

Placement des trous sur les instruments à vent

Éric Würbel

17 janvier 2005

1 Introduction

L'idée de ce petit topo est de vous exposer quelques principes de base concernant le placement et la taille des trous sur un instrument à vent. Comme vous le constaterez, je mélange allègrement pratique et théorie, et ce pour plusieurs raisons :

- je ne connais pas grand chose à la mécanique des fluides et la mécanique ondulatoire, qui sont les domaines de la physique décrivant respectivement les écoulements d'air et la propagation des ondes, et donc régissent le comportement des instruments à vent ;
- mes connaissances théoriques se bornent à un ensemble de formules mathématiques récupérées sur le net [1, 6], quoi que je commence maintenant à mieux les appréhender notamment grâce à la lectures d'écrits de Arthur H. Benade [1], en particulier les notes d'un cours qu'il a donné en 1977 à l'université de Cleveland [3]. Une autre source utile, et très bien vulgarisée, sur la physique des instruments à vent, est le livre de Bart Hopkin [7] ;
- par contre la mise en pratique de ces formules m'a permis de comprendre pas mal de choses.

Bref, n'attendez pas de miracles, ceci n'est pas une bible. L'objectif de ce document est double : personnellement il m'a permis de faire une synthèse de différents renseignements glanés dans diverses lectures. Pour les lecteurs autres que moi même, j'espère qu'il vous apportera quelques éclaircissements sur les phénomènes de base qui gouvernent le placement des trous. J'insiste sur le fait que ce petit article n'est pas une recette magique permettant de fabriquer à la chaîne des instruments à vent. Par contre, en se servant de ce qui est dit ici, *on peut* fabriquer des instruments à vent. Notez bien la nuance.

La physique des instruments à vent est quelque chose de très complexe, et j'élude pas mal de choses ici. En fait pour être tout à fait honête, je me rends

compte en relisant le premier jet, et alors que depuis j'ai lu d'autres écrits sur le sujet, que ce texte regorge d'hypothèses simplificatrices. Quoi qu'il en soit, quand l'objectif final est la conception et la fabrication d'instruments, on ne peut pas raisonner uniquement d'un point de vue mathématique, et il arrive forcément un moment où il faut sortir le pifomètre et se laisser guider par l'instinct, le bon sens et l'oreille. Et c'est tant mieux. Fort heureusement, la part artisanale reste prééminente. Comme je l'ai lu dans un fil de discussion sur le forum de lutherie amateur (<http://www.forum-lutherie.org>) — et j'abonde dans ce sens — à l'ère de l'informatique et de l'internet, trop de gens pensent qu'il suffit de dégainer l'ordinateur, ou la calculette, et d'aligner quelques formules pour avoir à la sortie un modèle d'instrument (quel qu'il soit) prêt à l'emploi. Il est bon rappeler que c'est faux, et que même si les modèles théoriques sont de plus en plus affinés, ce gain de précision ne servira jamais à produire quelque chose de parfait. Il servira à mieux comprendre ce qui se passe, les défauts des instruments. Ce gain permettra aussi d'améliorer les instruments¹, mais in fine, la faculté de fabriquer des instruments qui sonnent bien reviendra toujours à l'artisan. Encore une fois, c'est tant mieux.

Dans ce document, j'essaie d'employer les termes exacts. Il y a un lexique ici 5. De plus, histoire qu'on soit bien d'accord, voici quelques expressions employées tout au long :

- Le haut de l'instrument désigne la partie la plus proche du bec ou de l'embouchure. A contrario, le bas de l'instrument désigne la partie la plus proche du pavillon. Donc quand je parle de "trou du haut" ou des trous situés "en haut" de l'instrument il s'agit des trous situés près de l'embouchure ; inversement, quand je parle de trous du bas, il ne s'agit nullement d'une obscénité quelconque, mais bien des trous situés près du pavillon de l'instrument.

¹Les travaux d'Arthur H. Benade, acousticien état-unien, ont permis en l'espace d'une quinzaine d'années de faire un bond de géant dans la compréhension du fonctionnement de la clarinette. Les modèles physiques qu'il a développés lui ont permis de proposer des solutions visant à améliorer certaines carences de l'instrument. Il a même proposé un prototype d'une clarinette entièrement nouvelle — la clarinette NX [4] — quoi que reprenant ergonomiquement les traits de l'actuelle pour ne pas perturber les instrumentistes. Le prototype semblait prometteur. Malheureusement aucun fabriquant ne semble s'y être intéressé.

