UN LOGICIEL DE CONCEPTION D'INSTRUMENTS A VENT

NOTICE DU PROGRAMME TUTT35 ET DU LOGICIEL D'EDITION TUTTEDIT

BB. NINOB
19 Mai 2007

TABLE DES MATIERES

0. Introduction : les tenants et aboutissants du programme TUTT. A quoi il peut servir.

1. Les aspects physiques du modèle, et leur transcription mathématique dans le programme TUTT

6. Ce que fait le programme TUTT
6. Hypothèses de modélisation
8. Le squelette de TUTT
9. Approximation monodimensionnelle et corrections de longueur
12. Propagation du son et champs sonores
13. La constante de propagation du son
14. Algorithme de résolution des équations de propagation
15. L'embouchure
15. Paramètres effectifs de l'anche ou du jet d'air
16. Couplage à l'embouchure
17. Impédance
19. Fréquences de résonance du système
20. Choix du mode de vibration
20. Autres calculs
22. Critères de satisfaction

2. Mode d'emploi du programme TUTT

23. Ce que fait le programme
23. Organigramme du programme TUTT
24. Liste des sous-programmes utilisés dans TUTT
28. Structure du fichier d'entrée de TUTT
31. Exemple de fichier d'entrée du programme TUTT
34. Fonctionnement du programme TUTT
38. Structure du fichier de sortie de TUTT
40. Exemple de fichier de sortie du programme TUTT

3. Exemples de fichiers d'entrée et de sortie du programme TUTT pour quelques instruments types

44. Flûte à bec
44. Flûte traversière Boehm
48. Traverso baroque
52. Hautbois baroque
56. Saxophone
61. Trompette

4. Mode d'emploi du logiciel d'édition TUTTEDIT

66. Pour installer TUTTEDIT sur le disque dur
66. Pour lancer TUTTEDIT
67. Pour charger un fichier d'entrée
68. Pour modifier le fichier d'entrée
70. Pour modifier la table des doigtés
72. Pour calculer
75. Pour voir les résultats
78. Pour sauvegarder le fichier d'entrée modifié
78. Pour sortir de TUTTEDIT

5. Utiliser TUTT intelligemment pour optimiser un instrument

79. Un exemple d'utilisation rationnelle de TUTTEDIT : les abaques de perturbation
80. Pour optimiser un instrument en jouant sur un nombre réduit de ses paramètres géométriques : utiliser les matrices de covariance
82. Autre possibilité pour améliorer un instrument par itérations : les algorithmes génétiques
84. Pour améliorer un instrument par itérations successives

0. Introduction : les tenants et aboutissants du programme TUTT. A quoi TUTT peut servir.

Mettre en équations un instrument de musique, pour quoi faire?
Un physicien dirait : pour mieux le comprendre, pour prédire son comportement, peut-être pour l'améliorer?
En tout cas, à première vue, l'entreprise paraît difficile. Pourtant, dans le cas d'un instrument à vent, quelques constatations simples peuvent donner de l'espoir :

-D'abord, c'est l'air contenu dans le tuyau qui vibre, et pas le tuyau lui-même, ou si peu! Le problème devient tout de suite plus simple, car, contrairement au bois des violons, l'air est un milieu élastique homogène, isotrope et sans mystère.

- Ensuite, les caractéristiques sonores d'un instrument à vent dépendent principalement de la **géométrie** de la colonne d'air (par géométrie, j'entends : forme de la perce, position des trous, hauteur des cheminées). Or la géométrie d'un instrument à vent est en général assez simple : elle se mesure, elle s'appréhende simplement, elle peut se modifier facilement.
Pourquoi cette importance particulière de la géométrie dans le cas des instruments à vent? Parce que c'est elle qui détermine la **justesse** de l'instrument, et que la qualité sonore d'un instrument à vent dépend beaucoup de cette justesse. Pour transformer cette affirmation banale en quelque chose de plus intéressant, il faut élargir un peu le sens du mot "justesse" : Certes, la hauteur du son produit dépend de la géométrie de l'instrument. Mais, au delà de cette évidence, la qualité du timbre dépend aussi de la justesse relative des différents modes de vibration du résonateur : le timbre sera d'autant plus riche que les fréquences des modes seront plus proches d'une série harmonique; L'intonation elle-même sera aisée et le volume sonore sera important si l'auto entretien se fait bien, condition remplie elle aussi si les partiels sont justes entre eux. Si on accepte ces prémisses, on voit donc l'importance primordiale de la **justesse** relative des modes propres de la colonne d'air : les principales qualités d'un instrument à vent en dépendent. Or, la justesse de modes propres est typiquement un problème accessible au calcul.

Si un violon de Stradivarius défie l'analyse du physicien, ce dernier peut en revanche espérer **calculer** une bonne flûte. Ce sont ces quelques considérations qui nous ont conduit à tenter de calculer la justesse d'un instrument à vent, avec l'espoir -peut-être un peu utopique- de l'optimiser sur des bases scientifiques. Cette fameuse justesse n'est qu'un compromis. On ne peut pas séparer les différents paramètres géométriques de l'instrument et leur assigner un rôle indépendant sur la justesse de tel ou tel partiel. Changer la position d'un seul trou de jeu a pour conséquence la modification de la fréquence de tous les partiels, sur tous les doigtés de l'instrument. Obtenir un instrument à vent "juste" est donc un problème d'optimisation extrêmement compliqué, car il dépend de très nombreux paramètres. Cette complexité qui défie l'analyse « à mains nues » peut-elle être traitée à coups d'ordinateurs? C'est ce que le logiciel TUTT tente de faire.

Pour concevoir *ab initio* des instruments bizarres et d'un type nouveau (bombarde contrebasse, flûte à bec mezzo-soprano en la,…), l'intérêt de la démarche est assez clair. Peut-on aussi envisager d'améliorer par ordinateur des instruments existants? Sur les très bons instruments, l'espoir paraît mince: les tâtonnements géniaux de plusieurs générations de facteurs n'ont-ils pas abouti depuis longtemps à une sorte d'optimum ? Sur les instruments d'époque, peut-être toute "amélioration" n'est-elle qu'illusoire, dépendant moins de critères objectifs que de critères esthétiques plus ou moins fluctuants d'une époque ou d'une contrée à l'autre. C'est pourquoi j'ai préféré restreindre mon ambition à une étude sur la justesse, en prenant ce mot au sens large. Même ce but est ambitieux, car une importante difficulté survient : n'importe quel instrumentiste à vent sait qu'il est possible de jouer faux sur un excellent instrument, et

juste sur un mauvais : tout dépend de la façon dont on souffle dedans! C'est pourquoi j'ai tenté de décrire mathématiquement le couplage entre le souffle du musicien et son tuyau. C'est une des parties essentielles de ce logiciel, et peut-être ce qui le distingue le plus nettement des autres logiciels développés pour concevoir des instruments à vent.

Le programme TUTT est maintenant assez bien rodé. Il tourne sur un vulgaire PC : avec lui, j'ai conçu de nombreux instruments (flûtes de tous types, hautbois, clarinettes) "sur écran". Après les avoir fabriquées en respectant le plan le plus scrupuleusement possible, je les ai trouvées plutôt bons. Par ailleurs, j'ai aussi consacré beaucoup de temps et d'efforts à mesurer soigneusement la géométrie d'instruments de qualité, et à comparer les prédictions du programme TUTT avec les sons effectivement produits. La comparaison entre prédictions et résultats est excellente (pour les flûtes : moins de 10 cents sur la justesse de chaque note, si l'on tient compte de l'interaction entre le jet d'air et le résonateur), ce qui donne plutôt confiance dans le modèle; même les quelques petits défauts de ces instruments avaient été prédits par le calcul.

Ce bon accord entre théorie et expérience vaut surtout pour les flûtes. Pour les instruments à anche solide, l'accord absolu est moins bon (sur les hautbois, l'accord est à 20 cents près), probablement parce que le couplage anche-tuyau joue sur ces instruments un rôle primordial, et qu'il est imparfaitement décrit dans TUTT. J'ai assez peu abordé la question des instruments à anche lippale, mais sur les quelques trompettes et euphoniums que j'ai examinés, Tutt donne des résultats pourtant tout à fait satisfaisants. Ce sera l'objet de prochaines recherches. En attendant, TUTT peut être utilisé en différentiel pour corriger les gros défauts d'un instrument existant. Un exemple? Même si TUTT prédit assez mal la justesse absolue des hautbois, il peut déjà dire sans trop se tromper de combien il faut élargir le quatrième trou d'un hautbois baroque pour remonter le sol1 de 20 cents, et quelles seront les conséquences de cette modification sur les autres notes de l'instrument. On aura au moins remplacé les tâtonnements sur le tour à bois par des tâtonnements sur écran : c'est plus rapide et moins fatigant!

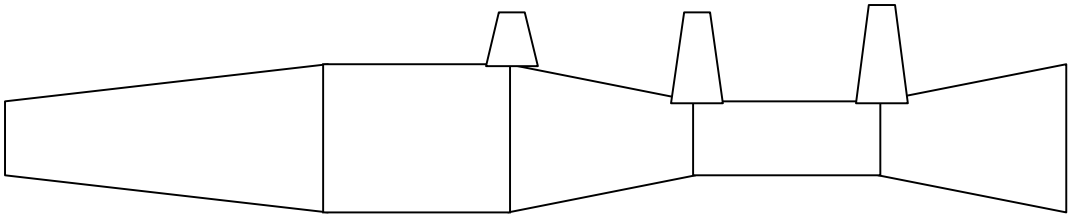
1. Les aspects physiques du modèle, et leur transcription mathématique dans le programme TUTT

Ce que fait le programme

Le programme TUTT est le moteur d'un logiciel de conception et d'analyse d'instruments à vent, bois ou cuivre.
Il calcule l'impédance du système constitué du corps de l'instrument, couplé à une anche ou un jet d'air, pour en déduire ses fréquences de résonance, et sa justesse.
Il calcule aussi les champs de pression et de débit dans le tuyau, pour les fréquences de résonance de l'instrument.
Le programme TUTT analyse ensuite de façon très rudimentaire certaines caractéristiques du timbre de l'instrument.
Il calcule enfin la largeur des champs de liberté de l'instrument (fréquence, volume, etc...), ainsi qu'un critère de satisfaction qui peut éventuellement servir de guide pour la conception de nouveaux instruments possédant des caractéristiques définies à l'avance.

Hypothèses de modélisation

Le corps de l'instrument est décrit comme un ensemble de troncs de cône raccordés les uns aux autres en arête de poisson. Ces troncs de cône peuvent être divisés en deux catégories : ceux de la perce principale (la colonne vertébrale) et ceux des trous latéraux (les arêtes).
Bien sûr, suivant le doigté considéré, les troncs de cône associés aux trous latéraux peuvent être ouverts ou fermés à leur extrémité supérieure. Ce schéma permet de décrire les instruments de type cuivre comme un cas particulier, dans lequel les « trous latéraux » sont de diamètre nul, la perce restant décrite comme une succession de troncs de cône depuis le pavillon jusqu'à la pièce d'embouchure.



L'instrument est décrit comme une succession de troncs de cône

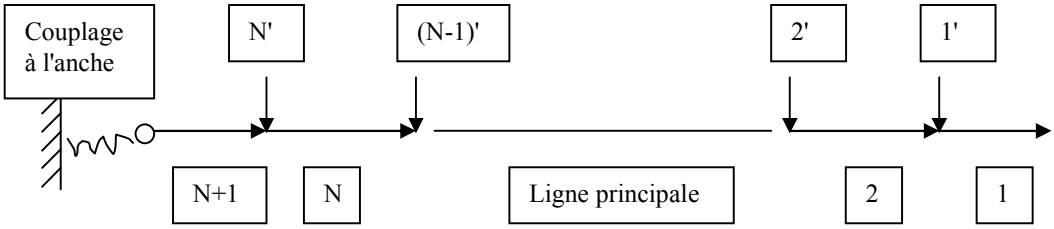


Schéma de tronçonnement de l'instrument. Les tronçons sont numérotés par ordre croissant du bas vers le haut de l'instrument. Les tronçons "primés" correspondent aux trous latéraux.
Les flèches indiquent la direction des abcisses croissantes pour la représentation des champs de pression p(x,t) et de débit w(x,t).
Pour les spécialistes : le N mentionné ici est celui utilisé à l'intérieur du code. Il coïncide avec le N de l'utilisateur pour tous les instruments, sauf pour les flûtes traversières.

Dans le cas d'un instrument à anche solide (hautbois, clarinette ou trombone), ce schéma de tronçonnement est sans ambigüité.
Dans le cas d'une flûte, c'est plus délicat. Dans tous les cas, le trou d'embouchure est considéré comme partie intégrante de la ligne principale, mais il faut distinguer deux cas : celui des flûtes à bec, et celui des flûtes travesrières. Pour une flûte à bec, le trou d'embouchure est considéré comme le dernier tronçon de la ligne principale (c'est donc le tronçon n°N+1), et le bout mort (éventuellement de longueur nulle) est représenté comme le dernier trou latéral (lequel porte le n°N', et est toujours fermé). Pour une flûte traversière, la géométrie est compliquée par la couverture partielle du trou par les lèvres. On décrit cette géométrie en représentant le trou d'embouchure par deux tronçons : l'avant-dernier pour le trou lui-même, et le dernier pour l'ouverture laissée par les lèvres. (Pour les flûtes traversières, ce dernier tronçon est généré automatiquement par le programme). Le bout mort est là encore considéré comme un trou latéral fermé.

