

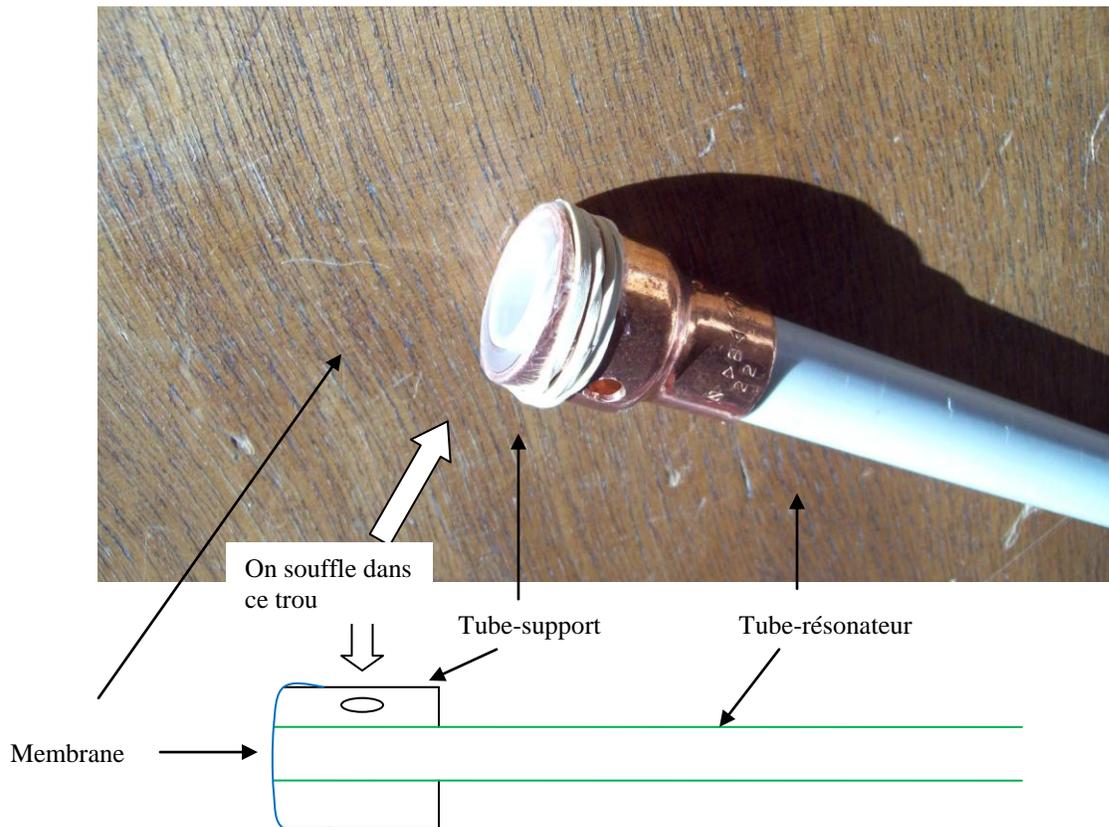
Acoustique des anches à membrane Un nouvel instrument à vent : la vouvouzémoi

BB. Ninob (avril 2011)

Résumé : Dans cet article, on décrit un nouveau dispositif d'excitation de tuyaux sonores, à l'aide d'une anche à membrane. Le fonctionnement acoustique du système est discuté, ainsi que les possibilités d'utilisation de l'instrument à des fins musicales.

Description de l'embouchure de la vouvouzémoi, avec son anche à membrane

L'embouchure de la vouvouzémoi (VVZM dans la suite du texte) est on ne peut plus simple : une membrane élastique tendue sur la section droite d'un tube-support vient s'appuyer sur l'extrémité d'un tube-résonateur. L'application du souffle *via* un petit trou dans le volume annulaire compris entre l'intérieur du tube-support et l'extérieur du tube-résonateur génère l'auto oscillation de la membrane. Le système se comporte comme une sorte d'anche transversale, qui fait sonner le tuyau-résonateur, avec une sonorité qui rappelle celle du saxophone. Contrairement aux autres embouchures d'instrument à vent, qui demandent un long apprentissage pour obtenir une sonorité de qualité, l'émission du son avec une embouchure de VVZM ne demande aucune compétence particulière : il suffit de souffler ! En contrepartie, dans la version simple de l'embouchure telle qu'elle est décrite ici, l'instrumentiste n'a aucun contrôle sur le timbre.



