

Influence de la cavité buccale dans le jeu des instruments à vent

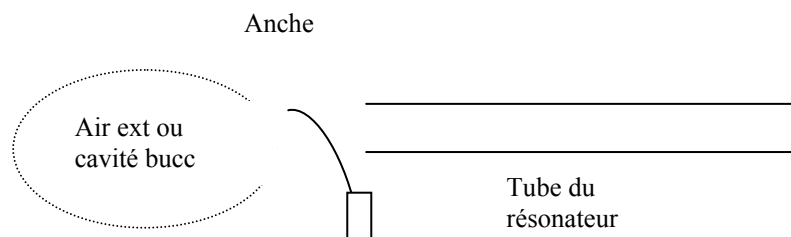
BB. Ninob, Septembre 2012

On sait que le timbre et la hauteur du son produit par un instrument à vent dépendent de la forme et du volume de la cavité buccale. Pour certains instruments, en particulier ceux à anche solide, il s'agit d'un point important : l'émission des notes aigües du saxophone dépend beaucoup de la position de la gorge ; Les professeurs de hautbois recommandent de former la bouche comme pour prononcer certaines voyelles. Pour d'autres instruments, comme les flûtes, il s'agit d'un sujet plus accessoire, cependant les professeurs de flûte disent à leurs élèves de rechercher une position où la bouche semble pleine d'air. Tout ceci suggère que la bouche n'est pas simplement un réservoir d'air à pression donnée, mais qu'elle se comporte aussi comme un résonateur, plus ou moins fortement couplé au résonateur principal constitué par la colonne d'air de l'instrument.

L'étude ci-dessous vise à préciser le rôle de la cavité buccale et l'importance de ce couplage, plus particulièrement dans le cas des instruments « embouchés », c'est-à-dire ceux pour lesquels l'anche vibre à l'intérieur de la bouche.

La théorie

Pour étudier l'influence de la cavité buccale dans le jeu des instruments à vent, il faut d'abord un bon modèle d'anche. Dans cet article, on décrit l'anche ou le jet d'air comme une membrane élastique de raideur K et de masse M , dont les mouvements déplacent de l'air dans le tube du résonateur et hors du tube. Malgré sa simplicité, ce modèle d'anche a fait ses preuves : il décrit déjà assez bien les fréquences en jeu des instruments à vent, tant ceux à anche aérienne (flûtes) que ceux à anche solide (clarinettes, hautbois, saxophones, cuivres). Nous partons donc de ce modèle solidement établi pour évaluer l'influence de la cavité buccale sur les fréquences en jeu.



Le schéma du système acoustique modélisé dans cet article

Dans le cadre de ce modèle d'anche, le débit acoustique induit par le mouvement de l'anche-membrane égale le débit acoustique dans le tube :

$w_{tube} = w_{anche}$, ou encore :

$A_{anche} \cdot a_{anche} = A_{tube} \cdot a_{tube}$, si A_{anche} est la surface vibrante de l'anche, A_{tube} la section du tube au niveau de son raccordement avec l'anche, et a_{anche} et a_{tube} les déplacements acoustiques au niveau de l'anche et au niveau du tube respectivement.

La face externe de l'anche-membrane fait aussi vibrer l'air extérieur. Sur les flûtes, cet air extérieur est l'air ambiant ; sur la plupart des instruments à anche solide, il s'agit de l'air de la cavité buccale car l'anche vibre à l'intérieur de la bouche du musicien.

Dans tous les cas, l'équation du mouvement de l'anche soumise à une force oscillante F_{ext} s'écrit :

$$F_{ext} - K \cdot a_{anche} - (p_{tube}(0) - p_{ext}) \cdot A_{anche} = M \cdot \ddot{a}_{anche} \quad (1),$$

où p_{ext} et $p_{tube}(0)$ sont les pressions sur les faces externe et interne de l'anche.