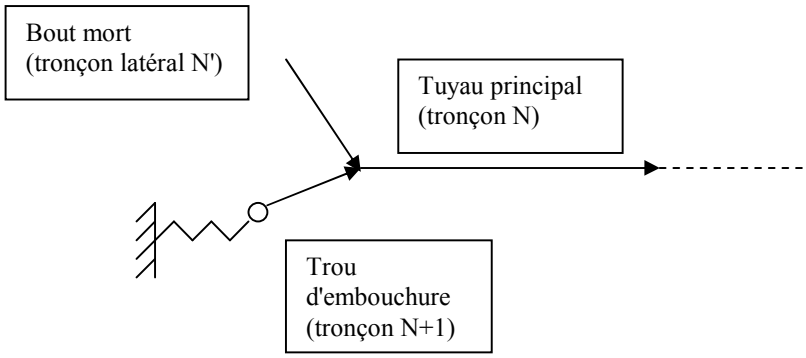


Schéma de la tête d'une flûte à bec, vue par le programme TUTT.

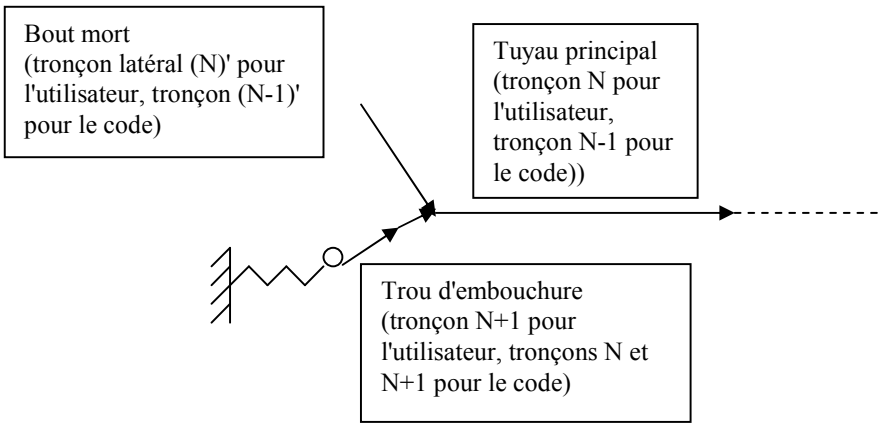


Schéma de la tête d'une flûte traversière, vue par le programme TUTT.

Le programme TUTT possède une table de doigtés qui indique pour chaque doigté quels sont les tronçons latéraux ouverts ou fermés. Chacun de ces doigtés correspond à une note de la tessiture. Le programme TUTT calcule les champs sonores de pression et de débit, ainsi que la fréquences de résonance de l'instrument pour chacun de ces doigtés.

Les champs sonores monochromatiques de pression et de débit dans un tuyau conique peuvent être obtenus à partir des équations de propagation du son. TUTT utilise un algorithme pour calculer les champs sonores dans l'ensemble du réseau de troncs de cône décrivant l'instrument, en tenant compte des conditions de raccordement des champs aux extrémités de ces tronçons.
Ces champs sonores dépendent de la pulsation ω. Or, les pulsations de résonance de l'instrument ne sont pas encore connues (c'est ce qu'on cherche !) Pour les calculer, il faut connaître la fonction impédance de l'instrument, qui elle même est calculée à partir des champs sonores. On a donc affaire à un problème bouclé. Pour le résoudre, le programme TUTT calcule les champs sonores pour toute une série de valeurs de la pulsation ω, et en déduit l'impédance $Z(\omega)$ en fonction de la pulsation. Les pulsations ω_i des modes propres sont ensuite déduites de cette fonction impédance. La pulsation la plus proche de celle attendue pour la note considérée est retenue comme pulsation de résonance, et les champs sonores correspondants à cette dernière, considérés comme représentatifs du mode de vibration de l'instrument, sont recalculés par l'algorithme ci-dessus.
Ce schéma un peu compliqué se traduit par l'organigramme suivant :

Le squelette de TUTT

1. Boucle sur les doigtés. Chaque doigté de la tessiture est étudiée successivement.

2. Boucle sur les pulsations, dans un domaine de pulsations situé autour de la pulsation attendue pour la note considérée.

    Calcul des champs sonores monochromatiques de débit et de pression, pour le doigté et la pulsation considérés (subroutine LTRANS).

2. Fin de la boucle sur les pulsations. L'impédance est désormais connue en fonction de la pulsation.

    Calcul des pulsations de résonance (subroutine ZERO).

    Détermination de la pulsation de résonance la plus proche de celle attendue pour la note considérée. (subroutine PROXI).

    Calcul des champs sonores monochromatiques de débit et de pression, pour la pulsation de résonance (subroutines LTRANS et OPOIL).

Calcul de quelques quantités annexes, caractérisant le mode de vibration étudié : justesse (subroutine SJUS), énergie stockée (subroutine EMISS), puissance sonore rayonnée (subroutines RAYONN et VOLUME), harmonicité des partiels (subroutine TIMBRE), coefficient de surtension du mode (subroutine SURTEN), champs de liberté divers (subroutine LIBRTE), et de critères de satisfaction divers pour la note (subroutine SATIS).

1. Fin de la boucle sur les doigtés. On passe à un autre doigté de la tessiture.

Approximation monodimensionnelle et corrections de longueur

Cas des tuyaux recourbés ou repliés

Certains instruments ont des perces recourbées (trompettes, saxophones) boire repliées (basson). Le logiciel TUTT représente ces instruments comme des tubes droits, par dépliement de la « fibre neutre » de la perce. On peut montrer que cette approximation est excellente dans tous les cas où le rayon de courbure du tube est grand devant le diamètre de la perce, c'est à dire dans tous les cas pratiques (trompette, trombone, saxophone, ..). Le seul cas où l'approximation est légèrement en défaut est celui du basson, où la culasse représente un cas extrême de repliement de la perce. En fait, le basson peut encore être décrit par TUTT comme une perce droite par dépliement de la fibre neutre, à condition d'introduire une petite correction de longueur (de l'ordre du centimètre) au voisinage de la culasse.

Correction de longueur pour un trou latéral

Les tronçons latéraux décrivent les trous latéraux de l'instrument. Chacun de ces trous latéraux est assimilé à un tronc de cône (schéma). Le corps de l'instrument réel occupe un espace à 3 dimensions, mais la description qu'en fait TUTT est monodimensionnelle. En conséquence, les tronçons latéraux ont dans TUTT une longueur différente de leur longueur géométrique. Celle-ci est corrigée pour tenir compte du couplage des champs sonores dans ces trous latéraux avec les champs du tube principal et avec ceux de l'air extérieur au tube, au raccordement de ces ouvertures.

L'approximation monodimensionnelle n'est valable que pour des tuyaux allongés. Heureusement, c'est le cas de pratiquement tous les instruments à vent, sauf au voisinage des pavillons.

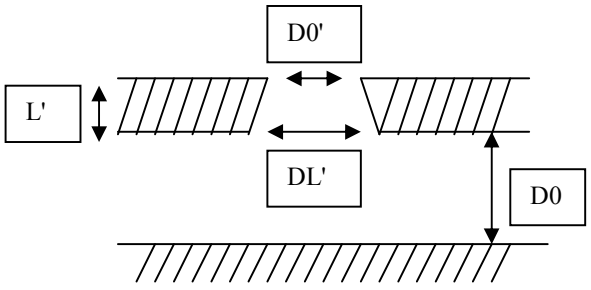


Schéma d'un trou latéral, et des paramètres utilisés pour sa description.

Les corrections de longueur des tronçons latéraux sont calculées *ab initio*, sans aucun paramètre ajustable. Il y a deux contributions (intérieure, extérieure), qui s'expriment de la façon suivante (ref. Nederveen, Acustica 28 (1973) 12) :

$$\Delta l_{out} = 0.35 D0'$$
$$\Delta l_{in} = (DL'_{eff} / 2).(1.3 - 0.9(DL'_{eff} / D0))$$

où DL'_{eff} est un diamètre intérieur effectif, pris égal à :

$$DL'_{eff} = \exp(-L'/DL').\min(D0', DL') + (1 - \exp(-L'/DL')).DL'.$$

Ces corrections de longueur ne s'appliquent qu'aux trous latéraux *ouverts*.

Les corrections de longueur ci-dessus ne sont valables que pour des trous latéraux de diamètre nettement inférieur à celui du tube principal.

Une correction de longueur supplémentaire est aussi prévue dans le cas d'un trou recouvert d'une clé. Cette correction fait intervenir la levée de la clé.

Correction de longueur pour le trou d'embouchure d'une flûte

Le programme TUTT est utilisable pour tous les instruments à vent, mais le cas des flûtes est assez particulier. Dans TUTT, le trou d'embouchure d'une flûte est considéré comme le ou les derniers tronçons de la perce du tube principal, et non comme un trou latéral. Cependant, pour la plupart des flûtes, l'ouverture d'embouchure est en position latérale plutôt qu'axiale. Ceci justifie qu'on lui applique une correction de longueur similaire à celle d'un trou latéral, avec cependant une expression spéciale dépendant de deux paramètres "Lèvres" et "Paremb" pour décrire la couverture des lèvres à l'embouchure, et la variation de cette couverture selon le degré Ndegg de la note dans la tessiture :

$$\Delta l_{emb} = \Delta l_{in} + \Delta l_{out} + (D0/2).(Lèvres.(Ndgg - Ntess/2) + Paremb)$$

Les Δl_{in} et Δl_{out} du trou d'embouchure sont calculées avec les mêmes expressions que pour un trou latéral…sauf que le trou d'embouchure d'une flûte est rarement rond : c'est la dimension axiale du trou qui doit être prise en compte pour calculer la correction de longueur.
Le programme TUTT distingue deux cas : flûtes à bec et flûtes traversières.

- Pour une flûte à bec, les paramètres Lèvres et Paremb sont nuls, et TUTT prend dans les expressions des corrections de longueur ci-dessus la distance lumière-biseau LA0 en lieu et place de $D0'$ et DL'_{eff}.

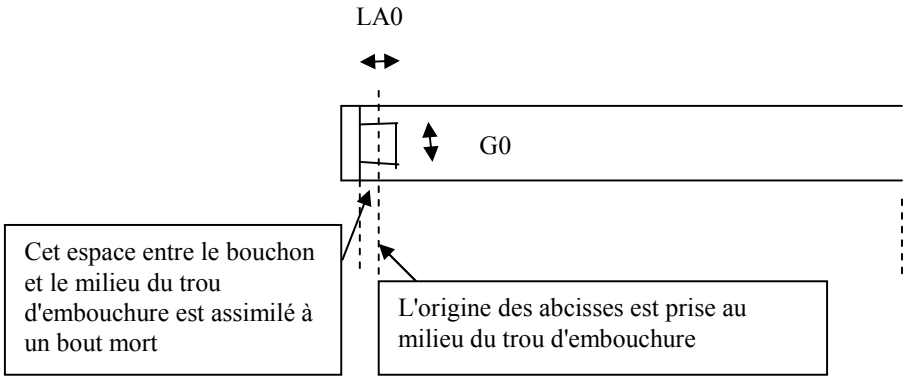
On donnera au tronçon N+1 correspondant au trou d'embouchure un diamètre effectif de surface équivalente à la surface du rectangle LA0*G0, soit

$$\pi.D^2/4 = LA0.G0.$$

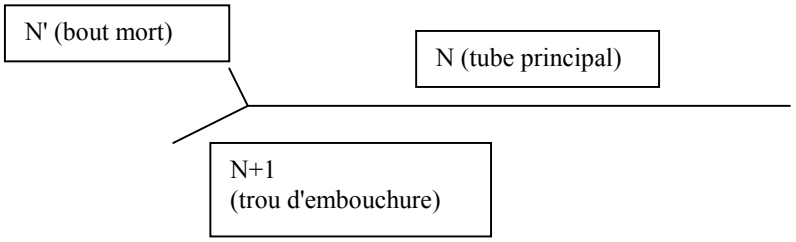
Ceci revient à imposer

$$D0(N+1) = DL(N+1) = \sqrt{\frac{4.LA0.G0}{\pi}}.$$

La hauteur du trou d'embouchure L(N+1) sera elle aussi de l'ordre de la hauteur géométrique (quoique on ait des fits des fréquences absolues légèrement meilleurs avec L(N+1)= 0.8*hauteur géométrique).