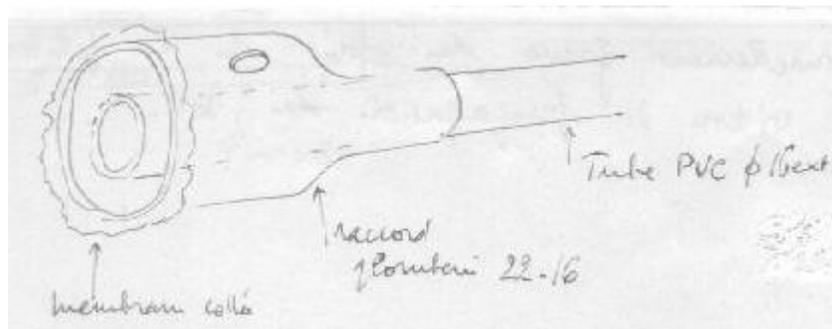
L'embouchure de VVZM

La pression de l'air nécessaire pour faire sonner le tube, le volume sonore et la hauteur du son produit dépendent de la tension de la membrane : plus la membrane est tendue, plus il faut de pression pour la faire vibrer et plus le volume sonore est important. Toutes choses égales par ailleurs, tendre la membrane fait aussi monter le son. En pratique, on règle la tension de la membrane jusqu'à trouver une émission facile avec une pression d'air modérée.

J'ai pu vérifier que les ballons de baudruche, de la feuille de polyéthylène (la matière des sacs plastiques) ou du Scel-O-Frais font d'excellentes membranes. D'autres matériaux restent certainement à tester.

J'ai fait une bonne embouchure de VVZM en collant à la cyanoacrylate une membrane polyéthylène sur le bord d'un manchon-raccord de plomberie en laiton, percé d'un trou d'embouchure. Avec ce dispositif, la tension de la membrane peut être réglée en enfonçant plus ou moins le tube-résonateur interne dans le manchon qui porte la membrane.

L'espace annulaire semble avoir assez peu d'importance pour l'émission : j'ai pu constater que les embouchures de VVZM fonctionnent correctement avec des ratios diamètre externe/diamètre interne compris entre 1.5 et 3.



Exemple de réalisation d'une embouchure de VVZM

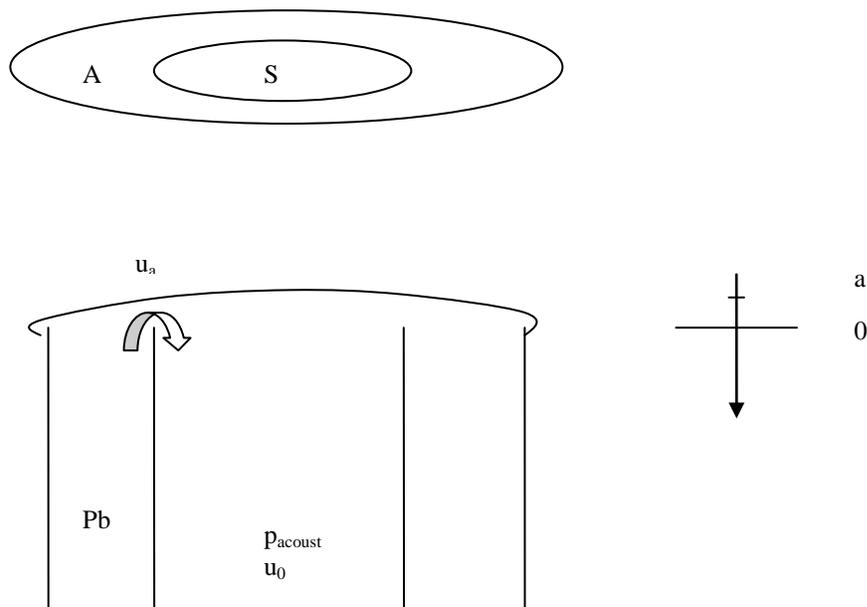
J'ai pu fabriquer des embouchures de VVZM de toutes les tailles, pour exciter des tuyaux de diamètres entre 5 mm et plusieurs centimètres. Si on est assez minutieux pour fabriquer des objets miniature, on peut monter une embouchure de VVZM sur un hautbois : pour remplacer l'anche ordinaire, l'embouchure de VVZM doit avoir approximativement les dimensions suivantes : longueur = 50 mm, diamètre intérieur du tube interne = 4 mm. On peut aussi monter ce type d'embouchure sur un saxophone : dans le cas d'un sax alto, l'embouchure doit avoir les dimensions suivantes : longueur = 60 mm, diamètre intérieur du tube interne = 13 mm. Cette embouchure est à raccorder au bout du bocal ordinaire du saxophone. Un des inconvénients de l'embouchure de VVZM, c'est qu'on ne peut modifier en jeu les paramètres de ladite embouchure. Par conséquent, il sera difficile d'avoir «aux lèvres» les deux octaves qui représentent la tessiture minimale d'un instrument à vent honnête. Pour exciter les partiels d'ordre supérieur, il faudra avoir impérativement recours à des trous de registre. J'ai pu obtenir sur un sax alto deux octaves de la tessiture officielle de l'instrument en remplaçant le bec du saxophone par une embouchure de VVZM, mais cet exploit a été rendu possible uniquement grâce aux deux trous de registre prévus par Adolphe Sax.