Dans l'éq. (1), F_{ext} peut être une force extérieure imposée si on a affaire à des oscillations forcées ; F_{ext} peut aussi être la force d'auto-entretien si on a affaire à des oscillations auto-entretenues. L'impédance du système vu de l'anche, définie comme le rapport entre la force extérieure et la vitesse de déplacement de l'anche, vaut alors :

$$Z \equiv \frac{1}{A_{anche}^2} \cdot \frac{F_{ext}}{i \cdot \omega \cdot a_{anche}} = Z_{anche} + Z_{tube} + Z_{ext} \quad (2),$$

où $Z_{anche} = i \cdot \frac{(M \cdot \omega - K / \omega)}{A_{anche}^2}$ (3) est l'impédance de l'anche seule,

$Z_{tube} \equiv \frac{p_{tube}(0)}{w_{tube}(0)}$ est l'impédance du tube seul, vu de son extrémité gauche ($Z_{tube} = i \cdot \frac{\rho \cdot c}{A_{tube}} \cdot \tan(\omega \cdot L_{tube} / c)$) si on a affaire à un simple tube cylindrique de section A_{tube}), et

Z_{ext} est l'impédance de l'air extérieur ou de la cavité buccale. C'est ce terme là, négligé jusqu'alors dans mes calculs d'instruments à vent, qui traduit l'influence de la cavité buccale. Dans le cas d'une flûte, Z_{ext} vaut l'impédance de rayonnement, plus ou moins corrigée par le couplage à la cavité buccale (mais la correction est petite car le couplage est faible) ; dans le cas d'une anche solide enfermée dans la bouche, Z_{ext} est l'impédance de la cavité buccale vue de l'anche, soit

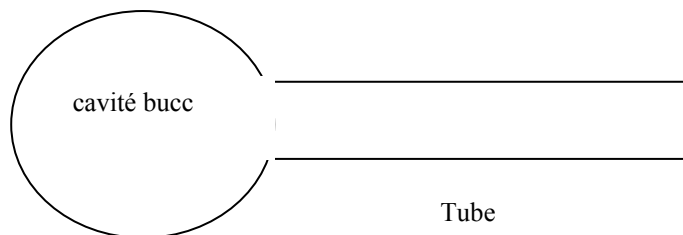
$Z_{ext} = -i \cdot \frac{\rho \cdot c}{A_{bucc}} \cdot \cot(\omega \cdot L_{bucc} / c)$ (4) si on modélise la cavité buccale comme une cavité de longueur L_{bucc} et de section A_{bucc} .

Si l'on admet que la cavité buccale est de dimensions petites devant la longueur d'onde des vibrations acoustiques en jeu, on peut approcher Z_{ext} par

$$Z_{ext} = -i \cdot \frac{\rho \cdot c^2}{A_{bucc} \cdot L_{bucc} \cdot \omega} = -i \cdot \frac{P_0 \cdot \gamma}{V_{bucc} \cdot \omega} \quad (5),$$

où $V_{bucc} = A_{bucc} \cdot L_{bucc}$ est le volume géométrique réel de la cavité buccale, P_0 est la pression atmosphérique et γ le rapport des chaleurs spécifiques de l'air.

L'expression (5) montre que le couplage à la cavité buccale se ramène à l'introduction du volume effectif V_{bucc} en bout de tube.



Le couplage à la cavité buccale peut se ramener à l'introduction d'un volume d'extrémité au bout du résonateur.

Cette dernière expression pour Z_{ext} a la même forme que celle donnant l'impédance de l'anche pour les anches à très haute fréquence propre, pour lesquelles la masse de l'anche est négligée (cf note sur l'acoustique des troncs de cône terminés par une cavité) :