2 Préambule, rappels et autres fariboles

2.1 Types de résonateurs

En premier lieu ce qu'il faut bien comprendre, c'est que — du point de vue de la physique — on distingue deux grande famille d'instruments à vent² :

1. Les résonateurs ouverts eux deux extrémités (typiquement les flûtes) ;
2. Les résonateurs fermés à une extrémité (typiquement tous les instruments à anche, simple ou double, et les trompettes et les flûtes de pan). Il faudra plus tard distinguer entre ceux qui ont une perce cônica (sax, hautbois) et ceux qui ont une perce cylindrique (clarinettes, trompettes), mais pour l'instant qu'importe.

Comment fonctionne un résonateur ? Pour les résonateurs du deuxième type (fermés à une extrémité) et cylindriques je vous renvoie à la lecture de l'excellent bouquin l'Ernest Ferron [5]. Il en a publié un autre sur le saxophone — que je ne connais pas mais dont j'ai entendu beaucoup de bien — dans lequel vous devriez trouver tout ce qu'il faut sur les résonateurs fermés à une extrémité et de perce cônica. De bonnes explications se trouvent aussi dans [7, 3].

2.2 Fréquence

En toute logique, et en théorie, un tuyau de longueur l produit une fréquence $F = \frac{c}{k \cdot l}$ où c est la vitesse du son (en cm/s) et k est une constante dépendant du type de résonateur : On a $k = 2$ pour les résonateurs ouverts aux deux extrémités et les résonateurs fermés à une extrémité et de perce cônica et $k = 4$ pour les résonateurs fermés à une extrémité et de perce cylindrique. Intuitivement, plus un tuyau est *long*, plus la fréquence (en Hz) est *petite*, donc plus le son est *grave*.

2.3 Les premiers ennuis arrivent

Ne le prenez pas mal, mais la formule présentée plus haut est fausse. Plus exactement, elle est théoriquement vraie, mais on travaille rarement avec des tubes théoriques (mon quincailler n'en vend pas en tout cas). Voici en vrac quelques ennuis apportés par la contingence matérielle (ô monde cruel) :

- la surface interne d'un tube n'est pas parfaite. Le comportement des ondes sonores, et notamment leur propagation, sur cette surface ne

²Je laisse de côté dans ce document tous les instruments de type « flûtes globulaires » (les occarinas par exemple), qui fonctionnent selon des principes très différents.

sera donc pas parfait. Ce phénomène est connu sous le nom de « couche limite » ;

- La viscosité de l'air engendre des pertes tendant à abaisser le son ;
- De même il se produit des pertes thermiques ;
- un tuyau n'est pas parfaitement coupé. Tout se passe comme si le tuyau se prolongeait un petit peu après sa fin ;
- Enfin les trous ! Le but d'un trou est d'interrompre prématurément le tuyau. Quand on débouche un trou, on augmente la fréquence (le son devient plus aigu) puisque le tuyau se raccourcit. Le problème est que si on place un trou à une distance d de l'embouchure (avec $d < l$ évidemment), on obtient pas un effet équivalent à un tuyau de longueur d .

Nous allons parler de tous ces soucis dans les sections suivantes.

3 Des ennuis à la pelle

3.1 Des tuyaux pas nets

Comme nous l'avons dit plus haut, les tuyaux (tout simples, sans trous sans rien) ne sont pas parfaits. Tout se passe comme si ils se prolongeaient légèrement au delà de leur extrémité (argl).

Leur longueur pratique peut s'estimer par :

$$L = l + \left(0.6133 \times \frac{d_i}{2} \right)$$

Où L représente la longueur réelle, l la longueur mesurée, et d_i le diamètre intérieur du tuyau, c'est à dire le diamètre intérieur de la perce. Ne me demandez pas d'où sort le 0.6133, je n'en sais rien. En fait, les écrits de A. H. Benade, acousticien qui a apporté beaucoup à la connaissance théorique du fonctionnement des instruments à vent, donnent une valeur de 0.6 [3]. J'ignore pourquoi la feuille de calcul de P. Hoekje [6] d'où j'ai pris cette valeur utilise 0.6133. Elle fonctionne, mais tout porte à croire que 0.6 fonctionne aussi.

