raideur équivalente à l'anche et S sa surface.

La pression buccale de l'instrumentiste génère un flux d'air qui traverse l'ouverture de l'anche et entre dans le bec. Si on se réfère à l'équation de Bernoulli, le flux d'air entrant est proportionnel à la racine carrée de la différence de pression entre bouche et bec et à la surface d'ouverture de l'anche :

$$Q = hW (2(p_m - p_{in}) / \rho_0)^{1/2}$$

ou W est la largeur de l'ouverture de l'anche et ρ_0 la densité du fluide.

On obtient alors un flux entrant qui est uniquement fonction de la différence de pression entre bouche et bec, représenté figure 8.

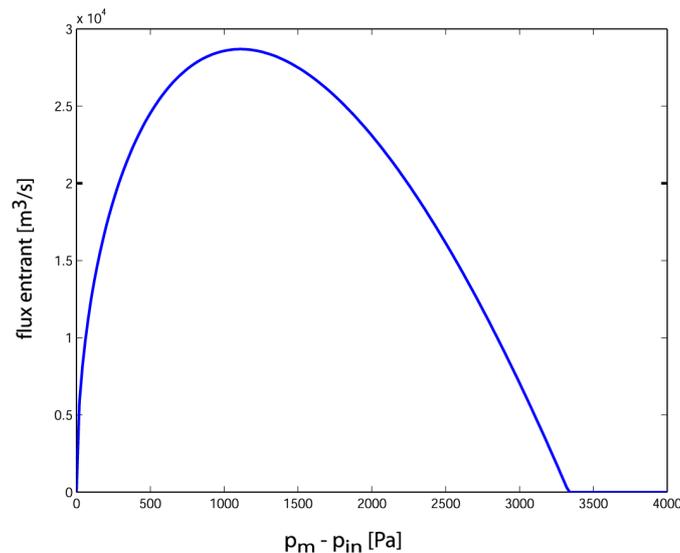


figure 8 : flux entrant dans le bec de la clarinette en fonction de la différence de pression entre bouche et bec pour des valeurs numériques standard ($S=1,5 \text{ cm}^2$, $h_0=1\text{mm}$, $K=500\text{N/m}$, $W=1\text{cm}$)

Dans ce modèle élémentaire, l'instrumentiste contrôle déjà les principaux paramètres que sont l'ouverture au repos h_0 par le biais de la pression statique exercée par la lèvre inférieure sur l'anche, la pression buccale p_m , ainsi que la raideur équivalente de l'anche contrôlée par la position de la lèvre inférieure.

Ce modèle de source associé à un résonateur caractérisé par son impédance acoustique d'entrée permet de prévoir un fonctionnement auto-oscillant dans lequel l'anche se met en mouvement, comme présenté figure 6.

2- Démarrage de l'auto-oscillation sur un mode

L'énergie acoustique apportée en moyenne sur une période à l'instrument par le flux d'air entrant peut se calculer par :

$$W = 1/T \int_T Q p_{in} dt$$

La partie à pente négative de la courbe de la figure 8 correspond donc à une énergie apportée au système. Dans cette zone de la caractéristique à pente négative, on peut décrire une auto-oscillation de l'anche de la clarinette pour des petites amplitudes de mouvement.

3- un modèle plus détaillé ?

Le modèle développé ci-dessus, s'il permet de comprendre le fonctionnement auto-oscillant de l'anche sur une clarinette, n'en reste pas moins très élémentaire dans le sens où il ne permet d'interpréter les détails de facture instrumentale, notamment du bec. Nous allons présenter les différents qui doivent être pris en compte afin d'obtenir une description plus réaliste.

a- la mécanique de l'anche

Dans le modèle élémentaire ci-dessus, l'anche a été assimilée à un simple ressort de raideur constante. Or l'anche constitue à elle seule un système mécanique vibrant qui présente ses propres modes de vibration et fréquences associées. L'approximation par une simple raideur n'est sensée que pour des fréquences très inférieures à celle de la première résonance de l'anche, et ne permet donc

une approche réaliste que à basse fréquence. Le "canard" familier du clarinettiste débutant correspond à un fonctionnement pour lequel la dynamique de l'anche ne se laisse plus entièrement dominer par le fonctionnement imposé par le résonateur acoustique. De plus, l'instrumentiste contraint l'anche avec sa lèvre inférieure, modifiant ainsi le comportement mécanique de l'anche.