$$Z_{anche} = -i \cdot \frac{K}{A_{anche}^2 \cdot \omega} \quad (6).$$

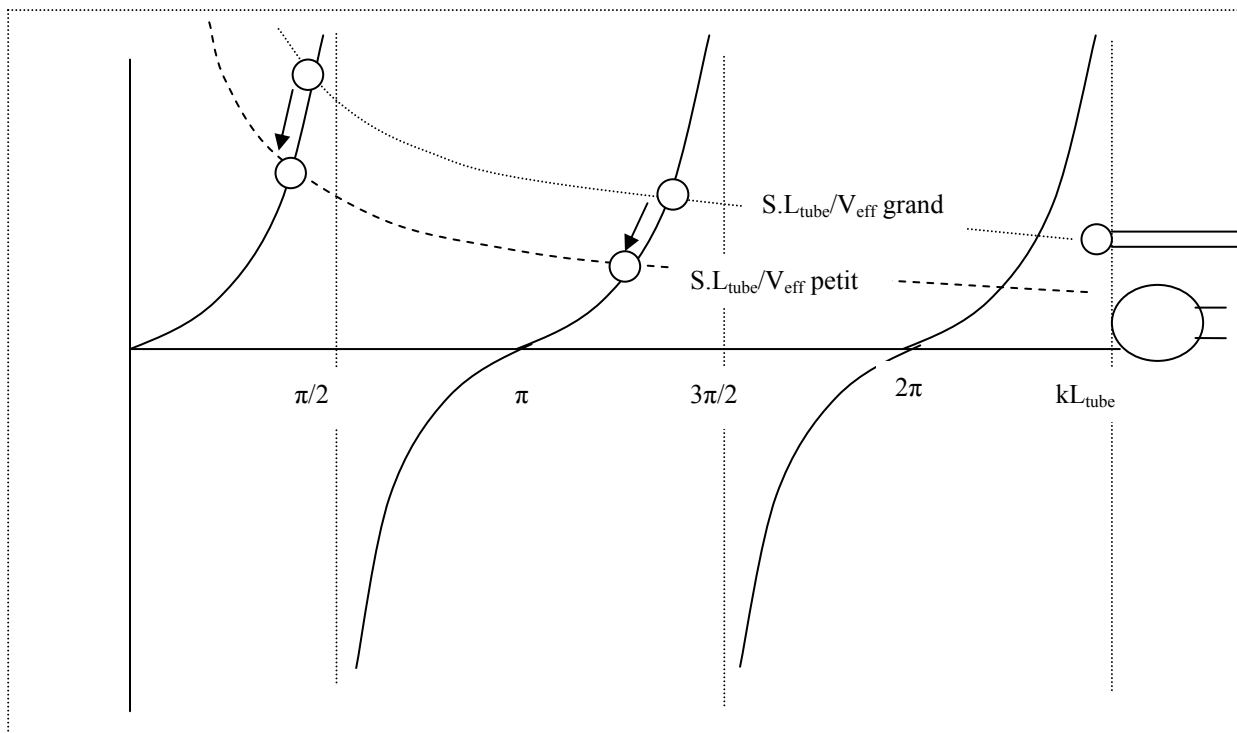
Dans cette approximation, valable pour tous les instruments à anche « roseau », l'anche peut être décrite comme un simple volume effectif

$$V_{\text{anche}} = \frac{P_0 \cdot \gamma \cdot A_{\text{anche}}^2}{K} \quad (7).$$

Les impédances Z_{ext} et Z_{anche} ayant toutes deux la forme mathématique de l'impédance d'une cavité, il est possible de tenir compte à la fois du couplage à l'anche et à la cavité buccale en introduisant en bout de tube un seul volume effectif V_{eff} pour décrire globalement ces deux couplages. Puisque les impédances Z_{ext} et Z_{anche} s'ajoutent et qu'elles sont toutes deux inversement proportionnelles aux volumes effectifs de cavité qui leur sont associés, le volume effectif qui décrit l'ensemble a pour expression

$$V_{\text{eff}}^{-1} = V_{\text{bucc}}^{-1} + V_{\text{anche}}^{-1} \quad (8).$$

On retrouve ici un résultat classique : en l'absence de cavité buccale (à la limite $V_{\text{bucc}} = 0$) ou avec une anche infiniment raide ($V_{\text{anche}} = 0$), les fréquences du système (qui sont les zéros de l'impédance Z) tombent aux fréquences d'antirésonance du tube, données par $k \cdot L_{\text{tube}} = \pi/2$ dans le cas d'un tube cylindrique. En présence d'une cavité buccale de volume fini et d'une anche de raideur finie, les fréquences du système tombent à des fréquences inférieures auxdites antirésonances.