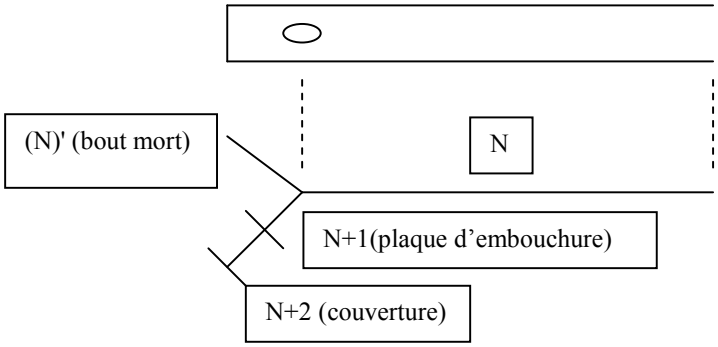
Détail du tronçonnement de l'embouchure pour une flûte à bec



- Pour une flûte traversière, l'embouchure est décrite par deux tronçons. Le premier est associé à la plaque d'embouchure proprement dite. Sa longueur est égale à l'épaisseur géométrique de la plaque, corrigée d'une correction de longueur intérieure Δl_{in} calculée comme pour un trou latéral. Le second est associé à l'espace reliant le trou de la plaque d'embouchure et l'espace extérieur; Le diamètre de ce tronçon est choisi de façon à représenter au mieux la couverture des lèvres à l'embouchure; sa longueur initiale est nulle, mais cette longueur est corrigée d'une correction de longueur extérieure calculée comme pour un trou latéral ouvert, et des deux paramètres *ad hoc* PAREMB et LEVRES (Voir plus loin les valeurs conseillées pour ces deux paramètres, selon le type de flûte). Un troisième paramètre sur lequel l'utilisateur peut jouer pour modifier le diamètre de ce dernier tronçon est DECOUV, proportion de la surface du trou d'embouchure laissée découverte par les lèvres. (DECOUV est à peu près égal à 0.5, d'après mes observations, mais cette valeur dépend de la flûte et de l'instrumentiste).

Tout ça est assez compliqué, mais peut se représenter par le schéma suivant :

Détail du tronçonnement de l'embouchure pour une flûte traversière (le N mentionné ici est celui vu par l'utilisateur, c'est-à dire celui du fichier d'entrée de TUTT).



$$L(N+1) = hauteur\ géométrique\ de\ la\ plaque + \Delta l_{in};$$
$$L(N+2) = \Delta l_{out} + (D0/2).(Lèvres.(Ndgg - Ntess/2) + Paremb).$$

$$D0, DL(N+1) = diamètres\ géométriques\ externes\ et\ \text{int}ernes\ du\ trou\ d'embouchure$$
$$D0, DL(N+2) = D0, DL(N+1).\sqrt{DECOUV}$$

Valeur conseillée pour les paramètres d'embouchure des flûtes traversières :

On a vu que dans TUTT, la description de l'embouchure des flûtes à bec est différente de celle des flûtes traversières (un seul tronçon pour les flûtes à bec, deux tronçons pour les traversières). Cependant, pour simplifier la vie de l'utilisateur de TUTT, le programme génère automatiquement le dernier tronçon de l'embouchure des flûtes traversières, de sorte que la signification des paramètres géométriques dans le fichier d'entrée est identique pour les deux types de flûtes.

Pour le tronçon N+1, prendre pour L(N+1), D0(N+1) et DL(N+1) les dimensions géométriques exactes du trou d'embouchure de la flûte traversière.

Une observation directe montre que les lèvres du flûtiste "moyen" laissent à découvert à peu près la moitié de la surface du trou d'embouchure (un peu plus pour une flûte basse, un peu moins pour un piccolo). En conséquence, nous suggérons de prendre pour le paramètre DECOUV une valeur proche de 0.5, soit DECOUV = 0.35 (Piccolo); 0.40 (flûte en ut); 0.42 (flûte alto en sol); 0.44 (flûte basse).

Le paramètre PAREMB a été déterminé empiriquement, par des mesures de fréquences en jeu, sur un grand nombre de flûtes traversières. Prendre pour PAREMB la valeur 0.9 (flûte basse), 1.0 (flûte alto), 1.2 (Boehm en ut) et 1.4 (piccolo).

Le tronçon N+2 est généré automatiquement, le seul paramètre à choisir est DECOUV, proportion de la surface du trou d'embouchure laissé découvert par les lèvres

Le paramètre LEVRES a aussi été déterminé expérimentalement. Il semble dépendre de l'instrumentiste. Une valeur raisonnable est –0.01.

Propagation du son et champs sonores

Pour une onde monochromatique de pulsation ω, les champs sonores dans un tronc de cône peuvent s'exprimer sans aucune approximation en fonction de deux paramètres complexes A et B :

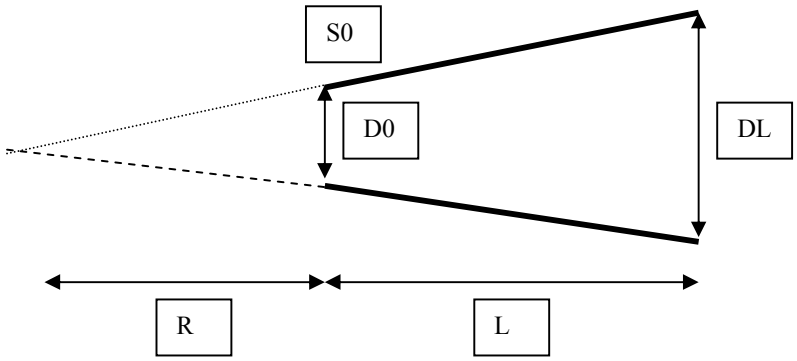
$$p(x,t) = \frac{1}{1+\Delta.x}.(A.e^{ikx} + B.e^{-ikx}).e^{i\omega t}$$

$$w(x,t) = (-\frac{S0}{i\omega\rho_A}).\left[A.(ik + \Delta.(ikx-1)).e^{ikx} - B.(ik + \Delta.(ikx+1)).e^{-ikx}\right]e^{i\omega t}$$

pour le champ de pression et de débit respectivement.

Dans ces expressions, S0 est la section du tronçon à son origine, et Δ est la conicité du tronçon :

$$\Delta \equiv \frac{DL - D0}{D0.L} \equiv \frac{1}{R}\,.$$



La constante de propagation du son

Les pertes viscothermiques liées à la propagation du son dans le tuyau sont prises en compte via l'utilisation d'une constante de propagation du son complexe (formule de Kirchhoff, ref.Mason, Proc. Roy. Soc) :

$$k = \frac{\omega}{329.95 + 0.69T}(1 + \mathrm{Provi} - i.\mathrm{Provi})\,,$$

où T est la température de l'air en °C.
On suppose l'air saturé en humidité. Cette dernière hypothèse est ambigüe car le taux d'humidité dépend lui-même de la température; En outre, l'hypothèse est contestable, car la colonne d'air n'est pas nécessairement saturée sur toute sa longueur dans le cas d'un instrument très long.
La température dans le tronçon est obtenue en supposant un profil de température décroissant exponentiellement le long du tube principal, depuis la température Ta en tête du tube (au niveau de l'embouchure) jusqu'à Tb (température ambiante). La longueur de décroissance du profil a été prise égale à 0.25 m.

La constante k étant complexe, les quantités p et w des champs sonores le sont aussi. Les grandeurs physiques pression et débit sont en fait les parties réelles de p et w.

Les pertes viscothermiques dépendent du diamètre du tube et de son état de surface. Le programme TUTT suppose une constante de propagation k constante dans chaque tronçon, k étant calculé pour le diamètre moyen du tronçon via :

$$\text{Provi} = \frac{\text{Périmètre}.\gamma'}{2.S.\sqrt{2.\omega.\rho_A}}$$

où le paramètre γ' ne dépend que des caractéristiques de l'air (viscosité η, rapport des chaleurs spécifiques γ) :

$$\gamma' = \sqrt{\eta}(1+1.581(\sqrt{\gamma}-1/\sqrt{\gamma}).$$

La valeur numérique de gamma prime est 6.51 e-3 en unités SI, ce qui donne pour un tube de diamètre moyen 10 mm résonant à 2500 rd/s un paramètre Provi de 1.7 e-2.

La rugosité du tube est prise en compte dans l'expression de Provi grâce au paramètre "Ofilib" qui relie le périmètre microscopique du tube à son diamètre macroscopique D :

$$\text{Périmètre} = Ofilib.\pi.D\ .$$

Pour négliger les pertes viscothermiques, il suffit de forcer le paramètre de rugosité Ofilib à zéro dans TUTT.

Algorithme de résolution des équations de propagation

Le champ de pression et de débit est calculé dans le tronçon n° i+1 à partir du champ de pression et de débit dans le tronçon n° i en respectant les conditions de raccordement ci-dessous.

Tout d'abord, on suppose connu p et w au bout du tube, c'est à dire dans le tronçon n° 1 de la ligne principale :

$$p_1 = p(A_1, B_1)$$
$$w_1 = w(A_1, B_1)\ .$$

Les constantes A_1, B_1 sont fixées arbitrairement pour ce premier tronçon, ce qui signifie que les champs de pression et débit dans le tube ne sont déterminés qu'à une constante près. Dans Tutt, on fixe arbitrairement $A_1 = \exp(-ikL_1)$, car cette convention introduit des simplifications de calcul.

Il n'y a en fait qu'une seule constante et non deux, car la condition aux limites à l'extrémité de ce premier tronçon impose une relation entre A1 et B1 : selon que le bas de l'instrument est ouvert ou fermé, on aura respectivement $p_1(L_1) = 0$ (pression nulle) ou $w_1(L_1) = 0$ (débit nul). Dans le premier cas (le plus courant), ceci entraîne : $A_1.\exp(ikL_1) + B_1.\exp(-ikL_1) = 0$.
La valeur arbitraire choisie pour A1 permet alors de tirer B1 et de connaître par conséquent (à un facteur de normalisation près) les champs sonores dans le tronçon n°1 de la perce.

La conservation du débit à un raccord entre tronçons impose :

$$w_2(L_2) + w_1'(L_1') = w_1(0)\ ,$$

où w'$_1$ (L') est le débit dans le tronçon latéral et $w_1(0)$ et $w_2(L)$ les débits au début du tronçon 1 et au bout du tronçon 2 respectivement.

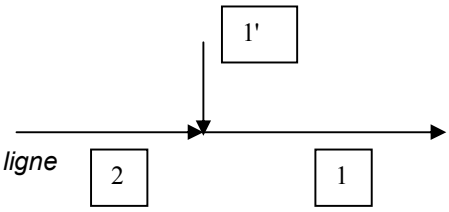


Schéma du bas de la ligne

Cette équation de conservation du débit, ajoutée à l'équation d'identité de la pression au raccord entre les trois tronçons

$$p_1(0) = p_2(L_2) = p'_1(L'_1)$$

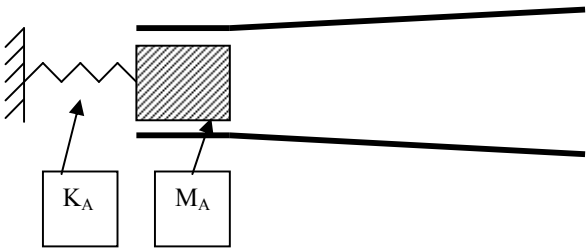
permet de calculer les constantes A et B pour les tronçons 1' et 2.

L'algorithme procède ensuite de la même façon pour calculer les constantes A et B pour les tronçons 2' et 3, puis i' et i+1 en itérant de proche en proche jusqu'à l'embouchure.

Une fois connus les champs de pression et de débit dans le dernier tronçon, il reste à décrire le couplage entre le tube et l'embouchure : anche ou jet d'air (pour une flûte).

L'embouchure

Anche ou jet d'air sont décrits dans TUTT comme une membrane souple fermant l'extrémité du tube, et dont les mouvements sont couplés à ceux de l'air dans le tube. Ladite membrane est assimilée dans TUTT à un oscillateur à un degré de liberté possédant une raideur effective K_A et une masse effective M_A.



Représentation schématique de l'embouchure (anche ou jet d'air)

Paramètres effectifs de l'anche ou du jet d'air

Pour une anche solide, ces paramètres sont ceux d'une lame encastrée, de densité ρ, de longueur l_A, de largeur g, d'épaisseur e et de module d'Young E :

$$M_A = \rho.e.g.l_A / 2$$
$$K_A = 2.E.\alpha^2.e^3.g.l_A^{-3}$$

Dans la pratique, ces paramètres donnent à l'anche « roseau » une pulsation propre beaucoup plus élevée que les pulsations de l'instrument en jeu. Ils font de l'anche solide (roseau ou lèvres) une paroi quasi-rigide au niveau de laquelle on aura (presque) un nœud de vitesse et un ventre de pression.

Pour un jet d'air, les paramètres effectifs du jet sont :

$$M_A = \rho_A.e.g.l_A$$
$$K_A = \alpha^2.V_A{}^2.\rho_A.e.g.l_A{}^{-1}$$

où V_A est la vitesse du jet d'air et ρ_A la densité de l'air.

Dans la pratique, ces paramètres font de l'anche aérienne un "trou" au niveau duquel on aura (presque) un ventre de vitesse et un nœud de pression.

