

## Acoustique des cromornes et autres tournebouts

**BB. Ninob**  
**Septembre 2011**

**Résumé :** *les cromornes, instruments de la renaissance à anche double large, à perce cylindrique étroite, à trous latéraux de petit diamètre, sont des monstres ! Leur fonctionnement acoustique est rendu particulier du fait de la très grande dimension de l'anche par rapport aux dimensions du tuyau. Dans ces conditions, l'anche perturbe notablement la régularité du spectre des modes couplés anche-tuyau. Pour compliquer encore un peu les choses, la capsule qui enferme l'anche influe sur le mouvement de cette dernière et modifie ses paramètres d'oscillateur. D'autre part, l'anche large génère une onde acoustique de grande intensité dans la colonne d'air. Les trous latéraux de petit diamètre sont alors le siège de phénomènes aérodynamiques (jets d'air) qui ne sauraient être décrits dans le cadre de l'acoustique linéaire. Enfin, les pertes viscothermiques dans cette colonne d'air de petit diamètre jouent un rôle important dans le comportement acoustique des cromornes : ils doivent impérativement être pris en compte pour prédire les modes excitable et leur stabilité. Les mêmes considérations jouent aussi à des degrés variables sur le comportement acoustique des tuyaux de cornemuse. On trouvera ici une analyse de tous ces facteurs, ainsi que les plans de quelques cromornes analysés, calculés puis « optimisés » grâce à ces élucubrations.*

### Description de l'instrument



*Fig. 1 : un cromorne basse avec son anche*

La première chose qui frappe à la vue d'un cromorne est son corps recourbé en forme de crochet (fig. 1). Cette courbure complique énormément la fabrication des cromornes, car elle oblige à



Les reconstitutions modernes des cromornes proposent souvent des instruments accordés par quintes et quarts avec un soprano (exilent) en ut, un alto (descant) en fa, un ténor en ut et une basse en fa. Cet étagement n'est pas authentique car les cromornes alto anciens sont en général en sol. L'étagement moderne présente l'avantage de ne pas dépayser les musiciens amateurs, sans trahir l'esprit de l'instrument. Joués en consort soprano, alto ténor et basse, ou mieux encore alto, deux ténors et basse, la sonorité d'ensemble peut être extraordinaire, l'auditeur recevant une gerbe harmonique d'une richesse étonnante.

Comme dit Anthony Baines, cité dans [1] : *"The great virtue of the crumhorn is that it requires no special embouchure. It is as easy to blow as a recorder. It is, indeed, the equivalent among reed instruments to the recorder among flutes, and it might well be revived as such, to offer school classes and family consorts a change from recorder playing. The two instruments make a perfect contrast in tone and their fingering is the same. Also, the notes of the crumhorn sound at vocal pitch, not an octave higher, so that on changing from recorders to crumhorns one experiences a change not only of tone colour but also of register, which is very restful"*.

Un seul registre est utilisé dans la pratique courante, ce qui donne au cromorne une étendue d'un peu plus d'une octave. Sur certaines reconstitutions modernes, deux clés dans le haut du tube augmentent un peu cette étendue dans l'aigu. Cette extension est un ajout contemporain qui n'a aucune authenticité, mais qui est cependant bien utile car elle élargit le répertoire et l'utilisation des cromornes sans en trahir l'esprit.

Comme cela sera démontré plus loin, le registre utilisable du cromorne est celui du fondamental du tuyau. Sur les cromornes graves, il est possible en soufflant doucement d'accéder à un registre où le cromorne sonne à la quinte inférieure de son registre normal. Ce registre semble avoir été utilisé musicalement, quoique rarement (réf. [1]).

L'anche est extrêmement large (fig. 3) : celle du cromorne soprano est presque aussi large que celle d'un basson ; celle du cromorne basse est encore deux fois plus longue et deux fois plus large. C'est cette particularité des cromornes qui a suscité mon intérêt pour leur étude acoustique : comme on le verra ci-dessous, elle a des répercussions importantes sur le comportement acoustique de l'instrument.

Toutes les expériences menées dans le cadre de cet article pour comprendre le fonctionnement acoustique des cromornes ont été faites avec un cromorne basse mais les conclusions valent pour tous les instruments du consort.

Il est communément admis que les instruments à anche se comportent en première approximation comme des tuyaux fermés au niveau de l'anche, et que la longueur acoustique de l'instrument est celle comprise entre l'anche et le premier trou débouché. Mesurée sur le cromorne basse ci-dessus, cette longueur  $L$  vaut 380 mm sur un doigté de do (P123) ; On attend alors une pulsation

$\omega = \frac{\pi \cdot c}{2 \cdot L} = 1404 \text{ rd/s}$ , très loin de la pulsation officielle d'un do ( $\omega = 822 \text{ rd/s}$ ). Le calcul

rudimentaire ci-dessus est donc très insuffisant pour rendre compte de la justesse des cromornes. Il nous faudra donc être un peu plus malins pour réconcilier théorie et expérience. Le premier effet important à prendre en compte est celui de l'anche.



Fig. 3 : L'anche du cromorne basse utilisé pour cette étude.

Diamètre interne du bocal	Diamètre externe du bocal	Longueur géométrique de la palette	Largeur géométrique de la palette	Longueur palette+ligature
7.5	8	67	23	87

Les dimensions géométriques (en mm) de l'anche du cromorne basse étudié ici.

### Les paramètres effectifs de l'anche de cromorne

Si on admet que l'anche peut être représentée par un oscillateur à un degré de liberté, cette dernière peut être caractérisée par deux paramètres d'oscillateur : sa masse  $M$  et sa raideur  $K$ . Les paramètres d'oscillateur de l'anche peuvent être estimés :

- la masse d'une palette peut être estimée connaissant l'épaisseur moyenne  $e$  et la surface vibrante  $A_{anche}$  des palettes :  $M = \rho_{anche} \cdot A_{anche} \cdot e$  ;
- la raideur  $K$  et la surface vibrante  $A_{anche}$  peuvent être estimées par deux mesures :
  - 1) connaissant  $a$  l'ouverture de l'anche au repos et  $P_f$  sa pression de fermeture (la pression statique minimale pour fermer l'anche):  $K = 2 \cdot P_f \cdot A_{anche} / a$  .
  - 2) En appuyant sur la palette de l'anche posée à plat sur un pèse-lettre, et en mesurant la force  $F$  nécessaire pour la fermer :  $K = 2 \cdot F / a$  .

Ces deux mesures donnent pour l'anche du cromorne basse:  $K=1750 \text{ N.m}^{-1}$ ,  $A_{anche} = 1.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  et  $M = 4.10^{-5} \text{ kg}$ , ce qui donne une pulsation propre  $\omega_{anche} = \sqrt{\frac{K}{M}}$  de 6600 rd/s soit une fréquence propre voisine de 1050 Hz . La fréquence propre de l'anche est donc assez nettement

supérieure aux fréquences en jeu, et cela justifie la modélisation de l’anche comme un simple volume effectif

$$V_{eff} = \frac{(2).P_0.\gamma.A_{anche}^2}{K} \quad (\text{eq. 1}).$$

Pour la démonstration de cette équivalence entre l’anche et son volume effectif, voir la note « acoustique des troncs de cône », référence [2].

Le facteur 2 vient du fait que l’anche est double.

Dans l’approximation ci-dessus, les fréquences en jeu du tuyau équipé de son anche sont alors celles du tuyau raccordé à un volume total équivalent, somme du volume effectif  $V_{eff}$  et du volume géométrique  $V_{geom}$  de l’air enfermé entre les deux palettes de l’anche, évalué dans le cas du cromorne basse étudié ici à  $3330 \text{ mm}^3$  (fig. 4) :

$$V_{tot} = V_{eff} + V_{geom}.$$

Pour l’anche de cromorne basse étudiée ici, l’eq. (1) donne un volume total équivalent de  $8720 \text{ mm}^3$ .

Avec ce modèle, nous sommes désormais en mesure de calculer l’influence de l’anche large du cromorne sur le comportement acoustique de l’instrument, et en particulier, sur sa justesse.

### Les cromornes : des instruments au spectre très inharmonique

On a vu plus haut que pour les anches de cromorne, la surface  $A_{anche}$  des palettes est très grande et le volume effectif l’est donc aussi. Par conséquent, les fréquences permises pour les cromornes sont attendues notablement plus basses que celles d’un tuyau cylindrique de même longueur ; Pour la même raison, on attend également pour les cromornes un spectre de modes propres très inharmonique.