Il y a possibilité d'accorder l'instrument en tendant plus ou moins la membrane ou, ce qui revient au même, en enfonçant plus ou moins le tube interne au contact de la membrane. Pour un accord fin, on peut envisager un système à vis.

Les embouchures de VVZM marchent plutôt mieux avec des membranes peu tendues : ça donne un son plus timbré, et surtout, le son monte quand on souffle plus fort, ce qui met les instrumentistes à vent en terrain connu.

Le fonctionnement acoustique de l'embouchure de VVZM

J'ai tenté d'utiliser l'embouchure de VVZM pour étudier le couplage anche-colonne d'air : on a là un système facile à fabriquer, et simple à modéliser.



Modélisation de l'embouchure de VVZM

Les équations de la VVZM

La différence entre l'embouchure de la VVZM et toutes les autres anches solides, c'est que les anches solides sont ouvertes au repos et que la pression du souffle tend d'abord à les coller : par contraste, la membrane de la VVZM est collée au repos, et la pression du souffle tend d'abord à la décoller. A cette différence près, les équations de la VVZM sont pratiquement les mêmes que celles qui gouvernent les autres anches solides (une note « fonctionnement des anches solides » est en préparation). Si on appelle P_b la surpression de bouche, a le déplacement de la membrane assimilée ici à un système à un seul degré de liberté caractérisé par une masse effective M et une raideur effective K , u la vitesse de déplacement de l'air, p_{acoust} la surpression acoustique, A la surface totale de la membrane, S la section du tube résonateur et l son périmètre, les équations de l'anche membraneuse s'écrivent :

$$S \cdot \dot{a} + l \cdot a \cdot u_a = u_0 S_0 \quad (2)$$

(conservation du débit entre le canal de l'anche et l'extrémité de la colonne d'air) ;

$$-(A - S).(P_b - P_b^0) - S.p_{acoust} - K.a = M.\ddot{a} \quad (3)$$

(équation de la dynamique appliquée à l'anche). Ici, P_b^0 est la surpression de bouche minimale nécessaire pour ouvrir l'anche ou plutôt ici, décoller la membrane. M et K sont la masse et la raideur effective de l'anche, considérée comme un oscillateur à un seul degré de liberté ;

$$u_a = \left(\frac{2.|P_b - p_{acoust}|}{\rho} \right)^{1/2} .sign(P_b - P_{anche}). \quad (4)$$

(équation de Bernouilli reliant la vitesse de l'air et la différence de pression entre la bouche et le tube résonateur) ;

$$Z_T(\omega) = \frac{\tilde{P}_{acoust}}{S_0.\tilde{u}_0} \quad (5)$$

(relation qui décrit le couplage entre les champs acoustique de vitesse et de pression dans le tube résonateur. Z_T est ici l'impédance du tube résonateur vu de son extrémité, une fonction de la pulsation qui ne dépend que de la géométrie du tube résonateur).