Avec ces paramètres, la pulsation propre de l'anche aérienne est du même ordre de grandeur que la pulsation en jeu. C'est une constatation générale : le flûtiste semble ajuster au mieux les paramètres du jet pour accorder l'anche aérienne sur le tuyau. C'est la raison pour laquelle les logiciels antérieurs ont pu calculer sans trop d'erreur la justesse des flûtes en négligeant le couplage à l'embouchure. La prise en compte de ce couplage ne reste pas moins essentielle si on veut décrire finement le comportement de l'instrument, puisque c'est en faisant varier les caractéristiques du jet d'air que l'instrumentiste règle la justesse, le volume, le timbre, etc…

Couplage à l'embouchure

Le couplage entre le tube et l'oscillateur de l'embouchure (anche ou jet d'air) est décrit par l'équation suivante :

$$a_A = f_c.a_{tube}(0)\,,$$

où a_A et a_{tube} sont les amplitudes du mouvement de l'anche et de l'air dans le tube au voisinage de l'anche. La constante de couplage f_c (complexe) est un paramètre ajustable de TUTT. Une représentation réaliste de l'embouchure impose $f_c \approx 1$. Pour négliger le couplage à l'anche dans TUTT, il suffit d'imposer $f_c = 0$. C'est la valeur recommandée pour les instruments à anche solide, car la forme mathématique du couplage utilisée dans Tutt ne semble convenir que pour les flûtes. Des travaux sont en cours pour trouver une forme de couplage appropriée aux anches solides. En tout état de cause, on obtient pour ces derniers des prédictions de justesse à peu près conformes à l'expérience en considérant les *antirésonances* du système avec f_c=0. Mes récentes élucubrations montrent que pour que cette prescription décrive correctement l'expérience, il faut donner à l'anche un volume effectif plus grand que son volume géométrique. Le volume est celui d'un cylindre de même longueur que l'anche et d'un diamètre $D0_{anche}$ à peu près égal à la *largeur géométrique* de l'anche à son extrémité. Cette prescription permet un excellent accord théorie-expérience pour les instruments à anche roseau. La valeur de $D0_{anche}$ donnant le meilleur accord est donnée dans le tableau ci-dessous.

	$D0_{anche}$ (mm)
Clarinette sib	11
Hautbois moderne	6
Hautbois baroque	6.5
Basson	11
Sax alto	14

Diamètre effectif d'extrémité conseillé pour calculer avec Tutt les instruments à anche roseau

Pour les cuivres, l'accord est tout à fait bon en prenant la prescription f_c=0 avec la géométrie réelle de l'instrument.

Impédance

Un des résultats principaux du programme TUTT est le calcul de l'impédance de l'instrument. C'est à partir de cette fonction que seront déduites la plupart des caractéristiques de l'instrument, et en particulier sa justesse.

Pour calculer l'impédance du système "anche couplée au tube", on suppose que le système est soumis à des oscillations forcées induites par une force extérieure F_{ext} exercée sur l'anche. L'impédance (complexe) du système est définie comme étant le rapport entre la pression exercée sur la face extérieure de l'anche

$$p_A = F_{ext} / S_{N+1}$$

et le débit w_A au niveau de cette dernière

$$w_A = v_{anche} . S_{N+1} .$$

Cette impédance est calculée via l'équation :

$$Z = Z_A + Z_T / f_c ,$$

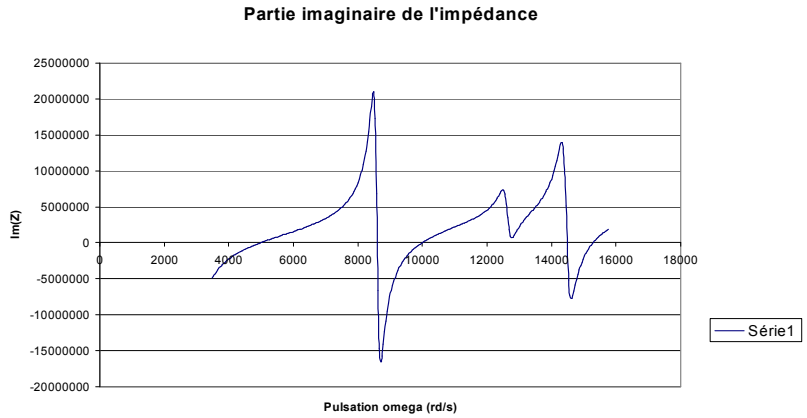
où S_{N+1} est la section du tube principal au niveau de l'anche.

Z_A est l'impédance de l'anche seule :

$$Z_A = i . \frac{(M_A . \omega - K_A / \omega)}{S_{N+1}^{\ 2}} .$$

L'impédance Z_T du tube seul est calculée à partir des champs de pression et de débit à l'extrémité haute du tube, dont le calcul a été exposé plus haut :

$$Z_T = \frac{p_{N+1}(0)}{w_{N+1}(0)} .$$



Allure de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de la pulsation pour le sol grave d'une flûte à bec soprano VanEyck.

Le calcul de l'impédance Z est répété dans TUTT (dans la subroutine LTRANS) pour différentes valeurs de la pulsation ω, de façon à déterminer la fonction complexe $Z(\omega)$ dans un large domaine de pulsation situé autour de la pulsation attendue pour la note considérée.

La partie réelle de l'impédance est elle aussi calculée dans la subroutine LTRANS. Le calcul ne prend en compte que les pertes viscothermiques dans le tuyau.

On peut remarquer que si on néglige la dissipation, la constante de propagation k est réelle, et l'impédance $Z(\omega)$ est imaginaire pure.

Fréquences de résonance du système

On suppose dans TUTT que les pulsations de résonance ω_i de l'instrument (couplé à l'embouchure) sont telles que

$$\mathrm{Im}(Z(\omega_i)) = 0 .$$

On peut démontrer que c'est rigoureusement vrai pour des systèmes auto-entretenus dans certains cas particuliers :

1) si la force d'auto-entretien dépend linéairement de l'amplitude de l'anche a et de sa vitesse;

2) pour des vibrations de faible amplitude, ou pauvres en harmoniques, ou chaque fois qu'une composante spectrale domine les autres.

D'autres définitions de la résonance auraient pu être utilisées, mais c'est cette prescription là qui nous a paru à la fois la plus simple et la mieux adaptée au cas particulier des instruments à vent.

Avec cette prescription, le traitement des résonances est le même pour une flûte ou pour un instrument à anche solide :
-Pour une flûte, l'impédance de l'anche seule Z_A est petite devant l'impédance du tube Z_T: les résonances du système couplé anche + tube sont proches des zéros de Im (Z_T), résonances du tube seul. Le couplage à l'anche n'introduit qu'une petite correction[1] sur les fréquences de résonance du système.
-Pour un instrument à anche solide, c'est l'inverse : l'impédance de l'anche seule Z_A est grande devant l'impédance du tube Z_T. Les zéros de Im(Z) sont donc proches des antirésonances du tube seul. Le couplage à l'anche équivaut pratiquement à fermer le tuyau au niveau de l'embouchure.

On peut remarquer que si la dissipation dans le tuyau augmente, la fonction Im($Z(\omega)$) tend à devenir "molle". Pour une dissipation très importante (tuyau très rugueux ou de tout petit diamètre), cette fonction peut ne plus avoir de zéros : en accord avec les observations expérimentales, TUTT prédit alors que l'instrument ne résonne plus.
De façon générale, les résonances proches d'antirésonances correspondent à des modes instables ou difficiles à exciter. L'utilisateur de Tutt pourra utiliser le tracé de la fonction Im($Z(\omega)$) pour vérifier si les résonances qu'il compte utiliser sont suffisamment marquées pour être facilement excitables.

La précision exigible sur l'accord d'un instrument à vent dépend de la surtension du mode considéré. Dans la pratique, cette surtension est de l'ordre de 30 pour les premiers modes, et un peu moins pour les modes supérieurs. La largeur de la bande passante associée est :

$\frac{\Delta f}{f} = Q^{-1} \approx 3\%$, soit à peu près un quart de ton ou 50 cents.

La précision numérique du calcul de fréquence du mode par le programme Tutt est de l'ordre de +-5 cents, ce qui laisse de la marge par rapport à cette limite.

Cette largeur de bande passante permet de spécifier ce qu'on entend par « bon accord » ou « justesse satisfaisante » : à cause de l'amortissement des vibrations dans le tube, les fréquences de résonance sont définies à un quart de ton près (seulement). Par conséquent, une harmonicité entre partiels assurée à 50 cents près doit être considérée comme satisfaisante : il est inutile d'exiger mieux ! Dans le cas de perces rugueuses, cette bande passante s'élargit encore (cf ma note « dissipation et rugosité »)

[1] Cette correction sur la fréquence de résonance sera positive si l'impédance de l'anche est positive, et négative dans le cas contraire. En d'autres termes, le couplage jet-tuyau fait monter la fréquence de résonance du système si la fréquence de résonance du jet seul est supérieure à celle du tube seul; Le couplage jet-tuyau fait baisser la fréquence de résonance du système si la fréquence de résonance du jet seul est inférieure à celle du tube seul.

Choix du mode de vibration

Le spectre des fréquences de résonance étant calculé via la prescription ci-dessus, le programme TUTT choisit le mode dont la fréquence propre est la plus proche de celle qui est attendue (subroutine PROXI).

Autres calculs

Le mode de vibration de l'instrument correspondant à la note étudiée est maintenant déterminé. Sa fréquence propre est calculée, ainsi que ses champs sonores. Le programme TUTT calcule un certain nombre de quantités caractérisant le mode de vibration considéré :

1) *La justesse*
La justesse de l'instrument sur ce mode est comparée à la justesse idéale (au choix, celle d'un tempérament égal à octaves justes, ou celle d'un tempérament égal à quintes justes). L'écart de justesse est exprimé en cents:

$$\Delta(cents) = 1200.\frac{Ln(\omega / \omega_{référence})}{Ln(2)} .$$

2) TUTT calcule aussi *la puissance rayonnée* par les trous ouverts :

$$P_{rayonnée} = \rho_A{}^2.\frac{\omega^2.w^2}{\pi.Cte},$$

$$\text{où } Cte = \sqrt{P_0.\gamma.\rho_A},$$

et où w est le débit au niveau du trou.

TUTT fait la somme incohérente des puissances rayonnées par tous les trous latéraux ouverts, plus celle rayonnée par les extrémités ouvertes. Cette quantité donne une idée du volume sonore de l'instrument pour la note considérée (calcul fait dans la subroutine VOLUME).

3) TUTT calcule aussi le *coefficient de surtension* du mode de vibration étudié, défini comme le rapport entre l'énergie stockée dans le résonateur E et l'énergie dissipée en une période (à 2π près) :

$$Q \equiv \omega.E / P_{dissipée},$$

où $P_{dissipée}$ est la puissance totale dissipée dans le tuyau, c'est-à dire la somme des pertes par rayonnement (évaluées plus haut) et des pertes viscothermiques :

$$P_{dissipée} = P_{rayonnée} + P_{visco},$$

$$P_{visco} = \frac{Re(Z(\omega))}{2}.w_{emb}^2$$

(calcul fait dans la subroutine PERTES).

Quant à l'énergie stockée

$$E = \int \frac{\rho.w^2}{2.S}.dx + \int \frac{S.p^2}{2.P_0.\gamma}.dx,$$

cette dernière est calculée dans la subroutine OPOIL. Cette énergie stockée est une valeur relative, normalisée par le choix arbitraire fait plus haut pour la valeur de la pression dans le tuyau (cf le § « Algorithme de résolution des équations de propagation ».
.

Le calcul de la surtension Q est fait dans la subroutine SURTEN.

4) TUTT calcule aussi la valeur absolue l'énergie stockée dans le résonateur, compte tenu des caractéristiques supposées de l'auto-entretien du son (subroutine EMISS). La puissance générée par l'auto-entretien est une fonction non linéaire de l'énergie stockée dans le résonateur, qu'on suppose de la forme :

$$P_{autoentretien} = f(E) = GA.E - GB.E^2 ,$$

où GA et GB sont deux paramètres libres.

On sait peu de chose sur le mécanisme d'auto entretien du son, mais la paramétrisation ci-dessus est raisonnable : la puissance générée est une fonction d'abord croissante de l'énergie stockée, puis décroissante car le mécanisme d'auto entretien doit avoir une efficacité maximale pour une certaine amplitude dans le tuyau.

La puissance dissipée dans le résonateur peut s'écrire :

$$P_{dissipée} = \omega.E / Q ,$$

où Q est le coefficient de surtension du résonateur sur le mode considéré. La quantité Q est connue, car elle a été calculée par ailleurs en sommant les pertes viscothermiques et les pertes par rayonnement. C'est une grandeur caractéristique du résonateur.

En dehors des régimes transitoires, la puissance dissipée dans le résonateur doit être compensée exactement par la puissance générée par l'auto entretien :

$$P_{autoentretien} = P_{dissipée} ,$$

ce qui détermine l'énergie effectivement stockée dans le résonateur. Encore faut-il que la solution de l'équation ci-dessus corresponde à une énergie stockée positive : si le coefficient de surtension Q est trop petit, l'auto entretien ne peut avoir lieu. Le programme TUTT envoie alors un message d'alarme.

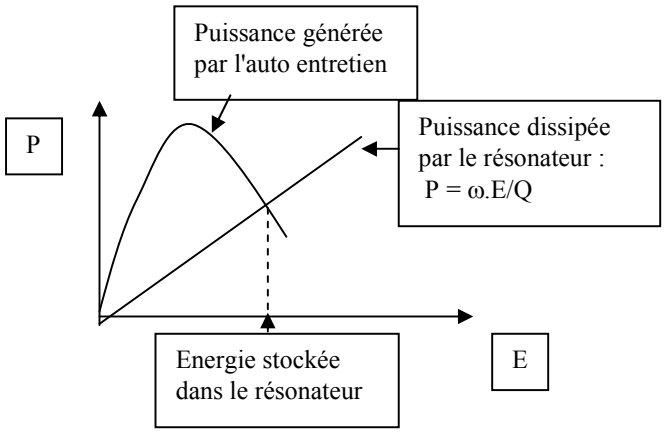


Schéma de l'auto-entretien du son

Critères de satisfaction

Le programme TUTT calcule enfin des critères de satisfaction permettant de caractériser la note étudiée (subroutine SATIS) :

- un critère de satisfaction sur la justesse (SJUS), d'autant plus grand que la pulsation du mode est plus proche de celle attendue dans le tempérament choisi;
- un critère de satisfaction sur le timbre (STIM), d'autant plus grand que les autres modes de vibration permis ont des pulsations proches des multiples de celle calculée pour le mode retenu. Ce critère dit si les harmoniques supérieurs sortiront facilement ou non;
- un critère de satisfaction sur le volume sonore (SVOL), d'autant plus grand que la puissance rayonnée par l'instrument est plus grande;
- un critère de satisfaction sur la largeur des champs de liberté en fréquence, timbre, volume, ... (SLIB).