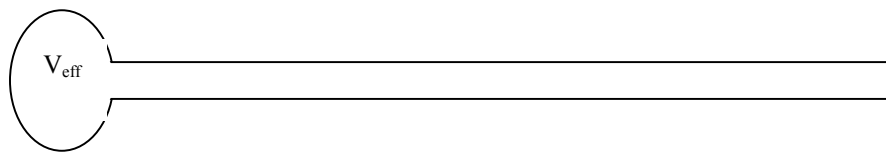


Fig 4 : Le modèle du volume équivalent : quand la fréquence propre de l’anche est très supérieure à la fréquence du tube, les fréquences en jeu sont les fréquences passives du système formé par le tuyau raccordé à un volume équivalent  $V_{tot}$ .

Pour justifier ce point, partons d’un tuyau cylindrique fermé à un bout, et négligeons provisoirement l’anche. L’équation aux pulsations propres est simplement  $\tan kL = \infty$ , où  $k$  est la constante de propagation du son dans le tuyau, relié à la pulsation  $\omega$  et à la vitesse du son  $c$  par la relation  $k = \omega / c$ . Le spectre des modes propres est harmonique, composé des multiples impairs de la fréquence du fondamental. Rajoutons maintenant une cavité d’embouchure de volume  $V_{tot}$

(fig. 4): l'équation aux pulsations propres devient dans ce cas :  $\tan(\omega.L/c) = \frac{A_{tube}.c}{V_{tot}.\omega}$  (eq. 2), où  $A_{tube}$  est la section du tube et  $L$  sa longueur (fig. 5).

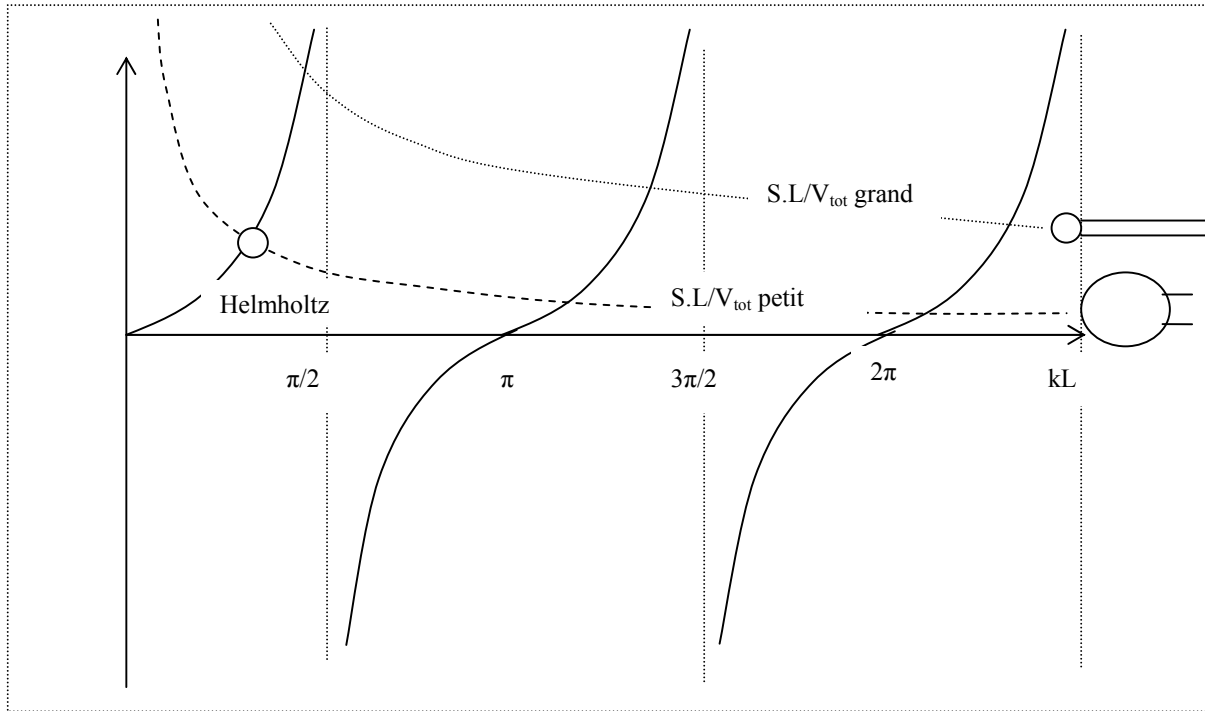


Fig. 5 : Résolution graphique de l'éq.(2) :  $\tan(k.L) = \frac{A_{tube}.L}{V_{tot}.k.L}$  dans le cas d'un tuyau cylindrique terminé par une cavité. Les solutions sont à l'intersection des courbes  $\tan(kL)$  et de l'hyperbole  $A_{tube}.L/(V_{tot}.k.L)$ .

On remarque que le mode 2 a une pulsation telle que  $k_2L > \pi$ , alors que le mode 1 a une pulsation telle que  $k_1L < \pi/2$ . Un tuyau cylindrique fermé sur une cavité ne saurait octavier : le rapport de fréquence entre les deux premiers modes est toujours supérieur à 2, quel que soit le volume de la cavité.

Si  $V_{tot}$  est petit devant  $\frac{A_{tube}}{k}$ , la fréquence en jeu est abaissée de  $\left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)_{p.r. \text{ antirés}} = -\frac{V_{tot}}{A_{tube}.L}$  par rapport à la fréquence de l'antirésonance, c'est à dire celle qu'on aurait en l'absence de couplage à l'anche. Avec la valeur de  $V_{tot}$  trouvée plus haut,  $\frac{\Delta\omega}{\omega} = 0.43$ , soit environ 7 demi-tons (une quinte diminuée) plus bas que la fréquence d'antirésonance du tube non couplé à l'anche. Comme on le voit, l'influence du couplage à l'anche sur la justesse est loin d'être négligeable !

Si  $V_{tot}$  est grand devant  $\frac{A_{tube}}{k}$ , le système se rapproche d'un résonateur de Helmholtz. Le mode fondamental voit sa fréquence baisser beaucoup, alors que celle des modes d'ordre supérieur reste à peu près stable. Le mode fondamental se détache donc du reste du spectre, et plonge dans

le grave. Dans l'approximation  $\tan k_1 L \approx k_1 L$ , la pulsation de ce mode fondamental devient égale à celle du mode « Helmholtz » :

$$k_1 = \sqrt{\frac{A_{tube}}{V_{tot} \cdot L}}$$

A la limite où  $V_{tot}$  tend vers l'infini, le mode fondamental disparaît vers les basses fréquences, et l'ancien mode 2 devient le nouveau mode fondamental. L'équation aux pulsations propres se ramène à  $\tan kL = 0$  : le système se réduit à un cylindre ouvert aux deux bouts, avec des partiels harmoniques. On retrouve alors...une flûte !

Le cas des cromornes est intermédiaire, et correspond à un  $V_{tot}$  fini. Le rapport des pulsations  $k_2/k_1$  entre les deux premiers partiels est grand, largement supérieur à 2 (fig. 6), on s'attend donc à ce que l'émission du fondamental soit particulièrement stable. Cette stabilité est effectivement observée sur les cromornes réels. Elle représente à la fois une facilité de jeu, et une limitation dans la tessiture de l'instrument, puisque seul le mode fondamental est couramment exploité dans la pratique musicale.