Je n'ai pas tenté d'aller bien loin dans l'analyse mathématique de ce système compliqué : je ne sais pas plus le résoudre pour la VVZM que pour les autres anches solides ! Cependant, le système peut être simplifié par quelques approximations radicales :

En négligeant le débit aérodynamique devant le débit acoustique dans l'éq. (2), celle-ci se ramène à

$$\dot{a} = u_0 \quad (2')$$

En négligeant le terme constant $(A - S).(P_b - P_b^0)$, l'éq.(3) se ramène à

$$-S.p_{acoust} - K.a = M.\ddot{a} \quad (3'),$$

Mises ensemble, les eqs (2') et (3') peuvent encore s'écrire

$$Z_A + Z_T = 0 \quad (6),$$

où $Z_A(\omega) = \frac{i}{S^2}.(M.\omega - K/\omega)$ est l'impédance de l'anche membraneuse seule.

On retrouve ici l'équation qui donne les fréquences permises dans la note sur l'acoustique des troncs de cône [réf. 1] ; c'est aussi cette même équation qui est résolue dans le logiciel Tutt [2].

Les paramètres effectifs de l'anche membraneuse

Pour donner un sens précis à l'éq.(3) ci-dessus, il faut détailler un peu ce qu'on entend ici par masse M et raideur effective K de la membrane. La pulsation propre « libre » (c'est à dire non

raccordée à un tube résonateur) d'une membrane circulaire de surface S oscillant sur son mode fondamental (0,1) est

$$\omega_{0,1} = 2.4 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{S}} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (7),$$

où T est la tension (supposée uniforme) de la membrane (en N/m) et μ sa masse surfacique (en Kg.m⁻²). Par identification avec la pulsation d'un oscillateur harmonique M, K à un seul degré de liberté, la masse M et la raideur effective K de la membrane peuvent s'écrire $M = \mu \cdot S$ et $K = 5.8 \cdot \pi \cdot T$.

Pour mesurer cette pulsation propre, il suffit de taper sur la membrane, comme sur un tambour, et de mesurer la fréquence du son fondamental produit. Si cette pulsation est suffisamment grande devant celle du fondamental du tube, le système se comportera à peu près comme un tuyau fermé au bout par un volume effectif V_{eff} qui dépend de la tension de la membrane, de la densité de l'air ρ et de la vitesse du son dans l'air c :

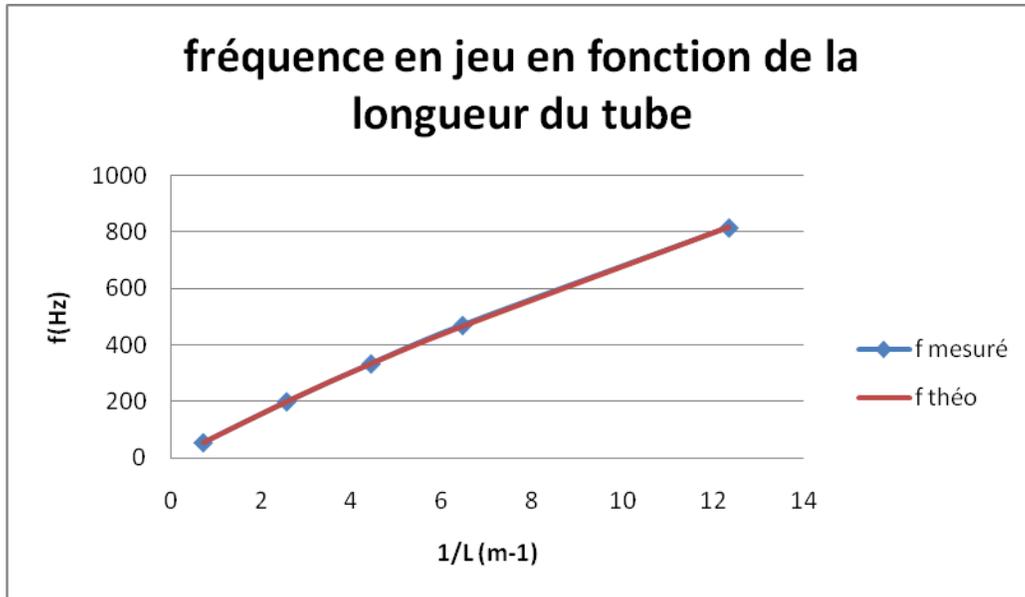
$$V_{eff} = \frac{S^2 \cdot \rho \cdot c^2}{K} \quad (8),$$