Un critère de satisfaction global (SCRIT) est ensuite calculé en moyennant les critères de satisfaction partiels ci-dessus, pondérés par des coefficients (CJUS, CTIM, CVOL, CEMI, CLIB) reflétant l'importance qu'on accorde à chacun d'eux.

2. Mode d'emploi du programme TUTT

Ce que fait le programme

Le programme TUTT est le moteur d'un logiciel de conception et d'analyse d'instruments à vent, bois ou cuivre.
Il calcule l'impédance du système constitué du corps de l'instrument, couplé à une anche ou un jet d'air, pour en déduire ses fréquences de résonance, et sa justesse.
Il calcule aussi les champs de pression et de débit dans le tuyau, pour les fréquences de résonance de l'instrument.
Le programme TUTT analyse ensuite de façon très rudimentaire certaines caractéristiques du timbre de l'instrument.
Il calcule enfin la largeur des champs de liberté de l'instrument (fréquence, volume, etc...), ainsi qu'un critère de satisfaction qui peut éventuellement servir de guide pour la conception de nouveaux instruments possédant des caractéristiques définies à l'avance.

La philosophie du programme est la suivante : l'utilisateur fournit les données concernant l'instrument dans le fichier d'entrée du programme sous forme brute : la géométrie de la perce est donnée telle que mesurée, sans aucune correction de longueur. Il y a de la cuisine interne dans le programme : création de nouveaux tronçons (pour les flûtes traversières), calcul de corrections de longueur : tout cela est expliqué en détail dans la présente notice, mais dans la pratique, tout est fait pour que l'utilisateur n'aie pas besoin de s'en préoccuper.

Organigramme du programme TUTT

Lecture du fichier d'entrée TUTT.DAT complet

Calcul des fréquences de la gamme :
call GAMME

Impressions d'en-tête du fichier de sortie TUTT.OUT

Calcul des caractéristiques de la perce (sections, pentes de cônes, etc) :
call PERCE

Boucle sur le degré de la table des doigtés

> Calcul des trous ouverts ou fermés à partir de la table des doigtés :
> call DOIGT
>
> Calcul des corrections de longueur :
> call LCORB (au bout du tube)
> call LCOR (aux tronçons latéraux)
> call LCOREM (à l'embouchure)
>
> Calcul des paramètres de l'anche pour la fréquence de référence :
> call ANCHE
>
> Boucle sur la fréquence autour de la fréquence de référence
>
> > Calcul de la vitesse du son pour la fréquence considérée :
> > call PROPAG

Calcul de l'impédance du sytème pour la fréquence considérée :
call LTRANS

15 Fin de la boucle sur les fréquences

Calcul des zéros de la partie imaginaire de l'impédance :
call ZERO

Choix du mode de vibration :
call PROXI

Calcul de la vitesse du son pour la fréquence du mode de vibration choisi :
call PROPAG

Calcul des paramètres de l'anche pour le mode de vibration choisi :
call ANCHE

Calcul de l'impédance du système pour le mode de vibration choisi :
call LTRANS

Calcul du champ de pression pour le mode de vibration choisi :
call OPOIL

Calcul des dissipations pour le mode de vibration choisi :
call PERTES
call SURTEN

Evaluation de l'auto-entretien du son pour le mode de vibration choisi :
call EMISS

Calcul de la puissance rayonnée pour le mode de vibration choisi :
call VOLUME

Evaluation de l'harmonicité des partiels supérieurs pour le mode de vibration choisi :
call TIMBRE

Evaluation des champs de liberté pour le mode de vibration choisi :
call LIBRTE

Calcul d'un critère de satisfaction global pour le mode de vibration choisi :
call SATIS

14 Fin de la boucle sur le degré de la table des doigtés

Sortie des résultats dans le fichier TUTT.OUT

Liste des sous-programmes utilisés dans TUTT
Un tableau est associé à chaque sous programme. La colonne de gauche contient les arguments en entrée; celle de droite contient les arguments en sortie.

ANCHE
Calcul des paramètres d'oscillateur de l'anche.

omega, G0, LA0, alpha, E0, V0, V1, iflute, rhoa	MA, KA

DOIGT
Calcul des trous ouverts ou fermés à partir de la table des doigtés.

NDEGC, DOIGTE, N	CP

EMISS
Evaluation de l'auto entretien du son pour un mode de vibration donné. EMISS calcule l'énergie ESTOCA réellement stockée dans le résonateur, ainsi qu'un critère de satisfaction SEMI disant si l'auto entretien aura lieu facilement.

Q, omega, GA, GB	ESTOCA, SEMI

GAMME
Calcul des fréquences théoriques de toutes les notes de la tessiture de l'instrument. Ce programme donne en sortie le tableau des fréquences et pulsations des notes à étudier.

FLA, ITMPNT, NTESSG, NTESSB	FGAMME, OMEGAM

LCORB
Calcul de la correction de longueur au bout du tube.

L1, C1, DL1	DCL1

LCOR
Calcul des corrections de longueur pour les tronçons latéraux.

LP0, CP, D0P, DLP, N, D0, DL, ISTYLE LEVEE	LP

LCOREM
Calcul des corrections de longueur à l'embouchure (interne et externe).

NDEG, NTESS, IFLUTE, D0N, DLN, D0NP1, DLNP1, DTUBE, LCHEM, LEVRES, PAREMB	CLINT, CLOUT

LIBRTE
Evaluation des champs de liberté de l'instrument sur le mode de vibration choisi.

MA, KA, FCM, FCP, CLOUT, OMEGA, PENTE, N, A, B, AP, BP, S, SP, K, L, LP, PEMB, WEMB, DMA, DKA, DFCM, DFCP, DCLOUT, CTE, RHOA	SLIB

LTRANS
Principal sous-programme de TUTT, LTRANS résout les équations de propagation du son dans le réseau de troncs de cône décrivant l'instrument, et calcule les champs sonores et l'impédance du réseau pour une pulsation donnée.

N, CP, C1, L, LP, S, SP, DELTA, DELTAP, K, RHOA, OMEGA, MA, KA, FCM, FCP	A, B, AP, BP, PEMB, WEMB, ZRV, ZIM

OPOIL
Calcul du champ de pression dans le tube principal, et de l'énergie stockée dans le résonateur, pour un mode de vibration donné.

Omega, L, A, B, N, K, DELTA, S, NB, P0, GAMMA, RHOA, WEMB, PEMB	XABS, PRESS, DEBIEM, PRESEM, ESTOCN

PERCE
Calcul des caractéristiques de la perce (sections, pentes de cônes, etc…).

N, L, LP0, D0, DL, D0P, DLP	S, SP, DELTA, DELTAP

PERTES
Calcul de la dissipation pour un mode de vibration donné; Calcul de la partie réelle de l'impédance; Calcul des pourcentages relatifs des pertes viscothermiques et des pertes par rayonnement.

Omega, L, A, B, AP, BP, N, K, DELTA, DELTAP, S, SP, RHOA, ZRV, CTE, PUITOT	ZRE, PCR, PCV

PROPAG
Calcul de la constante de propagation du son pour une fréquence donnée.

ETA, RHOA, GAMMA, OMEGA, N, L, TT, TB, OFILIB, D0, DL	K

PROXI
Pour savoir quel est le réel d'une liste de nombre réels le plus proche d'un réel de référence donné. PROXI calcule aussi l'écart relatif entre ce réel et le réel de référence.

OREF, OTAB, NTAB	NTUBE, CENTS, SJUS, OTUBE

RAYONN
Calcul de la puissance rayonnée à travers les trous ouverts de l'instrument.

Omega, L, A, B, AP, BP, N, K, DELTA, DELTAP, S, SP, RHOA, CTE	PUIRAY

SATIS
Calcul d'un critère de satisfaction global pour une note, correspondant à un mode de vibration donné, sur un doigté de l'instrument.

SJUS, STIM, SVOL, SEMI, SLIB, CJUS, CTIM, CVOL, CEMI, CLIB, PRAISO, ERAISO	SCRIT

SURTEN
Calcul du coefficient de surtension du résonateur, sur un mode donné.

P, E, Omega	Q

TIMBRE
Evaluation de l'harmonicité des partiels supérieurs pour le mode de vibration choisi. Calcul d'un critère de satisfaction sur la richesse du timbre.

Omega, OTAB, NTAB	STIM

VOLUME
Calcul de la puissance totale rayonnée par l'instrument (normalisée par le mécanisme d'auto entretien); calcul d'un critère de satisfaction sur le rendement sonore de l'instrument sur une note donnée.

PUITOT, ESTOCN, ESTOCA	PCR, PRAYA, SVOL

ZERO
Calcul des zéros d'une fonction.

M, AB, OR	NZ, RESU, PENTE

Structure du fichier d'entrée TUTT.DAT

Le programme TUTT utilise le fichier d'entrée TUTT.DAT (dans la version actuelle, il s'agit plus exactement du fichier TUTT25.DAT), qui contient toutes les données concernant l'instrument :
- données géométriques sur la perce, position et diamètre des trous latéraux;
- table des doigtés;
- données concernant l'embouchure.

Toutes les unités utilisées dans ce fichier sont les unités du Système International (MKS)

Le fichier d'entrée comprend :

- Une ligne de titre pour décrire l'instrument.

- Une ligne donnant les paramètres physiques de l'air, avec entre autres ρ_a (densité de l'air), P_0 (pression atmosphérique), $\gamma = C_p/C_v$ (rapport des capacités calorifiques), C_v (capacité calorifique à volume constant), η (viscosité). Cette ligne est là pour mémoire car, sauf cas exceptionnel, l'utilisateur n'aura pas à y toucher.

- Une ligne donnant N (nombre de tronçons du tube principal, moins 1; Pour les flûtes, le tronçon n° N+1 est consacré au trou d'embouchure, considéré comme partie intégrante de la ligne principale);

Six lignes décrivant la perce du tube principal :
- Une ligne donnant C1, entier qui dit si le bas du tube est ouvert ou fermé (0=ouvert, 1=fermé);
- Une ligne donnant la liste D0 des diamètres des débuts de chaque tronçon du tube (N+1 valeurs);
- Une ligne donnant la liste DL des diamètres des fins de chaque tronçon du tube (N+1 valeurs). (Ne pas oublier que le trou d'embouchure des flûtes est assimilé dans TUTT à la fin du tube principal : tronçon N+1 pour une flûte à bec, tronçons N et N+1 pour une flûte traversière);
- Une ligne donnant le rapport OFILIB entre la surface libre réelle de la perce et la surface libre « macroscopique » (ce tableau caractérise la rugosité de la perce; il y a autant de valeurs que de tronçons de la perce +1, soit N+1);
- Une ligne donnant la longueur L de chaque tronçon de la perce (N+1 valeurs);
- Une ligne donnant la température de l'air en haut du tube, et la température ambiante (2 valeurs).

Cinq lignes décrivant les trous latéraux :
- Une ligne donnant les diamètres D0P des débuts des cheminées latérales (N valeurs);
- Une ligne donnant les diamètres DLP des fins des cheminées latérales (N valeurs);
- Une ligne donnant les hauteurs LP des cheminées latérales (N valeurs);
- Une ligne décrivant le styles des clés recouvrant les trous latéraux (N valeurs)(Pas de clé = 0; plateau creux = 1; plateau plein = 2);
- Une ligne donnant la levée de chaque clé, c'est à dire la hauteur de la clé levée au dessus de la cheminée (N valeurs).

Remarque : le programme suppose l'existence d'un trou latéral à chaque changement de tronçon. Pourtant, un changement de conicité de la perce s'accompagne d'un changement de tronçon, mais pas nécessairement d'un « vrai » trou latéral. Dans ce cas, on peut mettre DOP, DLP et LP à zéro, ce qui décrit une cheminée de diamètre et de hauteur nulles. Dans ce cas, le style et la levée de la « clé » correspondante n'ont évidemment aucune signification, et on peut mettre n'importe quelle valeur dans la ligne correspondante.

- Une ligne donnant la fréquence du « la » de référence.

- Une ligne qui fixe le choix du tempérament de référence (tempérament égal à octaves justes = 1, tempérament égal à quintes justes = 0).

- Une ligne décrivant la tessiture de l'instrument : NTESSC ≡ nombre total de notes étudiées (avec des configurations de doigtés différentes ou non) ; NTESSG ≡ nombre de demi-tons contenus dans la

tessiture ; NTESSB ≡ nombre de demi-tons au dessous du « la » de référence pour la note la plus grave de la tessiture. On suppose habituellement que les notes de la tessiture s'échelonnent par demi-tons ascendants, mais ce n'est pas obligatoire : en fait, TUTT accepte que les doigtés étudiés soient rangés de façon quelconque.