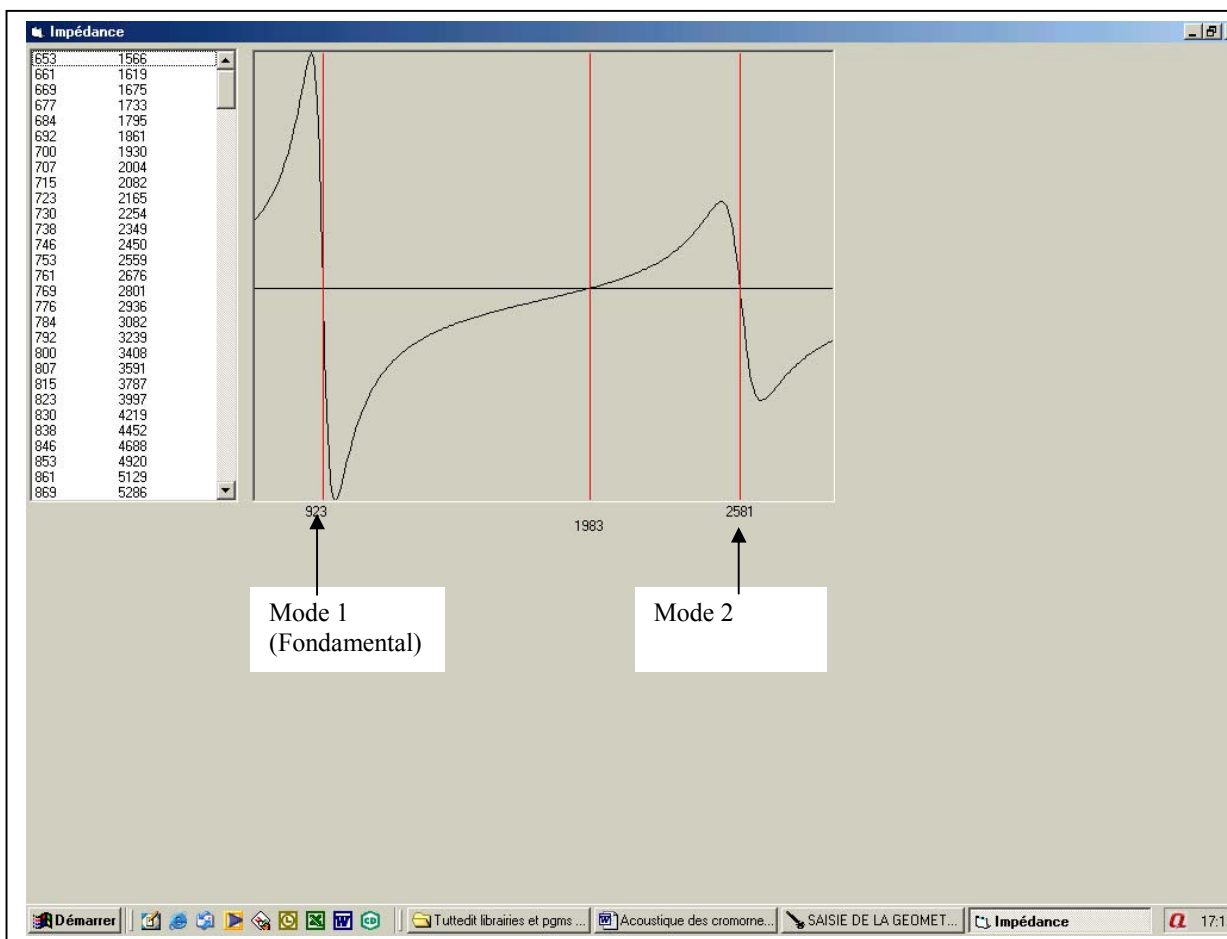


Fig. 6 : la partie imaginaire de l'impédance du cromorne basse, sur la note ré (doigté P 1 2). Le mode fondamental est à 923 rd/s ; le second mode est très éloigné, à 2581 rd/s. Le spectre est très inharmonique.

## Influence acoustique de la capsule

La capsule qui enferme l'anche du cromorne (fig. 7) semble avoir une certaine influence sur la justesse. On s'en aperçoit en comparant la hauteur du son émis avec et sans la capsule : celle-ci baisse le son, surtout dans l'aigu. Ceci est dû au fait que la capsule rajoute son volume à celui de la cavité buccale. Si on modélise cette dernière comme un volume d'extrémité (approximation licite si les dimensions de la capsule sont petites devant la longueur d'onde acoustique en jeu), les effets du couplage à l'anche et du couplage à la bouche sont équivalents à l'introduction d'un unique volume effectif d'extrémité, dont l'expression est :

$V_{tot} = \frac{V_{tot\ anche} \cdot V_{bucc}}{V_{tot\ anche} + V_{bucc}}$ , où  $V_{bucc}$  est le volume de la cavité buccale, auquel vient s'ajouter celui de la

capsule (cf note sur le couplage à la cavité buccale, réf. [3]). Par rapport à la fréquence en jeu sans capsule, le son est alors abaissé de

$$\left( \frac{\Delta \omega}{\omega} \right)_{capsule} = - \frac{V_{tot}}{V_{bucc}^2} \cdot \frac{V_{capsule}}{L_{tube} \cdot A_{tube}}.$$

L'application numérique de cette formule au cas du cromorne basse ( $V_{tot\ anche} = 8720 \text{ mm}^3$ ,  $V_{bucc} = 100\,000 \text{ mm}^3$ ,  $V_{capsule} = 100\,000 \text{ mm}^3$ ,  $L_{tube} = 380 \text{ mm}$ ,  $A_{tube} = 44 \text{ mm}^2$ ) donne  $\left( \frac{\Delta \omega}{\omega} \right)_{capsule} = -4\%$ , soit environ 70 cents ou un peu plus d'un quart de ton.

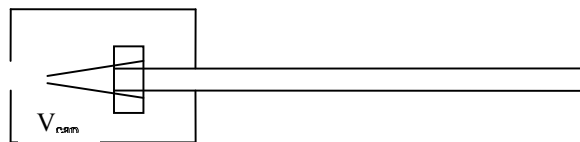


Fig. 7 : La capsule du cromorne

## Influence des effets viscothermiques

Nous ne sommes pas encore au bout de nos peines pour décrire le comportement acoustique des cromornes. Un autre effet important à prendre en compte est celui de la dissipation acoustique. La perce des cromornes est très étroite. Or le son s'amortit plus vite et se propage plus lentement dans les tuyaux étroits que dans l'air libre, à cause des effets viscothermiques liés aux interactions entre la colonne d'air et la paroi du tube. Dans les tuyaux étroits, la vitesse du son dépend pas mal de la fréquence (Fig. 8). Cet effet ne peut être négligé dans le calcul de la fréquence des cromornes. Pour donner un ordre de grandeur de l'effet, la vitesse du son dans un cromorne basse de 8 mm de diamètre de perce et sonnante à la pulsation de 1000 rd/s est inférieure



de 3% à la valeur de la vitesse du son dans l'air libre, ce qui entraîne un abaissement de la fréquence de 3% (un quart de ton) par rapport à un calcul qui négligerait les effets viscothermiques. Autre exemple, si on perce le tube principal d'un cromorne ténor à 6.5 mm au lieu de 5.8mm tout en gardant la même position des trous, l'écart moyen de diapason est de l'ordre de 50 cents, soit un quart de ton. L'effet dépend en outre de l'état de surface interne du tuyau. Il est encore plus marqué pour les tuyaux à parois rugueuse. Le plan de perce d'un cromorne est peut-être simple, mais le facteur doit le respecter avec précision et faire très attention à l'état de surface du tube pour faire un instrument juste.