Attention toutefois : les calculs de correction qui suivront se font en partant de l et non de L . Cette correction d'imperfection du tube s'applique à la fin de la conception de l'instrument seulement. Mais ne vous affolez pas, après l'exposé aride viendra la procédure d'emploi de toutes ces formules.

3.2 Un trou ouvert c'est vraiment ch.....

Le but d'un trou est d'interrompre prématurément le tuyau. Le problème est qu'un trou percé à une distance l de l'embouchure n'est pas équivalent à un

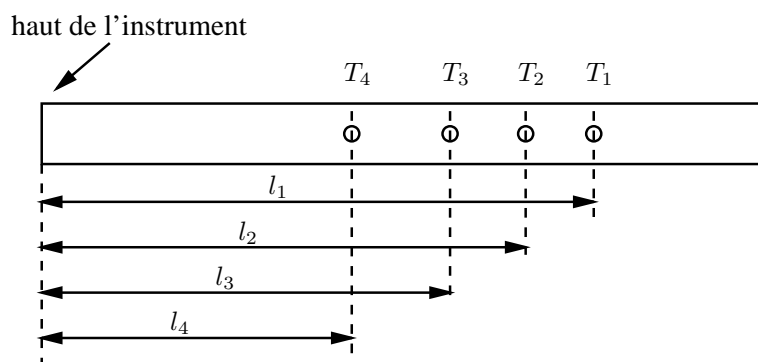


FIG. 1 – Exemple de tuyau équipé de trous

tuyau de longueur l . Essayez et vous constaterez de vous même. L'expérience se fait très bien avec des tuyaux en PVC, elle est très convaincante et elle annonce le début de la fortune de votre quincaillerie locale.

En fait, quand on perce un trou, tout se passe comme si le tuyau se prolongeait au delà du trou sur une certaine distance. Donc la note obtenue est plus grave que ce qu'on est en droit d'attendre (un coupable, vite!). Evidemment, plus le trou est grand, moins le phénomène est perceptible. Mais vous aurez beau aggrandir le trou, le problème demeurera, à moins que le trou soit du même diamètre que le tuyau (là on va voir ceux qui suivent!). Enfin, l'épaisseur du tuyau (et donc du trou percé dedans) joue aussi un rôle dans le phénomène abaissant, comme nous le verrons plus loin.

3.3 Plusieurs trous ouverts tu meurs

La mécanique ondulatoire étant décidément perverse, si en dessous du trou ouvert (c'est à dire en allant vers le bas) il y a d'autres trous ouverts, les effets abaissants se conjugent... Considérez le schéma de la figure 1. Quand on ouvre le trou T_1 , il « bénéficie » de l'effet abaissant décrit plus haut, donc il va falloir le remonter vers l'embouchure. De ce fait, il va avoir encore plus d'influence sur le trou T_2 . Donc il va falloir tenir compte de sa nouvelle position pour corriger le trou T_2 .

Rentrons un peu plus dans les détails. Pour cela, considérons un tuyau cylindrique (nous verrons ensuite pour les cônes, c'est bien assez compliqué comme ça) de la figure 1, percé de 4 trous T_1 , T_2 , T_3 et T_4 . Ces trous sont tels que T_1 est le trou situé le plus près du pavillon, et T_4 est celui situé le plus près de l'embouchure. On note :

- l_1 la distance allant de l'embouchure au trou T_1 , l_2 la distance allant de

- l'embouchure au trou T_2 , etc.
- d_1^t le diamètre du trou T_1 , d_2^t le diamètre du trou T_2 , etc.
- d_1^p le diamètre de la perce en regard du trou T_1 , d_2^p le diamètre de la perce en regard du trou T_2 , etc.
- e_1 l'épaisseur du trou T_1 , e_2 l'épaisseur du trou T_2 , etc.
- l la longueur totale de la perce.