- Une table de doigtés, avec autant de lignes que de doigtés étudiés (NTESSC), et autant de colonnes que de trous latéraux, que ces « trous latéraux » soient réels ou correspondent seulement à un changement de conicité de la perce (N colonnes). Le code est le suivant : Tronçon latéral ouvert = 0; tronçon latéral fermé = 1. On peut faire étudier au programme TUTT plusieurs doigtés alternatifs pour le même degré de la gamme. Chaque ligne du tableau correspond à une note et à un doigté. On donne sur cette même ligne le nom de la note, et le degré de la tessiture auquel il se rapporte. On donne aussi la justesse expérimentale de l'instrument (en cents par rapport au « la » de référence) pour la note et le doigté considéré. On range habituellement les notes à étudier du grave vers l'aigu mais ce n'est pas indispensable.

Deux lignes de données concernant l'embouchure :

- Une ligne donnant les paramètres IFLUTE, FCM, FCP, G0; LA0, ALPHA, V0, V1, LEVRES, PAREMB et DECOUV.

IFLUTE = 0 pour une embouchure de flûte à bec; -1 pour une embouchure de flûte traversière (anches aériennes); 1 pour une anche solide; 2 pour un instrument de type cuivre.
FCM, FCP sont des paramètres de couplage tube-anche (voir les détails dans le chapitre 1 « formalisme »). Pour faire simple, disons que si FCM = 0., il n'y a pas de couplage à l'anche. FCM est le module du coefficient complexe du couplage tube-anche ; FCP est sa phase (en radian). Le couplage « nominal » pour une flûte est obtenu pour FCM = 1 (cf chapitre1 : couplage à l'embouchure), FCP = 0. Pour une anche solide, il est actuellement recommandé de considérer les antirésonances du système, et de négliger le couplage à l'anche (FCM = 0).
G0 est la largeur du jet ou de l'anche;
LA0 est la longueur vibrante du jet ou de l'anche;
V0, V1 décrivent la vitesse du jet (pour une anche aérienne) ou le module élastique de l'anche (pour une anche solide).
LEVRES et PAREMB définissent une correction de longueur à l'embouchure (cf chapitre 1 : approximation à une dimension et correction de longueur).
DECOUV est la proportion de la surface du trou d'embouchure laissée découverte par les lèvres (paramètre utilisé uniquement pour les flûtes traversières, c'est à dire quand IFLUTE = -1).

Voici les paramètres d'embouchure recommandés pour calculer différents types de flûtes avec TUTT:

	FCM	FCP	G0	LA0	Alpha	E0	V0	V1	Lèvres	Paremb	Decouv
Piccolo Boehm en ut	1.	0.	9.e-3	5.e-3	2.	5.e-4	30.	12.	-0.01	1.4	0.35
Traversière Boehm en ut	1.	0.	1.e-2	7.e-3	2.	6.e-4	20.	9.	-0.01	1.2	0.40
Traversière Boehm alto en sol	1.	0.	1.1e-2	8.e-3	2.	8.e-4	14.	6.	-0.01	1.	0.42
Traversière Boehm basse	1.	0.							-0.01	0.9	0.44
Traverso baroque	1.	0.	9.e-3	6.e-3	2.	6.e-4	15.	9.	-0.01	1.2	0.6
Flûte à	1.	0.	1.e-2	3.5e-3	2.	9.5e-4	11.	5.	0.	0.	-

bec soprano											
Flûte à bec alto	1.	0.	1.1e-2	5.e-3	2.	5.e-4	11.	5.	0.	0.	-
Flûte à bec contrebasse	1	0		7.e-3	2.	5.e-4	6.	3.	0.	0.	-

- Une ligne définissant le champ de liberté accessible sur les paramètres de l'anche.
- Une ligne donnant GA, GB, paramètres concernant l'auto-entretien (cf chapitre 1, autres calculs).
- Une ligne donnant les coefficients de pondération de l'importance relative de la justesse, du timbre, du volume, de la facilité d'émission et de la largeur des champs de liberté, dans la définition d'un critère de satisfaction global pour un doigté donné (cf chapitre 1, critères de satisfaction).

Exemple de fichier d'entrée du programme TUTT
On donne ici l'exemple d'un fichier d'entrée de Tutt correspondant à une flûte à bec soprano. D'autres exemples correspondant à d'autres types d'instruments sont donnés au chapitre suivant.

Les commentaires sont en italique.

Flûte à bec vanEyck soprano, trous cylindriques (doigté scolaire).
(C'est la ligne de titre).

PARAMETRES PHYSIQUES DE L' AIR :RHOA,P0,GAMMA, CV, ETA, TONEW,DLAMBA
1.204 1.014E5 1.400 719. 1.8E-5 11.7 2.4E-2
(ρ_A est la densité de l'air; P_0 est la pression atmosphérique; Cv est la chaleur spécifique de l'air; η est la viscosité de l'air, Tonew ne sert à rien, et λ est la conductivité thermique de l'air. On ne doit rien changer dans cette ligne).

NOMBRE DE TRONCONS DE LA LIGNE (-1) N
13
(Ici, le tube principal est divisé en 13 troncs de cône, plus 1 pour décrire l'embouchure).

BAS DE LIGNE OUVERT OU FERME C1 (0=OUVERT, 1=FERME)
0.
(Ici, le bas du tube est ouvert)

TABLEAU PERCE D0 (DIMENSION N+1)
1.24E-02 1.24E-02 1.27E-02 1.29E-02 1.31E-02 1.36E-02 1.40E-02
1.40E-02 1.43E-02 1.44E-02 1.44E-02 1.50E-02 1.50E-02 6.86E-03
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus proche de l'embouchure;
Le dernier chiffre, ici 6.86 e-3, est le diamètre équivalent du trou d'embouchure au niveau de l'extérieur du tuyau).
Attention : mettre D0 = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TABLEAU PERCE DL (DIMENSION N+1)
1.24E-02 1.24E-02 1.24E-02 1.27E-02 1.27E-02 1.31E-02 1.36E-02
1.40E-02 1.41E-02 1.43E-02 1.44E-02 1.44E-02 1.50E-02 6.86E-03
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus loin de l'embouchure; Le dernier chiffre, ici 6.86 e-3, est le diamètre équivalent du trou d'embouchure au niveau de son raccordement avec l'intérieur du tuyau). Pour les flûtes à bec, le trou d'embouchure est en général rectangulaire. Or, Tutt ne considère que les trous circulaires. Pour décrire l'embouchure des flûtes à bec, l'utilisateur devra rentrer dans TuTT le diamètre d'un trou circulaire de même surface que celle du rectangle du trou d'embouchure.

TABLEAU SURFACE LIBRE DE LA PERCE/SURFACE OFFICIELLE OFILIB (DIM N+1)
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 *(ce chiffre 2 caractérise la rugosité de la perce. Ici, on a supposé ici que la surface libre de la perce était 2 fois plus grande que la surface d'un tube à parois lisses de mêmes dimensions. Valeur recommandée : 1.5 pour du métal, 2 pour du bois poli.).*

TABLEAU DES TRONCONS DE LA LIGNE PRINCIPALE L (DIMENSION N+1)
5.15E-02 1.00E-04 2.90E-02 1.00E-04 1.80E-02 2.15E-02 2.41E-02
2.10E-02 2.00E-02 8.00E-03 1.00E-04 2.80E-02 6.00E-02 1.50E-03
(Ce sont les longueurs des tronçons du tube principal; Le dernier chiffre, ici 1.5 e-3, est la hauteur du trou d'embouchure);
Attention : mettre L = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TEMPERATURE DE L' AIR EN TETE? ET TEMPERATURE AMBIANTE(CELSIUS) TT TB
25. 20.
(Ici : Température = 25°C près de l'embouchure, et 20°C dans la pièce).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX D0P (DIMENSION N)
3.80E-03 5.50E-03 4.20E-03 4.70E-03 6.50E-03 6.50E-03 6.90E-03
6.50E-03 5.50E-03 5.20E-03 3.50E-03 0.00E+00 1.53E-02
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de la face externe du tube; Le dernier chiffre, ici 1.53 e-3, est le diamètre du bout mort au niveau de son extrémité)

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX DLP (DIMENSION N)
3.80E-03 5.50E-03 4.20E-03 4.70E-03 6.50E-03 6.50E-03 6.90E-03
6.50E-03 5.50E-03 5.20E-03 3.50E-03 0.00E+00 1.53E-02
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de l'intérieur du tube; Le dernier chiffre, ici 1.53 e-3, est le diamètre du bout mort au niveau de son raccordement avec le tube principal)

TABLEAU LONGUEUR DES TRONCONS LATERAUX LP0 (DIMENSION N)
4.10E-03 4.10E-03 3.80E-03 3.80E-03 3.55E-03 3.65E-03 3.70E-03
4.00E-03 4.30E-03 4.50E-03 4.50E-03 0.00E+00 2.00 E-03
(C'est la hauteur des cheminées des trous latéraux, ou l'épaisseur de la paroi du tube, si le trou est percé perpendiculairement à l'axe du tube. Le dernier chiffre, ici 2.mm, est la longueur du bout mort).

TABLEAU STYLE DES CLES ISTYLE (DIMENSION N)
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
(Ces zéros signifient qu'il n'y a pas de clés sur la flûte à bec décrite ici).

TABLEAU LEVEE DES CLES LEVEE (DIMENSION N)
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

FREQUENCE DU LA DE REFERENCE FLA
440.
(La 440 : voilà le diapason)

Tempérament de reference ITMPNT (0 si teqj, 1 si teoj)
1
(La justesse de chaque note sera jugée par rapport à un tempérament égal à octaves justes)

TESSITURE NTESSC, NTESSG, NTESSB
26 25 -3
(Ici, on étudie 26 doigtés différents, et la tessiture de l'instrument comprend 25 notes. Il y a plus de doigtés étudiés que de degrés de la gamme, car il y a deux doigtés alternatifs pour une même note; La note la plus basse est le do2, soit 3 demi-tons au dessus du La1 de référence).

TABLE DES DOIGTES DOIGTE(I,J) (NTESSC LIGNES, N COLONNES)
Chaque ligne du tableau correspond à une note de la tessiture; L'avant-dernier nombre de la ligne rappelle son numéro dans le tableau, le dernier donne le numéro du degré de la gamme auquel il correspond.
Chaque colonne du tableau correspond à un trou latéral : 1 = trou fermé, 0 = trou ouvert.
On a représenté ici le trou du pouce comme un trou double, puisque certains doigtés de la flûte à bec imposent de le fermer à moitié.
On notera qu'ici, les deux derniers trous latéraux n° N-1 et N sont toujours fermés : ce ne sont pas des trous de jeu, mais simplement des raccordements entre tronçons du tube principal.
On remarquera les deux doigtés alternatifs pour le fa#1.
Le chiffre du tableau situé juste après le nom de la note (3ème avant la fin de chaque ligne) donne la justesse expérimentale de l'instrument pour le doigté correspondant (C'est la justesse expérimentale, mesurée sur la flûte Vaneyck avec un accordeur électronique, en prenant soin de se placer pour chaque note aussi près que possible du milieu du champ de liberté en fréquence. Ces chiffres expérimentaux sont destinés à être comparés avec les prédictions de TUTT). Si l'instrument n'a pas été fabriqué, et si sa justesse expérimentale n'a pas été mesurée, mettre ici une valeur réelle quelconque, par exemple 100.

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'do ' 4. 1 1

0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	'do#	' 100.	2	2
0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	'ré	' 9.	3	3
0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	'ré#	' 100.	4	4
0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1	'mi	' 10.	5	5
1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1	'fa	' 100.	6	6
0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1	'fa#	' 100.	7	7
1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1	'fa#2	' 100.	8	7

On notera que la table des doigtés comprend deux doigtés alternatifs pour le fa#, respectivement numérotés 7 et 8 dans la table des doigtés, mais qui correspondent tous deux au 7è degré (demi-ton) de la tessiture

0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1	'sol	' 1.5	9	8
0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1	'sol#	' 100.	10	9
0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1	'la	' 0.	11	10
0 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1	'la#	' -20.	12	11
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1	'si	' -10.	13	12
0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1	'do	' -8.	14	13
0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1	'do#	' -8.	15	14
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1	'ré	' 1.5	16	15
0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1	'ré#	' -5.	17	16
0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1	'mi	' 6.	18	17
0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1	'fa	' -12.	19	18
0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1	'fa#	' 100.	20	19
0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 1 1	'sol	' 8.	21	20
0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1	'sol#	' -12.	22	21
0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1	'la	' -4.	23	22
0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1	'la#	' -6.	24	23
0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 1	'si	' -30.	25	24
0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 1	'do	' -40.	26	25

DONNEES CONCERNANT L' EMBOUCHURE

IFLUTE	FCM	FCP	G0	LA0	alpha	E0	V0	V1	LEVRES	PAREMB	DECOUV
0	1.	0.	1.0e-2	3.7e-3	2.	9.e-4	11.	5.	0.	0.	1.