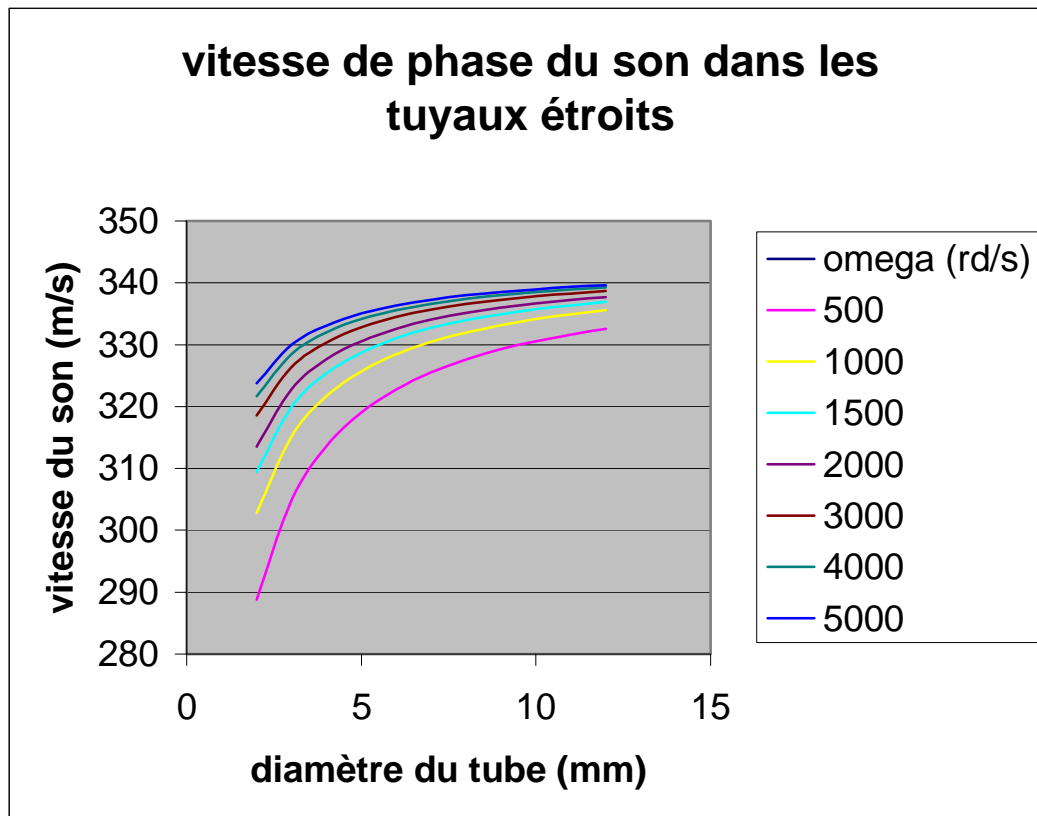


Fig. 8 : La vitesse de phase du son dans un tuyau étroit bien lisse, en fonction de la pulsation  $\omega$  et du diamètre du tube. Pour les tuyaux rugueux, l'effet de ralentissement du son est encore plus marqué.

### Influence des trous latéraux

Encore un effort : il reste un effet important à prendre en compte pour décrire proprement le comportement acoustique des cromornes. Sur les cromornes, les trous latéraux sont de tout petit diamètre, et de grande hauteur car ils sont percés à travers une paroi assez épaisse. A cause de ces deux caractéristiques (petit diamètre et grande hauteur), l'onde stationnaire dans le cromorne garde une amplitude significative loin en aval du premier trou débouché (fig. 9). C'est pour garder cette caractéristique sur tous les doigtés de l'instrument, y compris ceux des notes les plus graves, que les cromornes sont dotés de deux trous d'accord en aval du dernier trou de jeu. Ces

trous ne sont jamais bouchés en jeu mais ils donnent à l'onde stationnaire dans le tube une allure similaire sur tous les doigtés de la gamme, avec pour conséquence un instrument au timbre homogène.

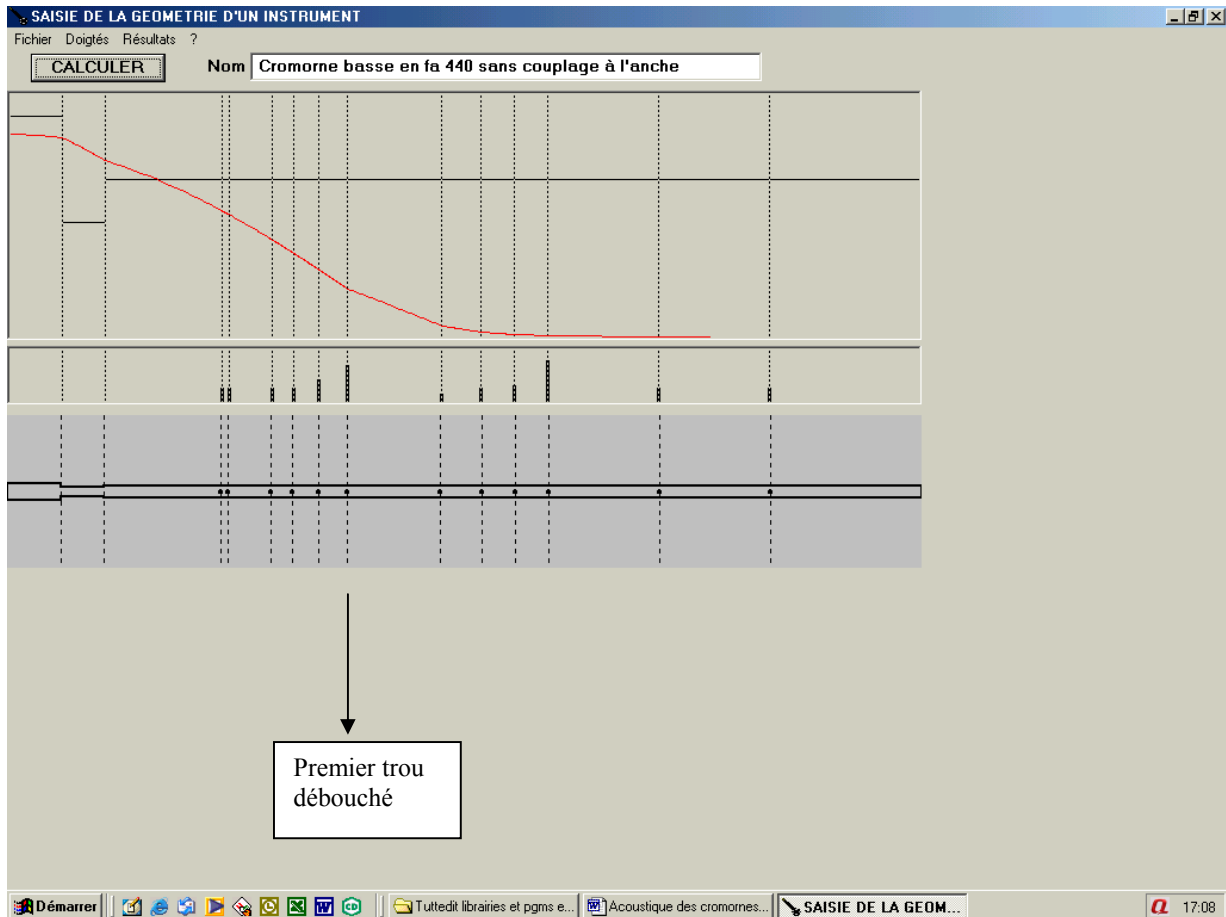


Fig. 9 : Allure de l'onde stationnaire de pression sur un ré du cromorne basse (doigté P 1 2). On voit que l'onde de pression se prolonge dans le tuyau très en aval du premier trou débouché. Calcul effectué avec le logiciel Tutt (réf [4]).

#### *Influence de la hauteur des cheminées sur la justesse*

La hauteur du son produit pour un doigté donné dépend énormément de la hauteur de la cheminée du premier trou débouché (sur un cromorne basse, réduire la hauteur des cheminées latérales de 1 mm fait monter les notes du milieu de la tessiture d'environ 20 cents) On peut donc pratiquement accorder un cromorne en ajustant cette hauteur, et on peut le faire dans de larges proportions sans pour autant dégrader le timbre ou l'émission : le spectre des modes propres des cromornes est déjà très inharmonique du fait de la largeur de l'anche. Des hauteurs de cheminée considérables, de l'ordre de 2 ou 3 centimètres, ne dégradent guère une harmonicité déjà très mauvaise dès le départ. On peut utiliser cette liberté sur la hauteur des cheminées pour positionner à des emplacements ergonomiques les trous latéraux de cromornes faits avec des cheminées rapportées : par exemple, le trou du do grave du cromorne ténor a tendance à être trop éloigné pour être bouché facilement avec l'auriculaire droit, si on donne audit trou une hauteur de

cheminée « normale », égale à celle des autres trous. Cependant, on peut remonter ce trou et allonger la longueur de la cheminée : si la compensation est bien faite, la note reste juste, et le trou devient jouable même pour des petites mains ! (fig. 10). Cette liberté a été un peu utilisée par les facteurs d'instruments historiques : leurs cromornes de tessiture basse ont des trous inclinés percés en paroi épaisse : les cheminées hautes permettent de remonter le trou et de resserrer l'espace entre trous ; l'inclinaison des trous diminue encore cet espacement (fig. 11). Cependant, les facteurs historiques se sont trouvés limités dans l'exploitation de cet effet, car ils perçaient leurs trous latéraux dans des tubes de bois de diamètre extérieur constant. En revanche, il peut être pleinement exploité par les facteurs modernes s'ils rajoutent des cheminées latérales piquées sur le tube principal. Leurs instruments gagneront ainsi en ergonomie, au prix d'une petite entorse à l'authenticité.