(la démonstration, facile, se trouve dans la réf. [1]). Cette équation permet de prédire que le son de la VVZM doit monter quand on tend la membrane : K augmente et V_{eff} diminue, ce qui fait monter la fréquence du fondamental. Cette prédiction est corroborée par l'expérience, au moins avec des membranes légères du type baudruche ou film plastique. Il restera à explorer la situation où la fréquence propre de la membrane est plus basse que celle du tube résonateur, auquel cas on ne peut plus ramener la membrane à un simple volume effectif. Il se pourrait que les équations ci-dessus soient alors proches de celles des anches lippales, mais je réserve ce champ d'études pour plus tard, et je me focalise ici sur le cas de membranes légères.

Avec des paramètres de membrane typiques d'une baudruche ($\mu = 5 \cdot 10^{-2}$ kg.m⁻² et $T = 20$ N/m), la masse et la raideur effectives d'une embouchure de VVZM d'un cm² de section valent $M = 5 \cdot 10^{-6}$ kg et $K = 400$ N.m⁻¹. La pulsation propre de la membrane est de l'ordre de 9 000 rd/s, nettement au dessus des pulsations fondamentales des tubes d'instrument à vent typiques. On attend donc que l'embouchure de la VVZM se comporte comme un volume effectif V_{eff} donné par l'eq. (8), de l'ordre de quelques cm³ pour une embouchure de VVZM d'un cm² de section.

Comparaison théorie-expérience

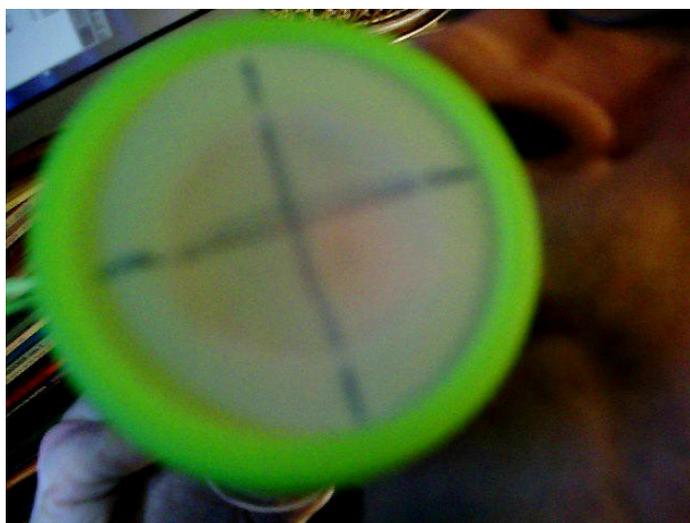
La figure ci-dessous montre que le modèle ci-dessus est en accord avec des expériences au cours desquelles j'ai mesuré les fréquences en jeu de tubes cylindriques de différentes longueurs excités par une embouchure de VVZM. Dans ces expériences, je n'ai pas mesuré la tension de la membrane, et le volume effectif a été ajusté pour faire coller théorie et expérience. Cependant, le fait que le volume ainsi ajusté ait l'ordre de grandeur attendu, et qu'une même valeur de ce volume effectif permette de reproduire les fréquences en jeu de tubes de diverses longueurs donne confiance dans le modèle. On constate au passage que le volume effectif des embouchures de VVZM peut être très important, beaucoup plus grand que celui associé à des anches classiques, ce qui constitue une particularité des embouchures de VVZM, qui leur donne un tropisme vers la production de sons graves.



La fréquence du son produit par une VVZM typique en fonction de la longueur du tube : les résultats expérimentaux sont très bien reproduits par le calcul avec le logiciel Tutt des antirésonances du système dans lequel l'anche à membrane est représentée par un volume effectif placé au bout du tube. Le diamètre du tube utilisé pour ces expériences était de 10 mm. Le volume d'extrémité représentant l'anche membraneuse dépend de la tension de la membrane. Ici, il a été ajusté à 3140 mm³ pour reproduire au mieux l'expérience.