Résolution graphique de l'éq. $\tan(k \cdot L_{\text{tube}}) = \frac{A_{\text{tube}} \cdot L_{\text{tube}}}{V_{\text{eff}} \cdot k \cdot L_{\text{tube}}}$ donnant les fréquences permises pour un tuyau cylindrique

terminé par une cavité. Les solutions sont à l'intersection des courbes $\tan(kL_{\text{tube}})$ et de l'hyperbole $A_{\text{tube}} \cdot L_{\text{tube}} / (V_{\text{eff}} \cdot k \cdot L_{\text{tube}})$. Une augmentation du volume de la cavité buccale se traduit par une augmentation du volume effectif V_{eff} , et donc par une baisse de fréquence.

Tant que $V_{\text{eff}} \ll L_{\text{tube}} \cdot A_{\text{tube}}$, la fréquence en jeu reste proche de celle de l'antirésonance. Par rapport à l'antirésonance, la correction sur les fréquences en jeu que les couplages entraînent vaut :

$$\left(\frac{\Delta \omega}{\omega} \right)_{p.r. \text{ antirésonance}} \approx - \frac{V_{\text{eff}}}{L_{\text{tube}} \cdot A_{\text{tube}}} \quad (9).$$

Ce résultat (eq. 9) se trouve aussi dans ma note de 2010 « acoustique des troncs de cône terminées par une cavité », mais dans celle-ci, il était restreint au seul couplage à l'anche ($V_{eff} = V_{anche}$).

Compte tenu de l'expression (8) obtenue pour V_{eff} , la correction de fréquence induite par les couplages conjoints à l'anche et à la cavité buccale s'écrit encore :

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega} \right)_{p.r. \text{ antirésonance}} \approx \frac{-1}{L_{tube} \cdot A_{tube}} \cdot \frac{V_{anche} \cdot V_{bucc}}{V_{anche} + V_{bucc}} \quad (10).$$

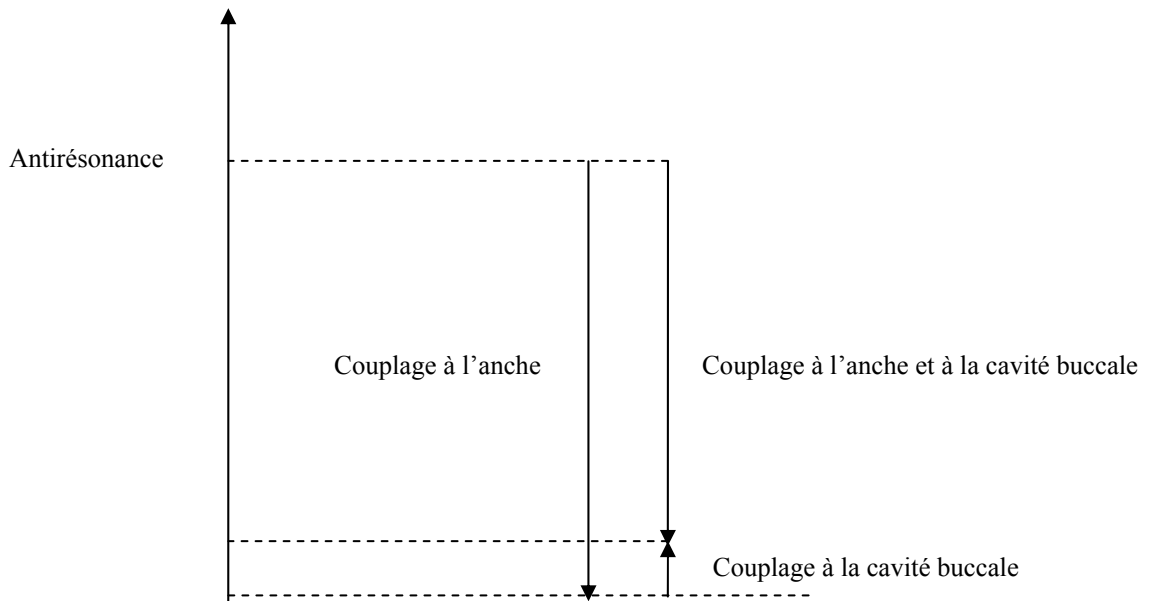
Par rapport à la fréquence de l'antirésonance, l'abaissement de la fréquence induit par le couplage à la bouche est d'autant plus grand que la cavité est grande, et atteint sa valeur asymptotique