b- le "débit" d'anche

Il correspond à un terme équivalent à un débit acoustique qu'il convient d'ajouter dans l'équation au §B1 donnant le débit entrant ci-dessus afin de prendre en compte la variation du volume interne du bec liée au mouvement de l'anche. Ce terme est fonction de la vitesse de l'anche et non pas de sa position comme le terme de Bernoulli. Ce "débit d'anche" est donc en quadrature avec le débit entrant détaillé plus haut. Si on se reporte à l'expression de l'énergie acoustique produite rappelée ci-dessus, il apparaît que le débit d'anche, de par cette quadrature de phase avec la pression dans le bec, ne participe pas à la production de l'énergie acoustique. Dans une approche linéarisée, le débit d'anche correspond donc à une partie imaginaire de l'impédance équivalente au bec. Sa contribution affecte donc la fréquence de jeu, ce que l'on peut représenter de manière équivalente par une correction de longueur de l'instrument. Les mesures effectuées par Dalmont & al [3], en utilisant une bouche artificielle pour jouer l'instrument de manière reproductible et contrôlée confirment cet effet et permettent de quantifier les corrections de longueur (5 à 15 mm) sur des instruments réels.

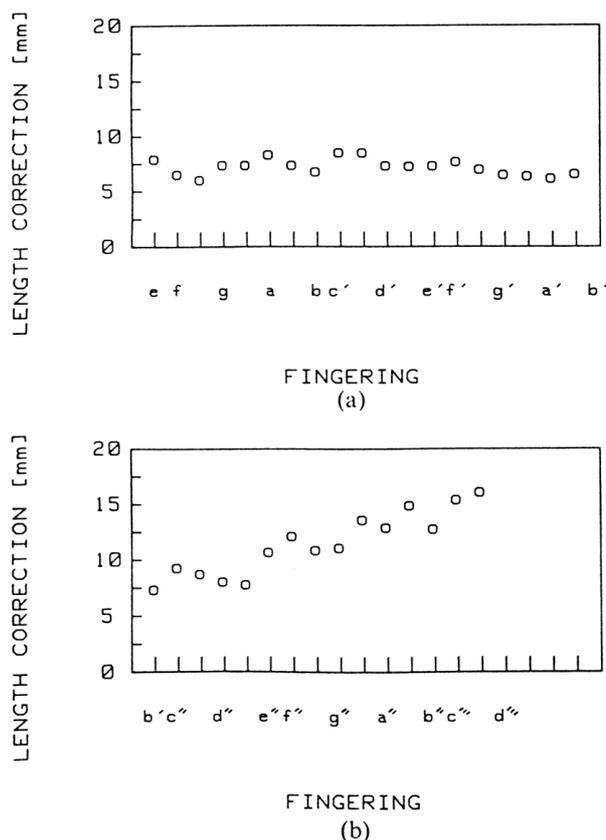


figure 9 : Corrections de longueur liée au débit d'anche.

(a) jeu sur le premier registre de l'instrument (b) second registre. D'après [Dalmont & al (3)]

Cette correction de longueur semble être le principal facteur responsable de l'écart de fréquence entre les résonances passives mesurées sur l'instrument et les fréquences observées en jeu.

c- L'ouverture de l'anche

L'ouverture de l'anche par laquelle le flux venant de la bouche de l'instrumentiste entre dans le bec est, dans la géométrie réelle d'un bec de clarinette, plus complexe que celle présentée dans le modèle élémentaire ci-dessus. En effet, l'air peut pénétrer dans le bec non seulement par l'ouverture de face, mais aussi par les côtés. Par ailleurs, la courbure du bec rend l'anche de plus en plus courte et raide à mesure qu'elle épouse la courbure de la table du bec. On comprend aisément pourquoi les facteurs recommandent d'utiliser des anches d'autant plus faibles que la courbure de la table est prononcée (1 à 1,5mm).