(Ici, IFLUTE = 0 nous dit qu'on a affaire à une flûte à bec. Ce paramètre n'est utilisé que pour calculer la correction de longueur à l'embouchure;
FCM =1, FCP = 0 sont les paramètres de couplage entre l'anche aérienne et le tuyau;
G0 est la largeur de l'anche aérienne : la largeur du jet est ici de 1 cm;
LA0 est la longueur de l'anche aérienne : la distance lumière-biseau est ici de 3.7 mm;
Alpha est un paramètre permettant d'ajuster finement la raideur de l'anche aérienne. La valeur recommandée pour toutes les flûtes est alpha = 2;
E0 est l'épaisseur de l'anche aérienne, ici 0.9 mm;
V0 et V1 sont les paramètres qui définissent la vitesse du jet d'air : ici, la vitesse moyenne est de 11 m/s et les vitesses extrêmes sont environ 11-5 = 6m/s pour la note la plus grave et 11+5 = 16 m/s pour la note la plus aigüe.
LEVRES et PAREMB sont des paramètres qui décrivent la couverture de l'embouchure par les lèvres pour une flûte traversière. Comme on a affaire ici à une flûte à bec le programme néglige ces deux paramètres.
DECOUV n'est pas utilisé pour les flûtes à bec. On donne ici une valeur quelconque à ce paramètre.

LIBERTE SUR LES PARAMETRES DE L' ANCHE DMA DKA DFCM DFCP DCLOUT

DMA	DKA	DFCM	DFCP	DCLOUT
0.1	0.1	0.1	0.	0.

(Tous ces paramètres servent à définir la liberté dont dispose l'instrumentiste pour faire varier les paramètres de l'anche et les paramètres de couplage anche-tuyau. Ce sont des variations relatives des paramètres MA,KA FCM et CLOUT que l'instrumentiste peut réaliser autour de leurs valeurs nominales. Ici, on a supposé 10% de liberté sur la masse effective et la raideur effective du jet (DMA = DKA = 0.1), et 10% sur la constante de couplage jet-tube (DFCM = 0.1). La quantité DFCP est une variation absolue de la constante de couplage anche-tuyau. On a supposé aussi DCLOUT = 0, soit 0% de liberté sur la

correction de longueur à l'embouchure (normal, pour une flûte à bec!). TUTT utilise ces paramètres pour calculer les champs de liberté de l'instrument.

DONNEES CONCERNANT L' AUTO ENTRETIEN GA GB
700. 1.

(Ces paramètres décrivent la relation non linéaire entre la puissance générée par l'auto entretien de l'oscillation, et l'énergie stockée dans le résonateur. GA et GB fixent l'amplitude des champs sonores dans le tuyau. Faute d'une connaissance détaillée du mécanisme d'auto entretien, la valeur de ces paramètres est actuellement très pifométrée. Les recherches sont en cours!).

COEFFICIENTS SUR LES CRITERES DE SATISFACTION CJUS CTIM CVOL CEMI CLIB
1. 0. 0. 0. 0.

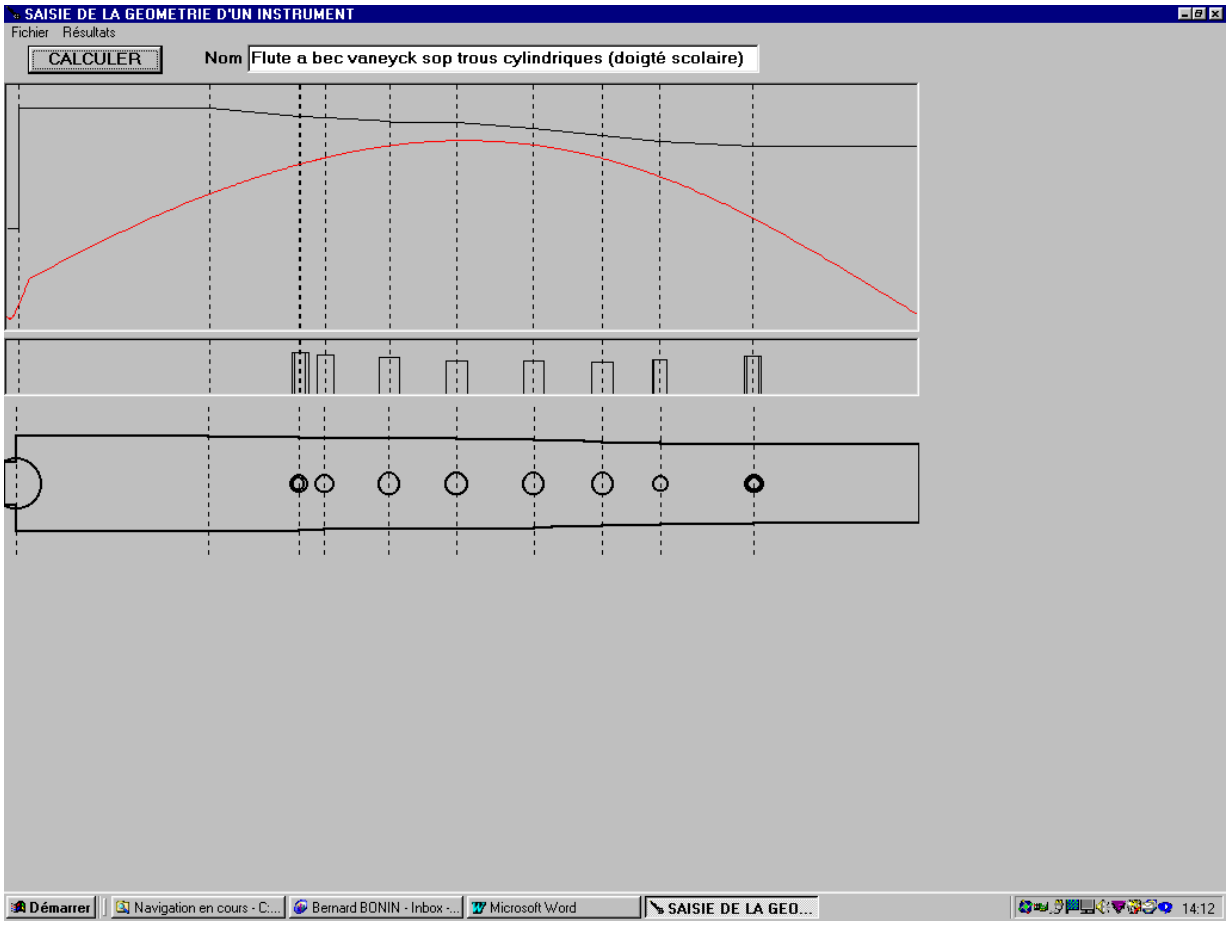
(Le critère de satisfaction global repose ici exclusivement sur la justesse : CJUS = 1; Les autres critères (timbre, volume, facilité d'émission, largeur des champs de liberté) ont un coeficient de pondération nul, c'est à dire qu'ils comptent pour du beurre!).

Fonctionnement du programme TUTT

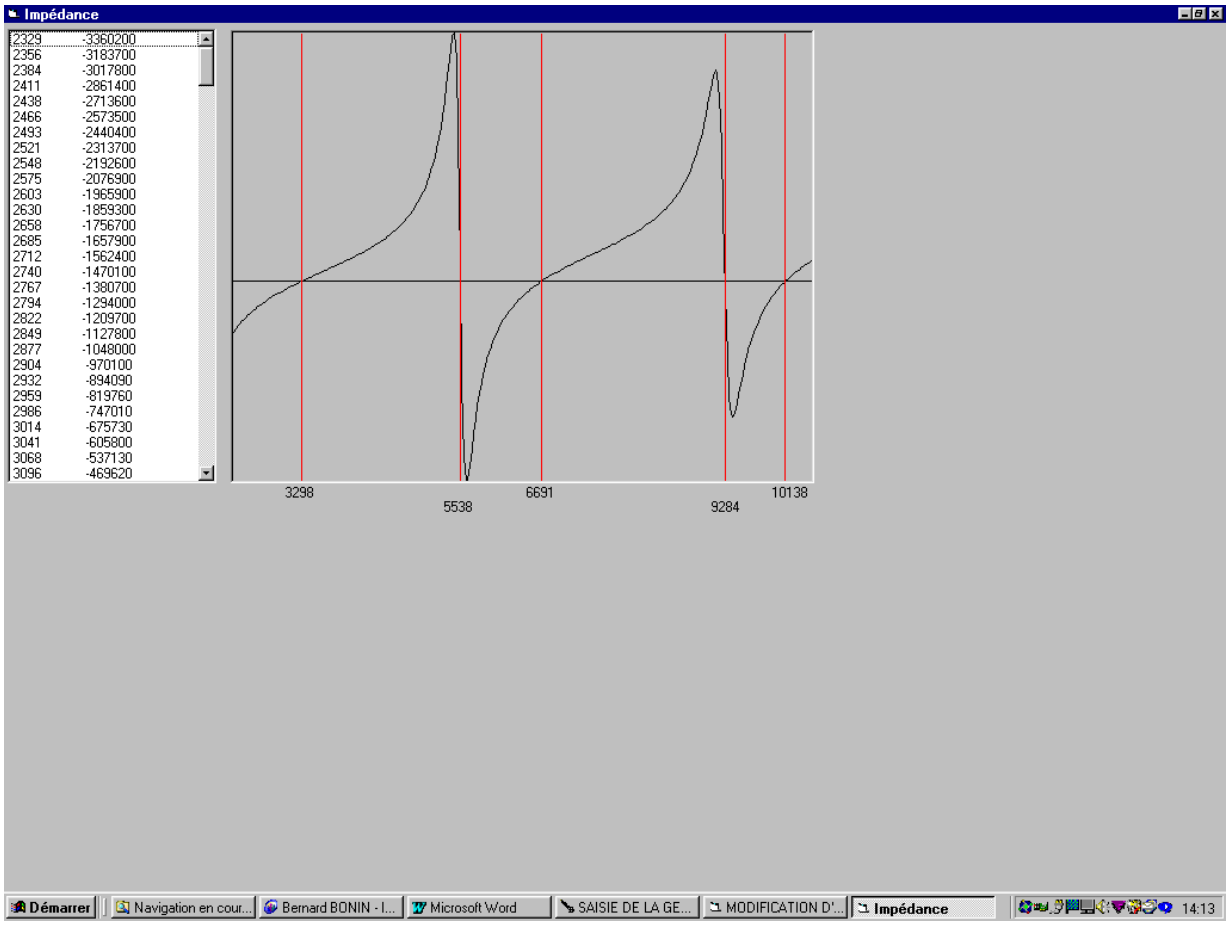
Le programme TUTT peut fonctionner tout seul ou à partir du logiciel TUTTEDIT, qui lui-même contient et appelle TUTT. Cette deuxième possibilité est de loin la plus conviviale, et c'est celle que nous recommandons. Toutefois, si vous tenez vraiment à faire fonctionner TUTT tout seul, il suffit d'ouvrir une fenêtre DOS, de se placer dans le répertoire contenant le programme exécutable, appelé ANCHE4.EXE, et de le lancer en tapant : ANCHE4. L'exécutable ira chercher le fichier d'entrée Tutt25.dat contenu dans le même répertoire.

Dans la fenêtre DOS, un dialogue interne donne alors le choix entre :

1) calculer une note déterminée (définie par son degré NTESS dans la table des doigtés de l'instrument). Dans ce cas, le programme affiche sur écran la justesse calculée, et produit les fichiers suivants : PRESS.OUT, qui contient le champ de pression P(x) calculé, et ZIM.OUT, qui contient l'impédance $Z(\omega)$ (ou plutôt, la partie imaginaire de cette quantité complexe) pour les fréquences voisines de la fréquence de la note considérée.
Les fichiers PRESS.OUT et ZIM.OUT sont tous deux sous forme de liste-colonne (x, P(x)), les fonctions P(x) et $Z(\omega)$ peuvent être tracées par un programme graphique. L'allure du champ de pression et de la fonction impédance est donnée dans l'exemple ci-joint.



Le champ de pression dans le tube d'une flûte à bec VanEyck soprano, calculé pour le 1er mode du doigté "Do1".



La fonction Impédance (partie imaginaire) en fonction de la pulsation omega, calculée pour le doigté "do grave" de la flûte à bec soprano VanEyck. Les zéros de cette fonction correspondent aux résonances du système. Le premier mode a pour pulsation 3298 rd/sec, soit une fréquence d'environ 525 Hz; Le deuxième mode a pour pulsation environ 6691 rd/sec (environ le double de celle du mode n°1), et est donc à peu près harmonique. Comme le montre le graphique, les modes suivants sont loin d'être harmoniques. Les zéros de la fonction situés à 5538 et 9284 rd/sec correspondent à des antirésonances du système.

2) Calculer l'ensemble de la tessiture, sur tous les doigtés de la table. Dans ce cas, le programme produit les fichiers de sortie suivants :
TUTT.OUT, qui contient un tableau résumé du résultat pour chaque note de la tessiture (justesse, volume, timbre, champs de liberté, critères de satisfaction) ;

PITCH.OUT, qui contient seulement les résultats de justesse, sous la forme d'une liste-colonne consultable rapidement et de façon conviviale, avec une ligne pour chaque doigté étudié (Degré considéré dans la table des doigtés, Degré de la gamme, Note attendue, Justesse expérimentale, Justesse calculée).

Exemple de fichier PITCH.OUT :
La première colonne est le numéro du doigté considéré, dans la table des doigtés (en général, du plus grave au plus aigu, mais ce n'est pas obligatoire) ;
La deuxième est le numéro du degré de la gamme correspondant ;
La troisième est le nom de la note attendue
La quatrième est la justesse expérimentale pour chaque doigté (exprimée en cents);
La dernière colonne est le justesse calculée par TUTT.