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega} \right)_{p.r. \text{ antirésonance}} \approx -\frac{V_{anche}}{L_{tube} \cdot A_{tube}} \quad (11)$$

quand $V_{bucc} = \infty$, c'est-à-dire quand le couplage à la cavité buccale est négligé et que seul le couplage à l'anche est pris en compte. L'effet dû à la cavité buccale seule a pour expression

$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega} \right)_{avec / \text{ sans couplage à cav. bucc.}} \approx +\frac{1}{L_{tube} \cdot A_{tube}} \cdot \frac{V_{anche}^2}{V_{anche} + V_{bucc}} \quad (12).$$

Par rapport à un calcul fait sans couplage à la cavité buccale, la prise en compte du volume fini de la bouche fait donc *remonter* le son.



Récapitulatif des effets sur les fréquences en jeu des couplages à l'anche et à la cavité buccale

L'éq. (10) est valable pour tous les partiels ; l'abaissement relatif de la fréquence étant le même pour tous les partiels, le couplage à la cavité buccale préserve l'harmonicité desdits partiels, et donc, en particulier, la justesse des octaves des hautbois, bassons et saxophones, ainsi que la justesse des douzièmes des clarinettes.

Comme l'indique l'éq. (10), le couplage à la cavité buccale n'a pas la même importance pour tous les instruments : il a des conséquences plus importantes sur la justesse des petits instruments, car c'est pour ces derniers que le rapport entre les dimensions de la cavité et celles de l'instrument est le plus grand.

Cependant, en général, le volume effectif associé aux anches des instruments à vent ordinaires est nettement plus petit que le volume effectif de la cavité buccale : cette dernière n'a donc qu'une assez faible influence sur les fréquences en jeu.

Donnons ici un ordre de grandeur de l'abaissement de fréquence induit par les couplages à l'anche et à la cavité buccale : les volumes effectifs associés aux anches des différents instruments classiques de l'orchestre sont donnés dans la note « paramètres des anches doubles ».

Pour une clarinette

Le volume effectif associé à l'anche de clarinette est d'environ 1.2 cm^3 , alors que celui de la cavité buccale est voisin de 100 cm^3 . L'éq. (9) montre que le couplage à l'anche abaisse la fréquence de 2.4 % soit un petit quart de ton par rapport à la fréquence de l'antirésonance. La prise en compte du volume fini de la cavité buccale diminue le volume effectif de 0.014 cm^3 , ce qui fait remonter la fréquence en jeu de 0.03 %, soit moins d'un cent par rapport au calcul sans couplage à la cavité buccale ($V_{bucc} = \infty$). C'est peu !