L'ouverture de T_1 n'est pas parfaite, i.e. T_1 ne « ventile » pas parfaitement le tuyau, et on corrige donc sa position en retranchant à la distance l_1 la valeur de correction C_s :

$$\begin{aligned}
 ea &= e_1 + \frac{3}{4}d_1^t, \\
 r &= \left(\frac{d_1^t}{d_1^p} \right)^2, \\
 s &= \frac{1}{l - l_1}, \\
 C_s &= \frac{ea}{r + (ea \times s)}.
 \end{aligned}$$

ou de façon plus concise

$$C_s = \frac{\left(e_1 + \frac{3}{4}d_1^t \right)}{\left(\frac{\left(\frac{d_1^t}{d_1^p} \right)^2 + \left(e_1 + \frac{3}{4}d_1^t \right)}{(l - l_1)} \right)}$$

J'ai décomposé le calcul en plusieurs étapes pour pouvoir expliquer un peu mieux les différents termes du calcul.

ea représente l'*épaisseur acoustique* du trou, autrement dit son épaisseur réelle. Comme on le voit, plus le diamètre du trou est grand, plus il apparaît plus épais que ce qu'il est en réalité. Cela est dû au fait que plus le trou est grand plus il contient un grand "volume mort" d'air. Vu le rôle que tient ea dans la formule finale, on peut dire que plus ea est grand, donc plus le trou est épais et large, plus la correction est importante, surtout si on est proche du pavillon (à cause du terme $l - l_1$, c'est à dire l'inverse de s).

Le rapport r va conditionner pour partie la correction de la façon suivante : plus le trou est petit par rapport au diamètre de la perce, plus la correction sera importante (normal, puisqu'à l'inverse, plus le diamètre du trou se rapproche de celui de la perce, plus on se rapproche du cas idéal du tuyau coupé en regard du trou...).

Reste maintenant à corriger la position des trous T_2 , T_3 et T_4 du fait de l'imperfection de leur ouverture. La correction à appliquer se calcule de

façon identique. Par contre, il faudra l'appliquer "en remontant", c'est à dire en commençant par T_2 , puis T_3 , et en terminant par T_4 , à cause de ce qui a été dit plus haut sur les trous du dessous qui influencent les trous du dessus. La correction se décrit donc en considérant un trou T_i , i valant ici 2, 3 ou 4, et T_{i-1} représentant le trou situé en dessous T_i . La correction C_o se calcule alors par :

$$\begin{aligned} esp &= l_{i-1} - l_i \\ r &= \left(\frac{d_i^p}{d_i^t} \right)^2 \\ C_o &= \frac{esp}{2} \times \left[\sqrt{1 + 4 \times \frac{ea}{esp} \times r} - 1 \right] \end{aligned}$$

Où esp représente donc l'espacement entre le trou T_i et celui situé immédiatement en dessous, c'est à dire T_{i-1} .

Vous comprenez maintenant pourquoi vous avez jeté des kilomètres de tube PVC à la poubelle sans avoir jamais réussi à avoir un instrument juste ? oui ? ben c'est pas fini...

3.4 Les trous fermés c'est pas mieux...

Quand un trou est fermé on s'attend à ce que la portion de tube fermée soit identique à un tube sans trou. Que nenni... Là encore c'est la notion d'épaisseur acoustique qui va jouer : Plus cette épaisseur acoustique est importante, plus le trou va avoir tendance à « abaisser » le son (les trous épais « mangent » le son [5]). Si on reprend l'exemple donné plus haut, chaque trou devra être corrigé (la encore « en remontant » le long de l'instrument) d'une quantité C_c donnée par :

$$C_c = \frac{1}{4} \times e_i \times \left(\frac{d_i^t}{d_i^p} \right)^2$$

Il faut noter que cette correction est très empirique. Les travaux de A. H. Benade [3, 2] fournissent des formules infernales à base d'équations différentielles et autres horreurs du genre. Je ne les ai pas encore suffisamment comprises pour en tirer une utilité pratique.

3.5 Et l'embouchure dans tout ça ?

Eh oui, vous oubliez l'embouchure (ou bec, ou trou de souffle pour les flûtes) ! Pour moi ça a été une découverte récente. Avant de découvrir ça

j'avais constaté que les instruments que je construisais avec les formules précédentes (et avec les précautions décrites dans les sections suivantes, c'est à dire en tenant compte de ce qu'on appelle la fréquence de coupure) divergeaient légèrement par rapport aux positions calculées. J'attribuais ces différences au fait que j'utilise essentiellement du roseau ou du bambou, qui sont des matériaux assez irréguliers. En fait, à la lecture de l'ouvrage de B. Hopkin [7], je me suis rendu compte que cela provenait de ce qu'on appelle « l'effet embouchure ». En effet, l'embouchure elle même modifie la longueur du tube [3, 7]. Pour les instruments à anche, ceci est du en grande partie à deux phénomènes :

1. L'embouchure modifie la forme de la perce (ce n'est plus un cylindre parfait).
2. Le système vibratoire constitué du couple bec-anche possède son propre régime vibratoire. Ce régime vibratoire est généralement dominé par la colonne d'air de l'instrument (sauf quand ça fait couac), mais cela a un effet sur la propagation des ondes sonores dans la colonne d'air, et la longueur de tube nécessaire pour produire une note s'en trouve modifiée.