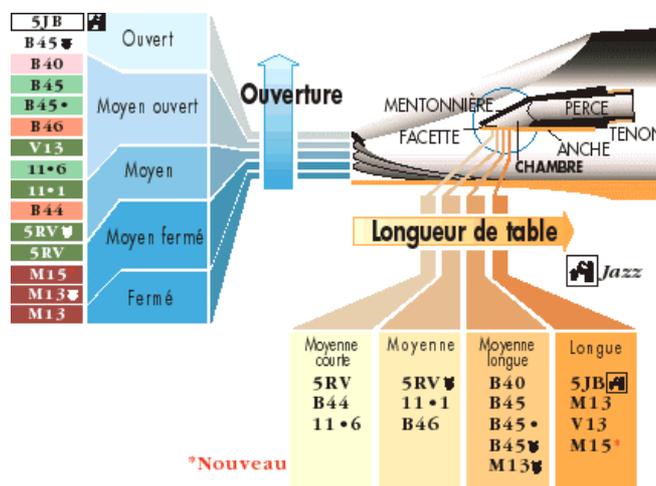


figure 10 : les différents becs de la gamme se différencient par leurs ouvertures et longueurs de table. Le facteur recommande l'utilisation d'anches d'autant plus "fortes" (raides) que l'ouverture du bec est importante. Document VanDoren.

Une première manière de rendre compte des variations des caractéristiques de l'anche en fonction de son enroulement sur le bec serait de considérer une raideur non-linéaire.

Enfin, l'instrumentiste contrôle l'ouverture ou l'enroulement initial de l'anche par le biais de la force statique qu'il exerce avec sa lèvre inférieure sur l'anche.

d- acoustique et écoulement

La description détaillée de la clarinette doit aussi reposer sur une modélisation plus précise de l'écoulement de l'air. Plusieurs phénomènes sont à considérer.

- les amplitudes d'oscillation acoustique dans le résonateur sont tellement fortes que les vitesses observées à l'extrémité passive (1^{er} trou ouvert) induisent une séparation de l'écoulement de la paroi. Ceci se traduit par la formation de tourbillons qui interagissent avec le champ acoustique [4,5]. De plus, la présence d'un écoulement moyen dans le tube de la clarinette (l'air soufflé par l'instrumentiste parcourt le corps de l'instrument) complique aussi le problème. Ces deux éléments (séparation de l'écoulement et présence d'un écoulement moyen) pourraient permettre d'interpréter l'expérience initialement proposée par Benade et reprise par Keefe dans laquelle deux résonateurs avec des réponses acoustiques identiques sont réalisés : l'un possède des parois fines et par conséquent des cheminées très basses alors que l'autre possède des parois traditionnelles de clarinette avec la hauteur de cheminée correspondante. Contrairement au second, le premier instrument ne produit pas de son !
- le modèle simplifié présenté plus haut ne prend pas en compte le détail de l'écoulement dans l'ouverture de l'anche : en effet, on observe une séparation de l'écoulement qui forme un jet entrant dans le bec, qui affecte l'expression du débit entrant présentée plus haut. Selon les conditions de jeu et selon la géométrie du bec, le jet formé se ré-attachera à la paroi ou non.

En conclusion, seule une étude détaillée du comportement de l'anche et de l'écoulement en conditions de jeu permettront de comprendre l'influence des détails de la géométrie du bec sur le son produit ainsi que les modifications du geste instrumental que l'instrumentiste devra effectuer selon les types de bec et d'anche.

Bibliographie :

- 1- M. Dauvois, B. Fabre : Les instruments à vent paléolithiques, in "Colloque acoustique et instruments anciens : factures, musiques et science" 17-18 nov 1998. Edité par SFA / Cité de la musique.
- 2- M-P. Verge : Aeroacoustics of confined jets, with application to the physical modeling of recorder-like instruments. Thèse de l'Université Technique Eindhoven, Pays-Bas, 1995.
- 3- J.P. Dalmont, B. Gazengel, J. Gilbert & J. Kergomard : "Some aspects of tuning and clean intonation in reed instruments", Applied Acoustics 46 (1995) pp 19-60
- 4- A. Hirschberg, J. Gilbert, A.P.J. Wijnands & A.J.M. Houtsma : "Non-linear behaviour of single-reed woodwind musical instruments", NAG journal 170, maart 1991.
- 5- A. Hirschberg : aero-acoustics of wind instruments, in "Mechanics of musical instruments", CISM courses and lectures, Springer-Verlag 1995.