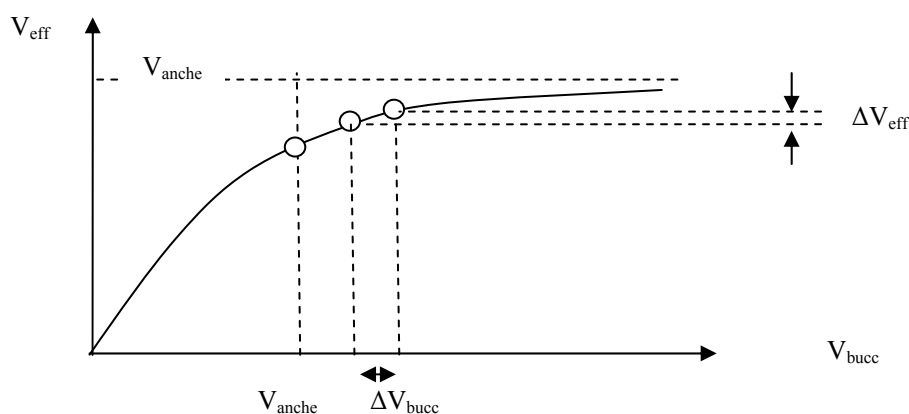
Pour un hautbois

Dans le cas des hautbois, le volume effectif associé à l'anche est d'environ 0.3 cm^3 . L'éq. (9) montre que le couplage à l'anche abaisse la fréquence de 30 %, soit presque une quarte par rapport à la fréquence de l'antirésonance. La prise en compte du volume fini de la cavité buccale diminue le volume effectif de 0.0009 cm^3 , ce qui fait remonter la fréquence en jeu de 0.2 %, soit environ 1.5 cents par rapport au calcul sans couplage à la cavité buccale.

Comme on le voit ici, pour les instruments à anche « roseau », le couplage à la cavité buccale n'a qu'une influence assez faible sur le volume effectif V_{eff} , et donc, sur les fréquences en jeu. La petitesse de l'écart en fréquence calculé légitime *a posteriori* de négliger le couplage à la cavité buccale pour le calcul de la plupart des instruments à anche.

Cependant, cette conclusion ne vaut pas pour tous les instruments à anche. Les cromornes font exception : avec leur anche large et leur perce très étroite, l'effet de la cavité buccale est plus important.

Pour le cromorne basse ($L_{tube} = 38 \text{ cm}$, $A_{tube} = 0.44 \text{ cm}^2$, $A_{anche} = 7.2 \text{ cm}^2$, $V_{bucc} = 100 \text{ cm}^3$), le couplage à l'anche abaisse la fréquence de 43 %, soit presque une quinte par rapport à la fréquence de l'antirésonance. La prise en compte du volume fini de la cavité buccale diminue le volume effectif de 0.48 cm^3 , ce qui fait remonter la fréquence en jeu de 3 %, soit environ un quart de ton par rapport au calcul sans couplage à la cavité buccale.



Une augmentation du volume de la cavité buccale entraîne une augmentation de V_{eff} , et par conséquent un abaissement des fréquences en jeu.

Si l'effet du couplage à la cavité buccale est faible, l'effet d'un changement de volume de ladite cavité risque d'être petit lui aussi. Examinons cependant l'influence d'un changement de volume ΔV_{bucc} de la cavité buccale : celui-ci fait varier le volume effectif V_{eff} . Plus précisément, de l'éq. (8), on tire :

$$\Delta V_{eff} = \frac{V_{anche}^2}{V_{bucc}^2} \cdot \Delta V_{bucc} \quad (13),$$

et la variation de fréquence associée à cette variation du volume de bouche vaut :

$$\left(\frac{\Delta \omega}{\omega} \right)_{\text{changement du volume de cav. bucc.}} \approx - \frac{V_{anche}^2}{V_{bucc}^2} \cdot \frac{\Delta V_{bucc}}{L_{tube} \cdot A_{tube}} \quad (14).$$