On peut se sortir de ce mauvais pas en considérant que *l'embouchure est équivalente à un morceau de cylindre contenant le même volume d'air* [7]. Ce n'est qu'une approximation qui en fait n'est vraie que dans le premier registre de l'instrument. Pour une analyse plus précise et détaillée, voir [3].

3.6 C'est pas le plus beau

Voili vilou... fastoche hein ? Pas tant que ça, quand vous saurez que les formules de correction que je vous ai présentées ne sont bonnes *que pour un instrument dont les fréquences de coupure calculées à chaque trou* sont homogènes.

Hein ? Quesako ? Essayons d'expliquer ça simplement. En voyant tout le fatras de formules décrit plus haut, on pourrait penser qu'en fait on peut procéder plus simplement empiriquement :

1. Je calcule les positions théoriques (facile) ;
2. je perce en remontant et j'accorde en jouant sur les diamètres des trous.

Oui, mais non... Ca ne marche pas puisque les trous situés en dessous d'un trou ouvert ont une influence... Et puis, le premier perçage, on le fait à quel diamètre ? En fait il faut décider au départ d'un diamètre pour chaque trou, puis corriger le tuyau à l'aide des formules en utilisant ces diamètres. Et comment diable décide-t-on de ces diamètres ?

L'estimation initiale des diamètres des trous dépend de ce qu'on appelle la fréquence de coupure. Grossièrement, cette fréquence doit correspondre au double de la fréquence de changement de registre de l'instrument (passage du médium au clairon à la clarinette, passage à la 2ème octave sur un sax, mais laissons les sax de côté pour l'instant, leur perce conique pose des problèmes). Pourquoi³ ? Parce que la fréquence de coupure d'un trou correspond à la fréquence au delà de laquelle les harmoniques deviennent quasi-imperceptibles (un de ces jours je développerai plus avant ces histoires d'harmoniques). Si la fréquence de coupure d'un trou est trop basse, alors il sera impossible de faire sonner cette note dans les registres supérieurs de l'instrument. Même si vous voulez vous contenter d'un instrument ne sonnant que sur son premier registre (le plus grave), avoir une fréquence de coupure trop basse pour un trou fera que le son produit par ce trou sera pauvre en harmoniques aiguës, et donc sera moins clair.

Donc la fréquence de coupure est une quantité qu'on calcule pour chaque trou et dont la valeur doit être située aux alentours du double de la fréquence de changement de registre. Pourquoi donc ? S'il y a une trop grande dispersion des valeurs de fréquence de coupure autour du double de la fréquence de changement de registre, l'instrument n'aura pas un son homogène : certaines notes seront sourdes, d'autres trop claires. Je peux vous dire que dans la pratique, ce point est capital, et qu'il se vérifie plus que largement.

La fréquence de coupure pour un trou T_i se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$fc = \frac{c \times d_i^t}{d_i^p \times 2\pi \times \sqrt{\left(e_i + \left(\frac{3}{4} \times d_i^t\right)\right) \times (l_{i-1} - l_i)}$$

Avec tout ça nous allons pouvoir nous bricoler la recette (presque) miraculeuse pour concevoir un instrument à vent

4 Processus général de conception d'un instrument

Essayons de synthétiser ce qui a été dit auparavant. Pour concevoir un instrument il faut (enfin du moins en faisant comme ça, ça marche et c'est cohérent) :

1. Prendre un tube dont on connaît le diamètre de la perce (diamètre intérieur) ;

³maintenant je sais mieux ! autant vous en faire profiter.