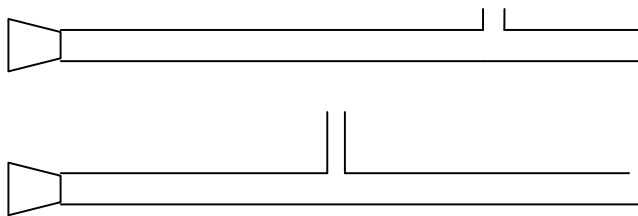


Fig. 10 : Deux plans de perce donnant une note de la même hauteur : (a) un trou placé bas avec une cheminée courte et (b) un trou placé haut avec une cheminée longue. La liberté sur le positionnement des trous latéraux d'un cromorne est très grande, à condition de pouvoir choisir la hauteur des cheminées.

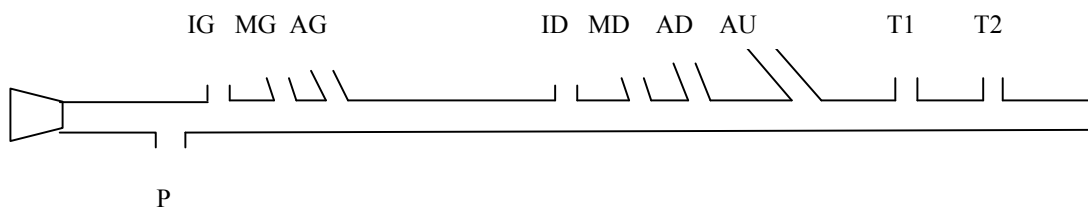


Fig. 11 : L'inclinaison des trous et la hauteur des cheminées peuvent être ajustés dans de grandes proportions sur les cromornes sans dégradation de l'émission ou du timbre de l'instrument. On a représenté ici un schéma possible pour un cromorne de grande taille, ténor ou basse. Les initiales IG, MG, AG se réfèrent aux doigts correspondants : index gauche, majeur gauche, etc..

### Jets et acoustique non-linéaire

Il y a une autre complication liée au fait que les cromornes sont pourvus de trous latéraux de petit diamètre : on sait que si une onde acoustique intense est excitée dans le tuyau, les trous latéraux

sont le siège de phénomènes aérodynamiques (formation de jets dus à l'onde de pression) qui ne peuvent être décrits par le formalisme de l'acoustique linéaire (cf la note sur l'impédance d'extrémité des tuyaux acoustiques, réf [5]). Les conséquences de l'existence de ces jets, qui modifient l'impédance d'extrémité des trous latéraux sont une dissipation accrue et une pulsation de jeu inférieure à celle prédite par l'acoustique linéaire. Les écarts par rapport aux prédictions de l'acoustique linéaire sont d'autant plus marqués que l'onde acoustique est plus intense. L'effet est de l'ordre d'une vingtaine de cents.

*Pour récapituler*, la fig. 12 ci-dessous donne les ordres de grandeur des effets acoustiques à prendre en compte pour prédire correctement la fréquence en jeu des cromornes. Partant d'un calcul simple de propagation d'une onde plane dans un tuyau cylindrique fermé en haut et non couplé à l'anche, la prise en compte du couplage à l'anche abaisse le son de 6 (7) demi-tons environ, la correction due aux trous latéraux de petit diamètre est de l'ordre de 3 demi-tons, les effets viscothermiques abaissent encore le son d'un quart de ton, ainsi que l'effet de la capsule et les effets aérodynamiques d'acoustique non-linéaire. Et tout cela mis ensemble permet de faire un calcul à peu près juste !

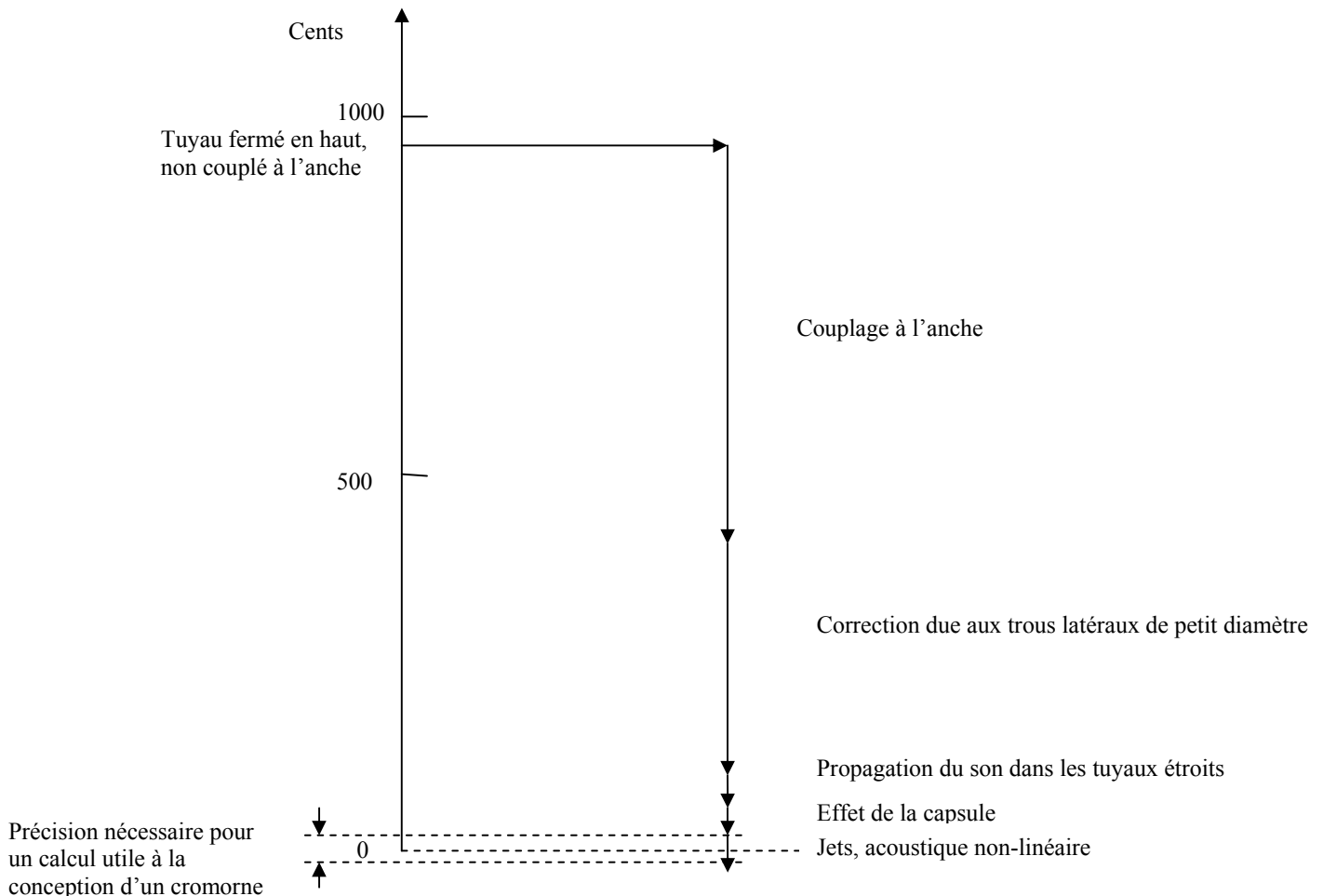
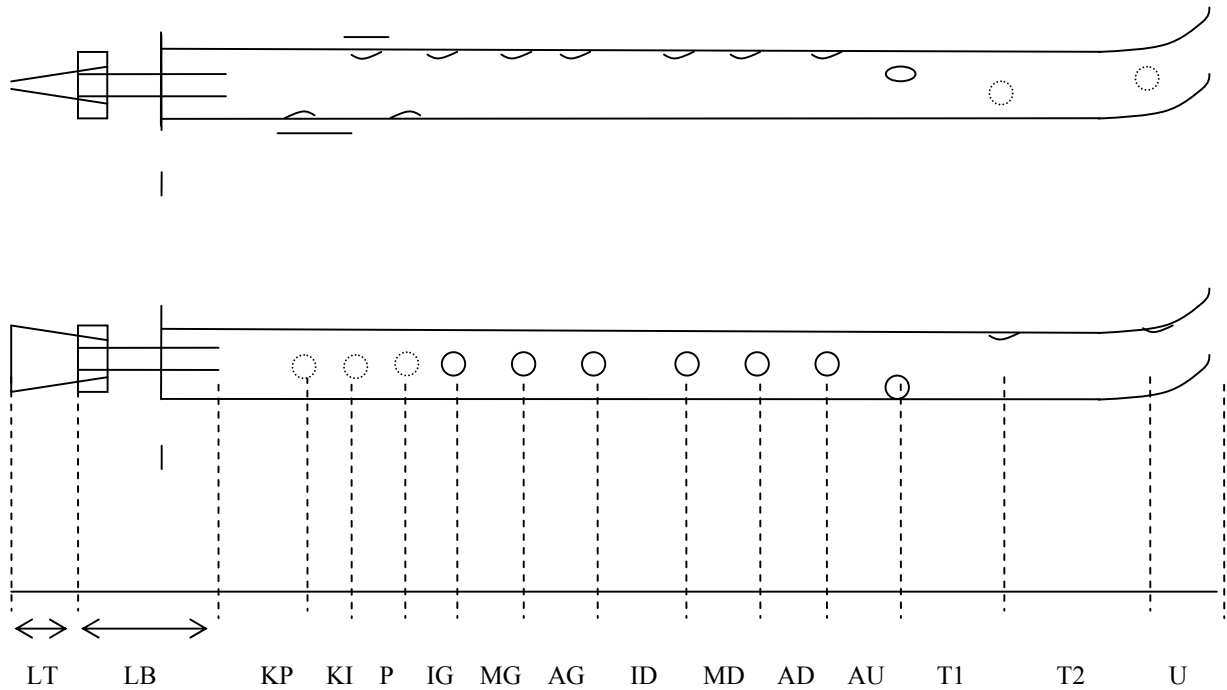