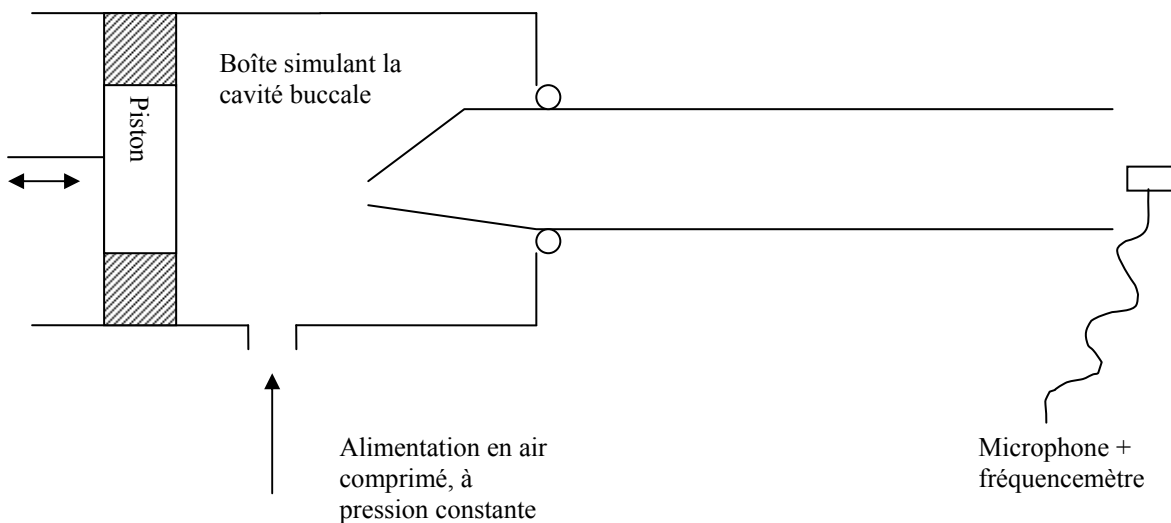
Cette prédiction corrobore l'observation qualitative des hautboïstes, clarinettes et autres bassonistes, qui savent qu'une augmentation du volume de la cavité buccale fait baisser le son. De même, l'inclusion de l'anche double du cromorne dans une capsule fait baisser le son car tout se passe physiquement comme si le volume intérieur de la bouche était ajouté au volume intérieur de la capsule.

Dans le cas du cromorne basse ($V_{capsule} = 100 \text{ cm}^3$), l'éq. (14) donne un abaissement de 3% sur les fréquences en jeu du fait de la capsule, soit environ un quart de ton.

Les prédictions ci-dessus peuvent être confrontées plus quantitativement à l'expérience.

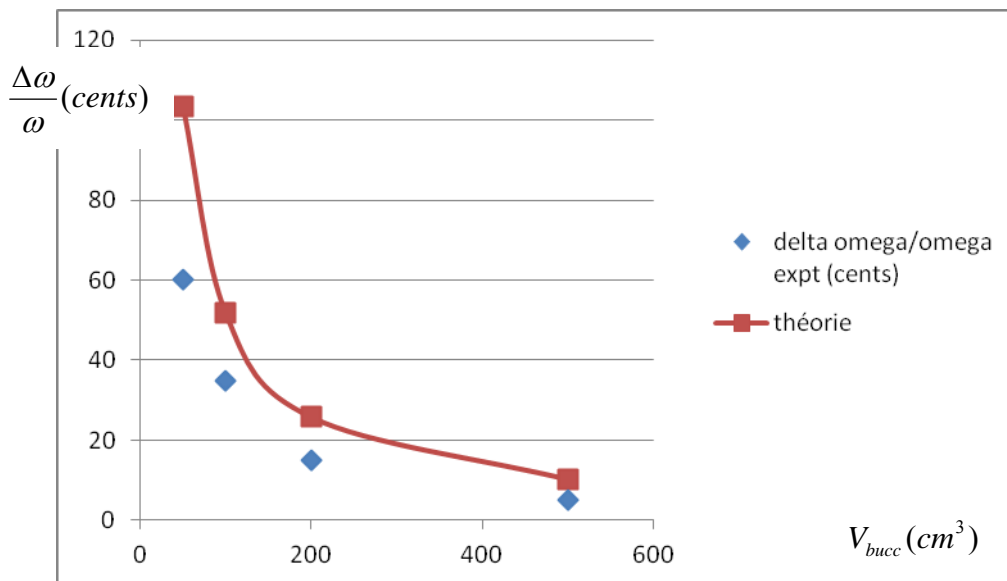
L'expérience

On a monté une expérience dans laquelle l'anche et la partie supérieure du tube de l'instrument était enfermée dans une boîte fermée par un piston :