2. Décider de la note la plus grave. À partir de sa fréquence, déterminer la longueur du tube ;
3. Au dessus de quelle note change-t-on de registre (je vous rappelle qu'un tube cylindrique fermé à un bout ne monte pas d'une octave, mais d'une douzième) ? Sur ce sujet, je ne m'étendrai pas, même s'il faudrait. J'écrirai autre chose un autre jour. Ces histoires de changement de registre sont bigrement salées elles aussi⁴ ;
4. Calculer le placement théorique des trous ;
5. Déterminer les diamètres des trous de façon à ce que la fréquence de coupure soit homogène et proche du double de la fréquence de changement de registre
6. Appliquer les corrections dues aux trous ouverts ;
7. Appliquer les corrections dues aux trous fermés
8. Itérer les deux dernières lignes autant de fois que nécessaire (ici je me réserve le droit de rester flou, on ne peut pas répéter la correction "trop de fois" mais il faut encore que j'expérimente, dans un premier temps, en appliquant 5 fois la correction on obtient de bons résultats).
9. Appliquer la correction due à la terminaison imparfaite du tube.
10. Frottez vos ptites mains musclées (crachez dedans avant si ça vous chante), affutez vos outils et en avant !

Un conseil : une fois que vous avez repréré la position des trous sur le tube, percez plus petit que ce qui est préconisé par le calcul. Il est toujours plus facile de retirer de la matière que d'en rajouter (quoi qu'on puisse le faire avec, par exemple, de la cire). Accordez ensuite en remontant vers le haut. Attention au fait qu'accorder une note a une influence sur les notes plus graves. Procédédez par petites touches.

Ah oui, encore un point important : Chauffez l'instrument, pas à la lampe à souder, en soufflant dedans quelques minutes avant de procéder à l'accordage. En effet, un instrument chaud a tendance à « monter ». Tous ceux qui pratiquent un instrument à vent vous le diront. La raison est simple : l'air se déplace plus rapidement dans l'air chaud. Généralement, pour la constante c utilisée dans pratiquement toutes les formules précédentes, on choisit $c = 345m/s$. Cela correspond à la vitesse du son dans l'air à une température ambiante (je ne sais plus à quelle température cela correspond exactement).

⁴Depuiq que j'ai écrit cette phrase, j'ai lu d'autres choses sur le sujet, c'est encore plus compliqué que ce que j'imaginai.

La procédure décrite ci dessus doit encore être affinée si on veut tenir compte de l'effet de l'embouchure décrit à la section 3.5. J'en reparlerai dans un prochain document. En attendant vous pouvez toujours vous référer à [7].

5 Pour finir

Cette doc est assez foutraque mais elle demande à s'améliorer. Je suis preneur de tous les apports en précision sur n'importe quel problème de perce, de trous, etc...

Notamment, d'un point de vue théorique d'une part, j'ai lu que les trous ouverts constituent un treillis (structure mathématique possédant certaines propriétés qui peuvent être utiles...), ce qui suppose l'existence d'un préordre partiel. Comparant quels éléments? Quels sont les éléments maximaux et minimaux? Autant de questions pour l'instant sans réponse.

D'un point de vue pratique ensuite. Le trou changement de registre reste ici une histoire de compromis pifométrico-mathématique assez troublant. J'y reviendrai mais tout ce que je connais sur la question est très empirique. En gros pour les connaisseurs, j'ai retenu ce que dit Ferron [5] sur le placement du trou de registre, j'ai pigé les compromis à faire, mais pas mal de paramètres méchappent, et en premier lieu faut-il mettre un tube, pourquoi et de quelle longueur dans ce trou de registre?

Lexique

perce dans un instrument à vent, la perce désigne la partie intérieure du tuyau.

registre Désigne une partie de la tessiture de l'instrument pour laquelle le régime vibratoire de la colonne d'air est le même.

Références

- [1] Arthur H. Benade. Writings of arthur h. benade. WEB Page : <http://ccrma.stanford.edu/marl/Benade/writings/58to69.html>.
- [2] Arthur H. Benade. Summary notes on the mathematical theory of finger holes, as applicable to clarinets. Summary notes, Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio, December 1960.
- [3] Arthur H. Benade. Acoustical evolution of wind instruments. Cours, Case Western University, Cleveland, Ohio, 1977. Disponible à l'adresse : <http://ccrma.stanford.edu/marl/Benade/writings/58to69.html>.

- [4] Arthur H. Benade. The nx clarinet. Technical report, Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio, 1983.
- [5] Ernest Ferron. *Clarinette, mon amie*. International Music Diffusion, 1994.
- [6] Peter Hoekje. Peter hoekje musical acoustics pages. WEB Page : <http://homepages.bw.edu/~phoekje/acoustics/mahome.html>.
- [7] Bart Hopkin. *Air Columns and Toneholes*. Experimental Musical Instruments, revised edition edition, 1999.