L'embouchure de VVZM est un bon système pour l'étude des anches solides :

- La géométrie de l'anche est simple et nette ;
- Cette anche est « représentative » des anches solides, puisque elle obéit aux mêmes équations que les anches ouvertes au repos, au signe de P_b et de K près ;
- On peut très facilement modifier la tension de la membrane voire même lester cette dernière pour explorer des domaines de fréquence propre de l'anche très différents ;
- Étant libre et à l'extérieur de la bouche, on peut visualiser les mouvements de la membrane par stroboscopie.



Deux photos stroboscopiques de l'anche membraneuse de VVZM prises à deux moments extrêmes de son oscillation. La photo montre que la membrane vibre selon son mode fondamental (0,1). Elle donne aussi l'ordre de grandeur de l'amplitude de l'oscillation, ici de l'ordre du mm pour une membrane de 4 cm de diamètre et un jeu mf.

Il se pourrait que la membrane ait deux fréquences propres importantes pour le système considéré: une basse, quand son mouvement va vers l'extérieur et que le tube-résonateur est décollé; et une haute, quand son mouvement va vers l'intérieur et que le tube-résonateur est collé. Je ne sais pas si c'est important pour comprendre l'embouchure de la VVZM. En tout cas, je l'ai négligé dans les équations ci-dessus...

Sur une VVZM dont la membrane est tendue de la même façon dans toutes les directions, il semble que le son baisse quand on force le souffle, contrairement à ce qui se passe avec les autres instruments à vent connus de moi. Si la membrane est lâche et/ou tendue de façon très

anisotrope, jusqu'à former des plis dans une direction, le son monte quand on force le souffle. Entre ces deux extrêmes, il y a une situation médiane où la hauteur du son produit est indépendante de la pression de bouche : le rêve pour un instrumentiste à vent, qui peut jouer piano ou forte sans avoir à corriger son embouchure ! Je n'ai aucune explication pour ce comportement particulier, sinon peut-être qu'une membrane peu tendue au repos a une tension qui dépend beaucoup de sa déformation (elle se tend quand elle atteint les extrêmes de son oscillation) ce qui fait que la raideur effective de la membrane augmente avec l'amplitude de ses oscillations, d'où un son qui monte quand on force le vent.



Un moyen de rendre l'anche de VVZM contrôlable : faire en sorte que la lèvre inférieure puisse toucher la membrane, pour en modifier la tension et l'amortissement.

Que faire de ce type d'embouchure ? Un instrument ? Quel genre ?

Une des spécialités de la VVZM, c'est de pouvoir produire des sons de très grande puissance, quand elle est associée à des tuyaux résonateurs de grand diamètre. Là, on n'est plus dans la catégorie « instruments de plein air », mais dans « sirènes et autres objets effrayants pour sonner l'alarme ». Les cornemuses et les trombones sont loin derrière !

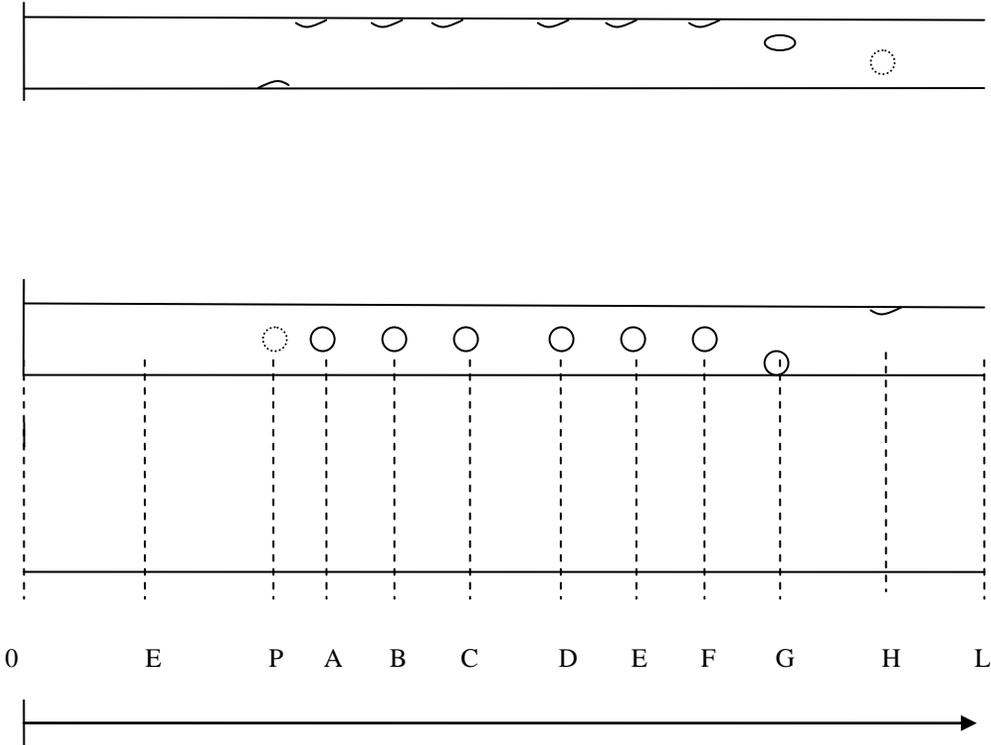
Grâce à son volume effectif, qui peut être énorme, l'embouchure de VVZM émet très facilement le registre grave. On pourrait en profiter pour la coupler à un résonateur fait dans un tuyau cylindrique de grande taille, et faire ainsi un instrument contrebasse. Il faudrait pour cela doter le tube d'un clétage pour boucher des trous espacés et de grand diamètre, ce que je n'ai pas fait pour l'instant.