Cas d'une clarinette ou d'un hautbois

L'idée est de faire varier le volume de la boîte en bougeant le piston et de mesurer la fréquence du son capté par le micro. La précision de la mesure de fréquence est de l'ordre de ± 5 cents, cette incertitude étant due principalement à la précision de la régulation de l'alimentation de la pression de l'air comprimé dans la boîte. Pour clarinette et hautbois, la fréquence mesurée apparaît indépendante du volume de la boîte, ce qui n'est guère étonnant, car l'effet attendu est inférieur à la précision de la mesure de fréquence. Pour que l'effet soit sensible, on choisit un système avec un fort volume effectif d'anche, associé à un tube court et de petit diamètre. Appliquée à un cromorne basse, l'expérience a donné les résultats ci-dessous :



Ecart de justesse en fonction du volume de la cavité sur un do de cromorne basse

Le calcul donne la bonne tendance mais surestime l'effet de la cavité buccale d'environ 40%. Il se pourrait que cet écart soit imputable au fait que la théorie néglige les effets d'amortissement et les effets propagatifs dans la cavité.

Conclusion

Pour la plupart des instruments à anche, et à l'exception notable des cromornes, l'effet du couplage à la cavité buccale sur les fréquences en jeu est petit. Le calcul esquissé dans cet article ne permet pas de comprendre pourquoi les instrumentistes accordent une telle importance au contrôle de la forme intérieure de leur bouche.

La théorie présentée ici décrit l'effet de la cavité buccale au premier ordre. Elle n'est valable que si l'anche a un volume effectif faible devant le volume de la bouche. De plus, son domaine de validité est limité aux cas où la cavité buccale a des dimensions petites devant les longueurs d'ondes acoustiques en jeu. Avec ces restrictions, elle reproduit l'expérience de façon semi-quantitative.

On n'a pas traité ici les aspects de propagation du son dans une cavité de forme plus allongée. Pourtant, les phénomènes propagatifs dans la cavité buccale jouent peut-être un rôle, particulièrement dans l'aigu de la tessiture des instruments à vent : il pourrait bien y avoir des cas où l'instrumentiste ajuste non seulement le volume mais également la *forme* de la cavité buccale (étendue à la gorge, jusqu'au larynx), afin d'adapter l'impédance de ladite cavité suivant la note qu'il veut émettre. Le formalisme décrit ici peut être étendu sans difficulté à ces cas : il suffit de donner l'expression adéquate à Z_{bucc} .

Autre regret : j'ai totalement négligé la dissipation dans la cavité buccale. Pourtant, il s'agit d'un volume à parois molles, avec des recoins, des bajoues et des sinus, parfois même des dents creuses, et dans lequel le son doit être passablement amorti !

Je n'ai guère parlé des flûtes. Pour ces dernières, la cavité buccale doit pouvoir être traitée comme un résonateur de Helmholtz, dont le col serait constitué par l'ouverture des lèvres augmentée éventuellement du canal (pour les flûtes à bec). La pulsation propre de ce résonateur est voisine de 1200 rd/s : cette valeur, inférieure mais du même ordre de grandeur que les pulsations en jeu, suggère la possibilité d'un couplage *résonant* entre la bouche, le jet d'air et le tube. La forme du couplage entre ce résonateur de Helmholtz et le jet d'air reste à trouver, mais on doit pouvoir traiter ça simplement.

Enfin, je n'ai pas traité ici le cas des cuivres : l'anche lippale ne peut pas être considérée comme un volume effectif, dans la mesure où l'instrumentiste fait résonner ses lèvres à la fréquence du tuyau. Le modèle du volume effectif, valable seulement quand la fréquence propre de l'anche est grande devant celle du tuyau, n'est pas utilisable dans ce cas. Je réserve pour un prochain travail la réflexion sur tous ces sujets passionnants.