Fig. 12 : récapitulatif des effets acoustiques en jeu dans le calcul de la fréquence des cromornes

### Conception de « vrais » cromornes

*Analyse de cromornes existants*

Voici-dessous (figs. 13 et 14) le tableau des dimensions relevées sur quatre cromornes d'un consort d'une marque célèbre :



*Fig. 13 : Schéma de perce d'un cromorne*

Les dimensions données ici sont des dimensions « déroulées », la courbure du bout du tube ne jouant aucun rôle dans le comportement acoustique de l'instrument.

	LT	LB	KP	KI	P	IG	MG	AG	ID	MD	AD	AU	T1	T2	U
Sopran.ut	25	32	20	1	30	4	15	16	20	18	18	18	37	54	130
Alto fa	30	35	45	12.5	29	9	25	25	32	25	26	26	57	57	70
Ténor ut	55	65	32	2	40	19	30	35	36	36	33	32	75	70	110
Basse fa	67	124	47	30	36	35	41	37	74	46	42	100	95	200	30

	Diamètre de la perce	Hauteur des cheminées	Diamètre extérieur du tube	Diamètre des trous latéraux
--	----------------------	-----------------------	----------------------------	-----------------------------

Sopran ut	5.0	6.65	18.2	3.5
Alto fa	5.5	6.5	18.5	2.5
Ténor ut	6.5	8.4	23.3	4.0
Basse fa	7.5	10.1	27.7	4.3

Les dimensions (en mm) de quatre cromornes typiques au diapason 440 : un soprano en ut, un alto en fa, un ténor en ut et une basse en fa. Le tableau donne la position (en mm) des trous latéraux. Les trous T1 et T2 sont des trous d'accord.

Le dernier tronçon (noté U dans le tableau) correspond à un évasement de la perce, qui comporte ainsi un embryon de pavillon. Cet évasement se trouve en aval de deux trous d'accord toujours ouverts, et son influence acoustique est quasi nulle. Nous l'avons négligé dans la présente analyse acoustique.

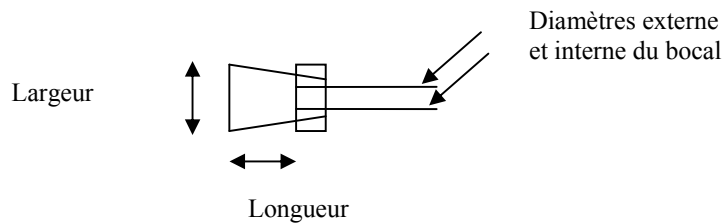


Fig. 14 : schéma d'une anche double avec ses cotes principales

	Diamètre interne du bocal	Diamètre externe du bocal	Longueur géométrique de la palette	Largeur géométrique de la palette
Sopran ut	5.0	5.5	25	16
Alto fa	5.5	6	30	17.7
Ténor ut	6.5	7	55	20
Basse fa	7.5	8	67	23

Les dimensions géométriques (en mm) des anches des quatre cromornes ci-dessus.

	Surface vibrante (m <sup>2</sup> )	K (N/m)	Volume effectif (m <sup>3</sup> )	Volume géométrique de l'anche (m <sup>3</sup> )	Volume total de l'anche (m <sup>3</sup> )
cromorne soprano	4.7E-05	993	6.39E-07	5.25E-07	1.16E-06
cromorne alto	6.5E-05	902	1.32E-06	8.26E-07	2.15E-06
cromorne tenor	12.5E-05	1293	3.38E-06	2.07E-06	5.45E-06
cromorne basse	18.4E-05	1753	5.40E-06	3.31E-06	8.72E-06

Les paramètres des anches des quatre cromornes ci-dessus.

Ces paramètres ont été rentrés dans le logiciel Tutt pour calculer ces quatre instruments. Tutt prend en compte tous les effets cités dans l'article, sauf les effets de jet et d'acoustique non-linéaire : le couplage à l'anche est traité dans le cadre du modèle du volume effectif d'extrémité ; l'effet de la capsule est pris en compte, également sous forme d'un volume effectif d'extrémité ajouté au précédent; les pertes viscothermiques sont prises en compte grâce à une constante de propagation complexe, dépendant du diamètre du tube et de la pulsation ; l'effet des trous latéraux est traité grâce à l'algorithme habituel de Tutt, qui résout les équations de propagation du son dans un tube de forme quelconque et piqué de trous latéraux. Avec les paramètres d'anche ci-dessus, Tutt prédit une justesse raisonnable sur l'ensemble de la table des doigtés des quatre instruments, avec cependant pas mal d'irrégularités ( $\pm 25$  cents) (fig. 15). Les défauts prédits par le modèle sont effectivement observés sur les instruments réels. Ceux-ci sont tout à fait jouables car leurs écarts de justesse sont à l'intérieur du champ de liberté en fréquence, qui est de l'ordre de (-60 cents, +30 cents) : toutes les notes peuvent donc être corrigées « au diaphragme », mais les corrections rendent ces instruments assez fatigants à jouer.

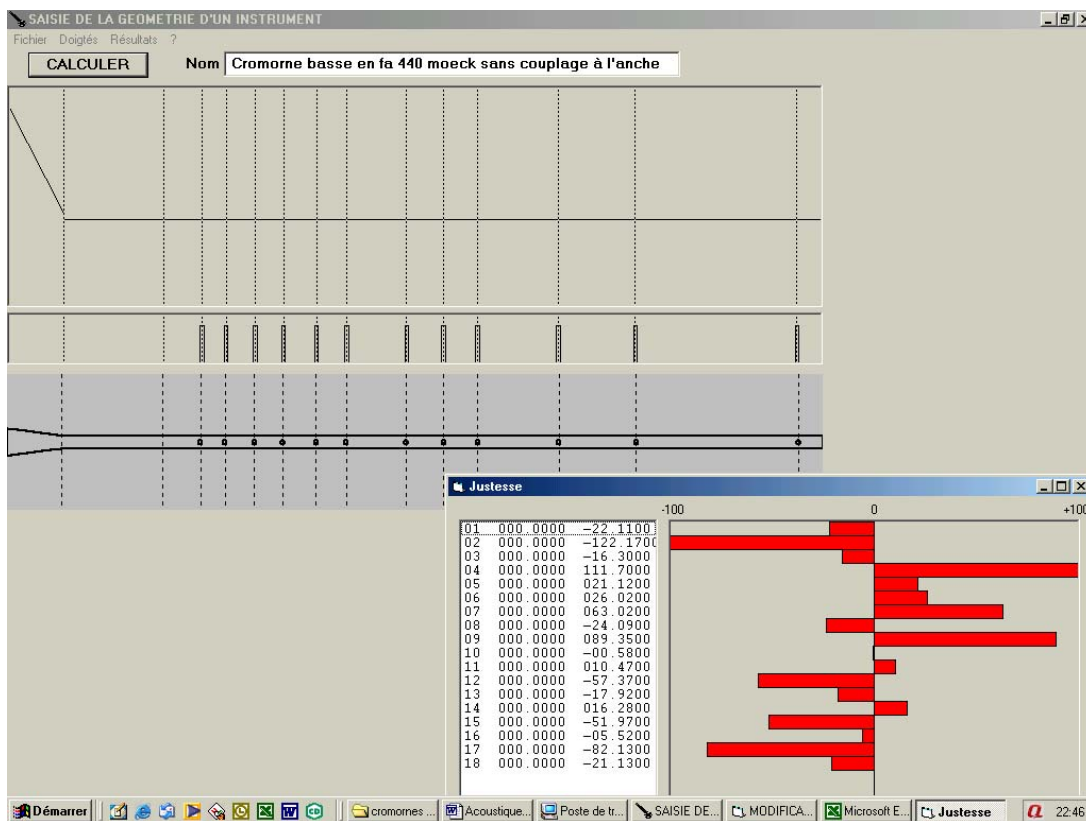


Fig. 15 : La justesse d'un cromorne basse, calculée avec le logiciel Tutt. La justesse de référence est celle d'un tempérament égal à octaves justes, au diapason La 440.