Plus raisonnablement, et par respect pour la musique (si, si), j'ai essayé au contraire d'atténuer la puissance et la sauvagerie naturelle de ce type d'embouchure en la couplant avec un tuyau cylindrique de longueur modeste mais très étroit, pour en faire un instrument analogue à un cromorne. Le résultat est intéressant et utilisable musicalement. Le timbre se rapproche un peu de celui de la clarinette, avec prédominance des harmoniques impaires. Il est un peu moins riche que celui du cromorne, et le volume sonore est similaire.



Photo d'une VVZM ténor en ut

Voici par exemple les dimensions typiques de deux « chalumeaux », fait d'une embouchure de VVZM couplée à un tuyau cylindrique de petit diamètre (10 mm) :



	E	P	A	B	C	D	E	F	G	H	L (longueur du tube)
Ténor ut	65	83	97	109	128	153	175	193	223	264	289
Basse fa	80	144	168	185	214	252	285	313	358	417	448

Les dimensions de deux chalumeaux à embouchure de VVZM typiques au diapason 415 : un ténor en ut et une basse en fa. Le tableau donne la position (en mm) des trous latéraux sur le tuyau PVC de diamètre intérieur 10 mm. Le trou H est un trou d'accord. Tous les trous latéraux ont un diamètre de 4 mm.

Ces instruments ont été conçus pour être justes avec des membranes tendues pour les faire sonner agréablement avec une pression d'air modérée, de l'ordre de 200 mm d'eau. Le volume effectif correspondant à l'anche membraneuse est de 6150 mm³ pour la VVZM ténor et de 7060 mm³ pour la VVZM basse.

Ces instruments, qui ont une étendue d'une octave et un ton, et un doigté de flûte à bec, sont utilisables comme des cromornes avec une sonorité assez similaire.

Conclusion

Il reste beaucoup à faire pour modéliser finement ce type d'anche membraneuse. Ici, je n'ai fait qu'effleurer le sujet : un travail plus approfondi serait nécessaire pour tester quantitativement la validité du modèle présenté ici. Je souhaite aux acousticiens professionnels beaucoup de joie dans l'étude de ce type d'embouchure qui doit permettre d'apprendre beaucoup sur le fonctionnement des anches, du fait de sa simplicité géométrique.

Il reste aussi du travail aux facteurs d'instruments pour apprivoiser une embouchure qui donne un timbre nouveau aux instruments à vent. Je souhaite aux musiciens amateurs et bricoleurs beaucoup d'amusement avec ces objets sonores qu'un enfant de huit ans pourrait fabriquer et jouer !

Remerciements

Un grand merci à Jean-Paul Bosselut pour m'avoir donné l'idée d'étudier ce type d'embouchure.

Références

[1] <http://la.trompette.free.fr/Ninob/Ninob.php>

[2] « Simulation de l'acoustique d'un instrument à vent : le logiciel Tutt », sur ce même site internet