### *Conception et réalisation de cromornes « optimisés »*

Partant des cromornes étudiés ci-dessus comme point de départ, la justesse pourrait être un peu améliorée par déplacement de certains trous latéraux ou modification de la hauteur des cheminées. J'ai cherché à concevoir des cromornes facilement réalisables avec des tubes (métalliques !) disponibles en grande surface, ce qui m'a amené aux diamètres de tube suivants :

	Tube-bocal de l'anche		Tube du corps de l'instrument	
	Φintérieur (mm)	Φextérieur (mm)	Φintérieur (mm)	Φextérieur (mm)
Soprano ut	5	6	5.8	8
Alto fa	5	6	5.8	8
Ténor ut	5.8	8	5.8	8
Basse fa	5.8	8	8	10

*Les tubes utilisés pour la réalisation des cromornes optimisés ont l'avantage d'être facilement disponibles dans le commerce.*

Pour ces cromornes optimisés, j'ai conservé la dimension transversales des anches des cromornes originaux. Seule la raideur des anches a été un peu corrigée pour obtenir une progression régulière des paramètres des anches du quatuor. On trouvera une compilation des paramètres des anches doubles dans la réf. [6].

	Diamètre interne du bocal	Diamètre externe du bocal	Longueur géométrique de la palette	Largeur géométrique de la palette	Raideur K (N/m)	Volume total équivalent (mm <sup>3</sup> )
Sopran ut	5.0	6	25	16	833	1290
Alto fa	5	6	30	17.7	980	2050
Ténor ut	5.8	8	55	20	1250	5570
Basse fa	5.8	8	67	23	1530	9500

*Les dimensions géométriques (en mm) et les paramètres des anches des quatre cromornes optimisés.*

Voici les dimensions de ces cromornes optimisés grâce à Tutt (toutes les dimensions sont en mm) :

	LT	LB	KP	KI	P	IG	MG	AG	ID	MD	AD	AU	T1	T2	U
Sopran.ut	25	32	28	3	17	12	13	19	23	21	15	28	32	39	34
Alto fa	30	37	57	5	26	16	19	29	33	32	22	27	64	47	40
Ténor ut	55	25	43	5	26	19	19	28	45	34	32	31	74	92	70
Basse fa	67	54	90	9	53	30	32	35	119	51	43	42	143	136	190



Les cheminées latérales sont été faites dans du tube de diamètre intérieur 3 mm pour tous les instruments. Ces tubes latéraux sont piqués sur le tube principal, avec éventuellement un angle pour rendre l'instrument plus ergonomique.

Voici le tableau des hauteurs de cheminées (en mm) pour ces cromornes optimisés :

	KP	KI	P	IG	MG	AG	ID	MD	AD	AU	T1	T2
Sopran.ut	6.6 mm pour tous les trous latéraux											
Alto fa	8.0								17.4	8 mm		
Ténor ut	11	9.4	6.4	8	7.3	10.0	5.7	8.4	5.6	18	8.4	8.4
Basse fa	10.1	10.1	10.1	10.1	15	25.8	6.0	10.1	11.7	28	10.1	10.1

Les dimensions du cromorne basse sont pas mal modifiées par rapport au modèle de départ. La justesse est considérablement améliorée. J'ai mis des hauteurs de cheminées très importantes, en particulier au niveau de l'annulaire droit (AD) des cromornes ténor et basse, à la fois pour pouvoir resserrer et incliner les trous latéraux et rendre l'instrument jouable sans clétage sur les huit trous de jeu principaux et pour faire marcher les doigtés de fourche.

Le résultat du calcul de ces cromornes avec le logiciel Tutt est montré fig. 16.

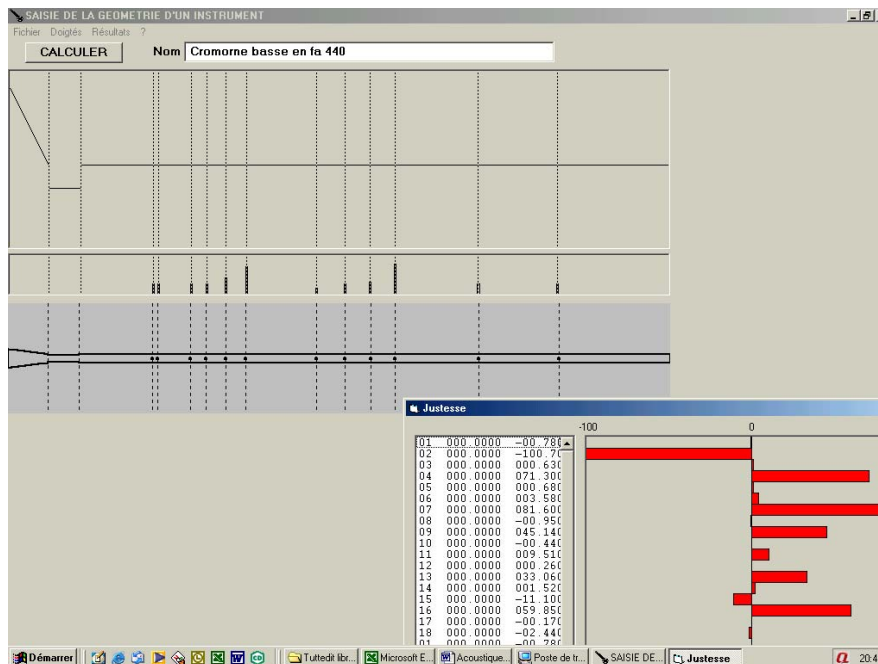


Fig. 16 : Calcul de la justesse du cromorne basse optimisé. L'histogramme rouge représente la justesse (exprimée en cents) prédite par Tutt sur les différents degrés de la gamme, du plus grave (1) jusqu'au plus aigu (18).

Afin de vérifier si ces cromornes prétendument optimisés étaient bons, je les ai fabriqués, en allant au plus simple : j'ai utilisé des tubes métalliques droits (fig. 17). Les trous latéraux étaient faits avec des petites sections de tubes piqués sur la perce principale (fig. 18).



*Fig. 17 : un « cromorne » optimisé. Tous les ingrédients nécessaires à la fabrication de cet instrument, y compris le tube principal en alu, sont disponibles chez Leroy-Merlin. On distingue les cheminées latérales, constitués de petits tubes en cuivre piqués sur le tube principal. Extérieurement, l'objet ne ressemble guère à un cromorne, mais acoustiquement, c'en est un ! Et il marche !*



*Fig. 18 : Les cheminées latérales sont constituées de petits tubes en cuivre piqués sur le tube principal. Les piquages sont renforcés par du mastic époxy. Sur ce cromorne ténor, la cheminée pour l'auriculaire droit (à droite de la photo) a été faite particulièrement haute pour rendre ce trou de jeu accessible sans pour autant avoir recours à une clé.*



*Fig. 19 : La capsule du cromorne « optimisé » est faite dans un tube plastique transparent. Elle se raccorde à l'instrument via un bouchon de champagne percé. On voit l'anche à l'intérieur de la capsule.*

Le comportement et la justesse des cromornes dépendent *énormément* de l'anche utilisée (fig. 19). Même en respectant les dimensions d'anche de l'article, il m'a fallu tâtonner un peu (très peu, en fait) sur les anches pour obtenir exactement le bon diapason.

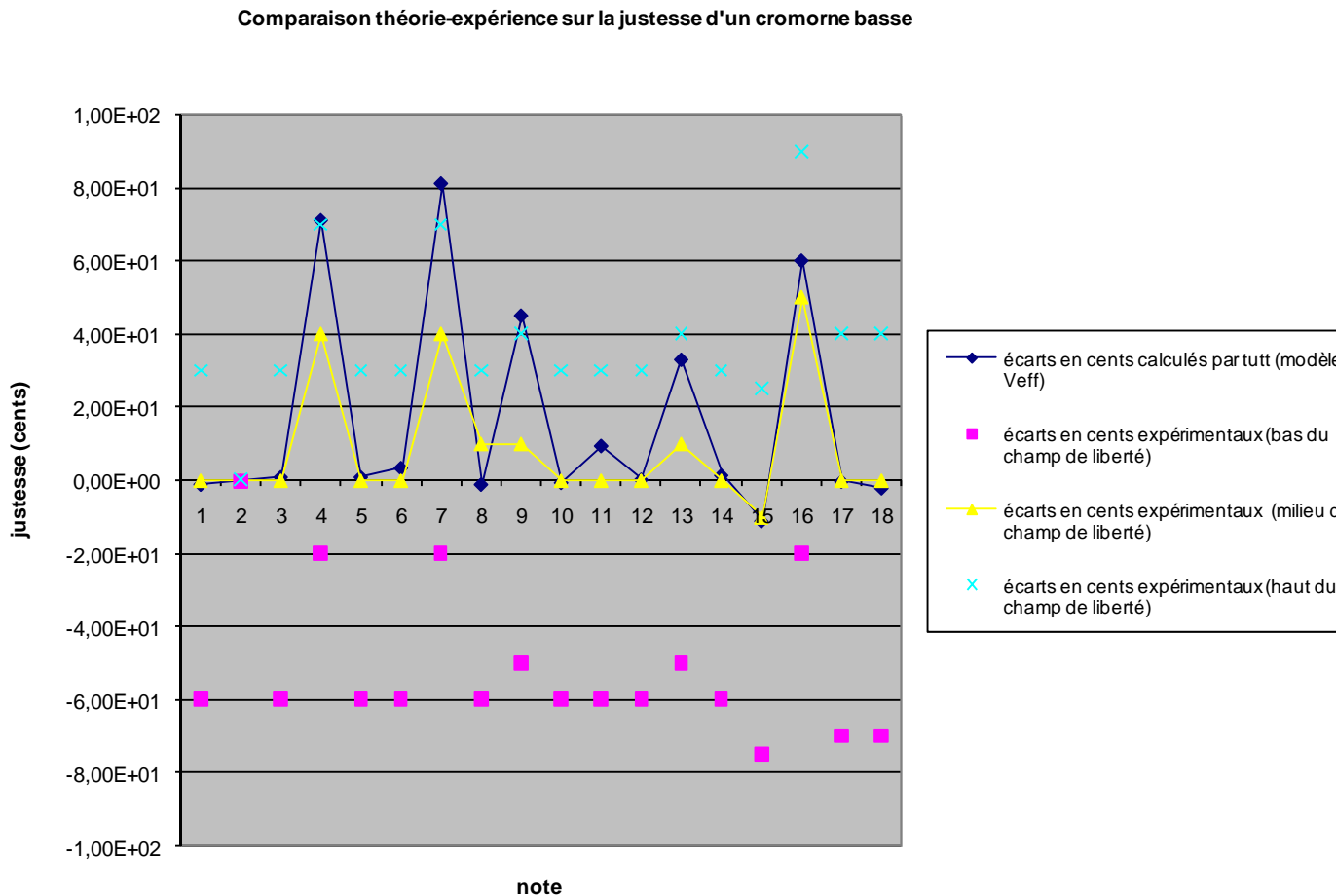


Fig. 20 : La comparaison théorie expérience sur la justesse du cromorne basse « optimisé ». Le logiciel Tutt prédit correctement la justesse globale de l'instrument sur les doigts naturels (notes 1 (fa), 3 (sol), 5 (la), 8 (do), 10 (ré), 12 (mi)). Les doigts de fourche (4 (sol#), 7 (si), 9 (do#), 13 (fa)) sont prédits trop hauts alors que dans la pratique ils fonctionnent très bien. C'est probablement dû à l'effet Venturi dans les cheminées, non pris en compte dans le logiciel.

La fabrication des anches est autant un art qu'une science. Pour ces instruments, j'ai fabriqué des anches en plastique, selon une méthode décrite dans une note séparée « fabrication des anches » (réf. [7]). Seule spécificité des anches de cromornes : les palettes de l'anche sont montées sur un tube cylindrique, et non conique comme sur la plupart des autres instruments à anche double. Il faut veiller à aplatir le tube au bout, pour éviter d'avoir une anche trop ouverte. Attention également à ne pas monter l'anche sur un tube à parois trop épaisses, sinon l'anche sera trop basse.

A l'usage, les cromornes ainsi fabriqués fonctionnent très bien : malgré les entorses à l'authenticité que constituent l'usage de tubes métalliques droits et le recours à des anches en plastique, le timbre est tout à fait convaincant. Je défie François 1<sup>er</sup> d'entendre la différence ! L'ergonomie est considérablement améliorée : les instruments sont légers, ils n'ont pas tendance à chavirer puisqu'ils sont dépourvus de ce crochet débile qui ne demande qu'à suivre les lois de la gravité sur les instruments originaux. Et surtout, les reliefs apportés par les cheminées latérales rapportées se sentent très bien sous les doigts, ce qui résout une des difficultés majeures du jeu des cromornes : comment boucher des trous tellement petits qu'on les sent à peine sous les doigts ? Au plan acoustique, la justesse de ces instruments calculés est nettement meilleure que celle des cromornes originaux qui leur ont servi de point de départ (fig. 20). Les petits écarts de justesse qui subsistent ne gênent pas le jeu, car ils sont très largement à l'intérieur du champ de liberté en fréquence, et peuvent être corrigés par l'instrumentiste. Les écarts concernent surtout les doigtés de fourche, et sont probablement imputables aux effets aérodynamiques dans les trous latéraux, non pris en compte dans Tutt.

Au total, des instruments agréables en consort, qui ne demandent qu'à faire danser les gens, comme à la Renaissance !

## Conclusion

On a le plaisir d'avoir compris à peu près le fonctionnement acoustique des cromornes et des tuyaux de cornemuse, et d'avoir su les calculer dans leurs grandes lignes. La liste des ingrédients nécessaires au succès de la modélisation est longue : le principal ingrédient est bien sûr le couplage anche tuyau. Le modèle  $V_{eff}$ , qui assimile l'anche à un simple volume équivalent trouve ici confirmation de sa validité.

Couplage à l'anche, phénomènes dissipatifs dans une perce et des trous latéraux étroits, effets de la capsule : seul un logiciel informatique permet de rassembler tous les ingrédients nécessaires à la modélisation des cromornes et autres tuyaux de cornemuse. Le logiciel Tutt s'acquitte vaillamment de cette tâche, en prenant en compte presque tous les effets. Malheureusement, il en manque au moins un : Tutt ne prend pas en compte les phénomènes d'acoustique non-linéaire liés aux jets qui se forment au voisinage des trous latéraux de petit diamètre. Cela peut expliquer les petits désaccords qui subsistent entre théorie et expérience.

Les cromornes : un concentré diabolique de toutes les complications de l'acoustique des instruments à vent !

## Remerciements

Un grand merci à André Pierucci pour avoir prêté ses cromornes pour les expériences décrites dans cet article.

Merci aussi aux amis des Ateliers de Musique Ancienne de Palaiseau, qui ont fait sonner les cromornes décrits ici. Les instruments sont faits pour être joués !

## Références

[1] «The Crumhorn, its History, Design, Repertory and Technique », K. T. Meyer, UMI Research Press (1983).

[2] « Acoustique des troncs de cône », <http://la.trompette.free.fr/Ninob/Ninob.php>

- [3] « Influence de la cavité buccale sur le jeu des instruments à vent »,  
<http://la.trompette.free.fr/Ninob/Ninob.php>
- [4] « Simulation de l'acoustique d'un instrument à vent : le logiciel Tutt »,  
<http://la.trompette.free.fr/Ninob/Ninob.php>
- [5] « Impédance terminale d'un tuyau sonore » <http://la.trompette.free.fr/Ninob/Ninob.php>
- [6] « Paramètres des anches doubles » <http://la.trompette.free.fr/Ninob/Ninob.php>
- [7] « Fabrication d'anches doubles en plastique » <http://la.trompette.free.fr/Ninob/Ninob.php>