1	1	do----	4.00	5.41
2	2	do#---	100.00	20.10
3	3	ré----	9.00	2.98
4	4	ré#---	100.00	25.34
5	5	mi----	-10.00	-7.83
6	6	fa----	100.00	-46.57
7	7	fa#---	100.00	14.76
8	7	fa#2--	100.00	-34.51
9	8	sol---	-1.50	-2.67
10	9	sol#-	100.00	3.41
11	10	la--	0.00	3.76
12	11	la#-	-20.00	-52.15
13	12	si--	-10.00	0.33
14	13	do--	-8.00	-17.46
15	14	do#-	-8.00	-6.44
16	15	ré--	1.50	10.87
17	16	ré#-	-5.00	23.94
18	17	mi--	6.00	18.16
19	18	fa--	-12.00	-26.42
20	19	fa#-	100.00	31.30
21	20	sol-	8.00	20.15
22	21	sol#	-12.00	-24.96
23	22	la--	-4.00	14.14
24	23	la#-	-6.00	25.70
25	24	si--	-30.00	9.11
26	25	do--	-40.00	-6.52

JUSTESS.OUT, qui contient seulement les résultats de justesse, sous la forme d'une liste-colonne (Degré, Justesse expérimentale, Justesse calculée) avec une ligne pour chaque note de la tessiture. Ce fichier « justesse » est destiné à une visualisation rapide, et peut être tracé par un programme graphique, par exemple via excel.

Exemple de fichier de sortie JUSTESS.OUT
La première colonne est le degré considéré, dans la table des doigtés (en général, du plus grave au plus aigu, mais ce n'est pas obligatoire) ;
La deuxième est la justesse expérimentale pour chaque doigté (exprimée en cents);
La troisième colonne est le justesse calculée par TUTT. C'est ce fichier là qui est utilisé pour l'affichage de l'histogramme de la justesse dans la fenêtre « justesse » de Tuttedit.

```
 1       4.00      5.2
 2      20.00      20.1
 3       9.00      3.2
 4      13.00      25.7
 5     -10.00     -7.4
 6     -12.00     -46.1
 7      12.00      15.4
 8      -1.00     -1.8
 9       0.00      4.2
10       0.00      4.8
11     -20.00     -51.3
12     -10.00      1.5
13      -8.00     -16.4
14      -8.00     -5.4
15       1.00      12.0
16      -5.00      24.5
17       6.00      18.0
18     -12.00     -26.8
19      22.00      30.9
20       8.00      20.1
21     -12.00     -25.6
22      -4.00      13.8
23      -6.00      24.9
24     -30.00      7.7
25     -40.00     -8.0
```

Structure du fichier TUTT.OUT

Le fichier Tutt.out généré par le programme contient un tableau résumé des résultats pour chaque note de la tessiture (justesse, volume, timbre, champs de liberté, critères de satisfaction).

NOTE	JUSTESSE	EMBOUCHURE	EMISSION	PERTES	VOLUME TIMBRE LIBERTE	CRITERE
	SJUS(%)	DLEMB	ZRE	PCR	PRAYR	SCRIT
OREF	OTUBE	DEBIT	Q	PCV	STIM	
	CENTS		ESTOCA		SLIB	
DO	0.31E-02	0.00E+00	0.18E+06	0.21E+00	0.20E+05	0.93E+00
3287.7	3298.0	0.76E-06	0.18E+02	0.79E+00	0.13E-01	

```
                    5.4                0.52E+03              0.33E-02
...................................................... ................
```

La signification des différentes variables apparaissant dans ce tableau est la suivante :

OREF est la pulsation de référence pour la note considérée (ici, un DO, avec ω = 1520.6 rd/s).
SJUS est le critère de satisfaction sur la justesse (défini par SJUS = $\Delta\omega/\omega$).
OTUBE est la pulsation calculée pour la note produite par l'instrument.
CENTS est l'écart de justesse (en centièmes de demi-tons) entre la note produite par l'instrument et la note de référence.
DLEMB est la correction de longueur à l'embouchure *(à remplacer par une impression des corrections de longueur CLINT et CLOUT dans la prochaine version TUTT34).*
DEBIT est l'amplitude du débit à l'embouchure
ZRE est la partie réelle de l'impédance Z(OTUBE)
Q est le coefficient de surtension du résonateur.
ESTOCA est l'énergie stockée dans le résonateur.
PCR, PCV sont les proportions de la puissance totale dissipée respectivement par le rayonnement et par les pertes viscothermiques.
PRAYR est la puissance rayonnée.
STIM est le critère de satisfaction sur le timbre.
SLIB est le critère de satisfaction sur la largeur du champ de liberté en fréquence.
SCRIT est le critère de satisfaction global (ces deux derniers critères ne sont calculés correctement que s'il y a couplage à l'anche, c'est à dire si FCM est pris non nul).

Variables en sortie	Subroutines où sont calculées ces variables
OREF	GAMME
SJUS, OTUBE, CENTS	PROXI
DLEMB (CLINT,CLOUT dans la prochaine version TUTT34)	LCOREM
DEBIT	OPOIL
ZRE, PCR, PCV	PERTES
Q	SURTEN
ESTOCA, SEMI	EMISS
PRAYR	VOLUME
STIM	TIMBRE
SLIB	LIBRTE
SCRIT	SATIS

Exemple de fichier de sortie du programme TUTT

```
..................................................... .............
Flute a bec vaneyck sop trous cylindriques (doigté scolaire)
 ..................................................... .............
PARAMETRES PHYSIQUES DE L' AIR :RHOA,P0,GAMMA,CV,ETA,TONEW,DLAMBA
 1.20400000 101400.000 1.39999998 719.000000 1.80000006E-05 11.6999998
2.40000002E-02
NOMBRE DE TRONCONS DE LA LIGNE (-1) N
 13
BAS DE LIGNE OUVERT OU FERME C1 (0=OUVERT, 1=FERME)
 0.00000000E+00
TABLEAU PERCE D0 (DIMENSION N+1)
 1.24000004E-02 1.24000004E-02 1.26999998E-02 1.29000004E-02 1.31000001E-02
1.36000002E-02 1.40000004E-02 1.40000004E-02 1.42999999E-02 1.43999998E-02
1.43999998E-02 1.49999997E-02 1.49999997E-02 6.86000008E-03
TABLEAU PERCE DL (DIMENSION N+1)
 1.24000004E-02 1.24000004E-02 1.24000004E-02 1.26999998E-02 1.26999998E-02
1.31000001E-02 1.36000002E-02 1.40000004E-02 1.41000003E-02 1.42999999E-02
1.43999998E-02 1.43999998E-02 1.49999997E-02 6.86000008E-03
TABLEAU SURFACE LIBRE DE LA PERCE/SURFACE OFFICIELLE OFILIB (DIM N+1)
 2.00000000 2.00000000 2.00000000 2.00000000 2.00000000 2.00000000 2.00000000
2.00000000 2.00000000 2.00000000 2.00000000 2.00000000 2.00000000 2.00000000
TABLEAU DES TRONCONS DE LA LIGNE PRINCIPALE L (DIMENSION N+1)
 5.15000001E-02 9.99999975E-05 2.89999992E-02 9.99999975E-05 1.79999992E-02
2.15000007E-02 2.41000000E-02 2.09999997E-02 1.99999996E-02 8.00000038E-03
9.99999975E-05 2.80000009E-02 5.99999987E-02 3.70000000E-03
TEMPERATURE DE L' AIR EN HAUT ET EN BAS DE LA LIGNE (CELSIUS)
 25.0000000 20.0000000
TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX D0P (DIMENSION N)
 3.80000006E-03 5.49999997E-03 4.19999985E-03 4.69999993E-03 6.50000013E-03
6.50000013E-03 6.89999992E-03 6.50000013E-03 5.49999997E-03 5.20000001E-03
3.50000011E-03 0.00000000E+00 1.53000001E-02
TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX DLP (DIMENSION N)
 3.80000006E-03 5.49999997E-03 4.19999985E-03 4.69999993E-03 6.50000013E-03
6.50000013E-03 6.89999992E-03 6.50000013E-03 5.49999997E-03 5.20000001E-03
3.50000011E-03 0.00000000E+00 1.53000001E-02
TABLEAU LONGUEUR DES TRONCONS LATERAUX LP0 (DIMENSION N)
 4.10000002E-03 4.10000002E-03 3.80000006E-03 3.80000006E-03 3.55000002E-03
3.65000009E-03 3.70000000E-03 4.00000019E-03 4.30000015E-03 4.49999981E-03
4.49999981E-03 0.00000000E+00 0.00000000E+00
TABLEAU STYLE DES CLES ISTYLE (DIMENSION N)
 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
TABLEAU LEVEE DES CLES LEVEE (DIMENSION N)
 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
FREQUENCE DU LA DE REFERENCE FLA
 440.000000
Temperament de reference ITMPNT (0 si teqj, 1 si teoj)
 1
TESSITURE NTESSC, NTESSG, NTESSB
 26 25 -3
TABLE DES DOIGTES DOIGTE(I,J) (NTESS LIGNES, N COLONNES)
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 do     4.00000000 1 1
 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 do#    100.000000 2 2
 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ré     9.00000000 3 3
 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ré#    100.000000 4 4
```

```
 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 mi     10.0000000 5 5
 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 fa     100.000000 6 6
 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 fa#    100.000000 7 7
 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 fa#2   100.000000 8 7
 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 sol    1.50000000 9 8
 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 sol#   100.000000 10 9
 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 la     0.00000000E+00 11 10
 0 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 la#    -20.0000000 12 11
 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 si     -10.0000000 13 12
 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 do     -8.00000000 14 13
 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 do#    -8.00000000 15 14
 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 ré     1.50000000 16 15
 0 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 ré#    -5.00000000 17 16
 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 mi     6.00000000 18 17
 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 fa     -12.0000000 19 18
 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 fa#    100.000000 20 19
 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 1 1 sol    8.00000000 21 20
 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 sol#   -12.0000000 22 21
 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 la     -4.00000000 23 22
 0 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 la#    -6.00000000 24 23
 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 1 1 si     -30.0000000 25 24
 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 1 do     -40.0000000 26 25
DONNEES CONCERNANT L' EMBOUCHURE
IFLUTE FCM FCP G0  LA0 alpha E0   V0   V1 LEVRES PAREMB DECOUV
 0 1.00000000 0.00000000E+00 9.99999978E-03 3.70000000E-03 2.00000000
8.99999985E-04 11.0000000 5.00000000 0.00000000E+00 0.00000000E+00
0.00000000E+00
LIBERTE SUR LES PARAMETRES DE L' ANCHE DMA DKA DFCM DFCP DDLEMB
 0.100000001 0.100000001 0.100000001 0.00000000E+00 0.100000001
DONNEES CONCERNANT L' AUTO ENTRETIEN GA GB
 700.000000 1.00000000
COEFFICIENTS SUR LES CRITERES DE SATISFACTION CJUS CTIM CVOL CEMI CLIB
 1.00000000 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00 0.00000000E+00
 ..................................................... ..............
   NOTE     JUSTESSE  EMBOUCHURE  EMISSION     PERTES     VOLUME     CRITERE
                                                          TIMBRE
                                                          LIBERTE
 ..................................................... ..............
          |          |           |          |          |          |          |
             SJUS(%)      CLINT       ZRE         PCR        PRAYR       SCRIT
          |          |           |          |          |          |          |
   OREF      OTUBE       CLOUT        Q          PCV        STIM
          |          |           |          |          |          |          |
             CENTS       DEBIT     ESTOCA                SLIB
          |          |           |          |          |          |          |
 ..................................................... ..............
 ..................................................... ..............
     do       0.31E-02   0.20E-02   0.18E+06   0.21E+00   0.20E+05   0.93E+00
     3287.7     3298.0   0.13E-02   0.18E+02   0.79E+00   0.13E-01
                   5.4   0.76E-06   0.52E+03              0.38E-02
 ..................................................... ..............
     do#      0.12E-01   0.20E-02   0.18E+06   0.21E+00   0.20E+05   0.39E+00
     3483.2     3523.8   0.13E-02   0.19E+02   0.79E+00   0.38E-02
                  20.1   0.12E-05   0.51E+03              0.37E-02
 ..................................................... ..............
     ré       0.17E-02   0.20E-02   0.18E+06   0.22E+00   0.21E+05   0.98E+00
     3690.3     3696.7   0.13E-02   0.19E+02   0.78E+00   0.86E-02
                   3.0   0.20E-05   0.51E+03              0.37E-02
 ..................................................... ..............
     ré#      0.15E-01   0.20E-02   0.18E+06   0.24E+00   0.24E+05   0.22E+00
     3909.7     3967.4   0.13E-02   0.20E+02   0.76E+00   0.24E-02
                  25.3   0.30E-05   0.50E+03              0.36E-02
```

mi	0.45E-02	0.20E-02	0.18E+06	0.25E+00	0.25E+05	0.87E+00
4142.2	4123.5	0.13E-02	0.20E+02	0.75E+00	0.43E-02	
	-7.8	0.44E-05	0.49E+03		0.36E-02	
fa	0.27E-01	0.20E-02	0.21E+06	0.33E+00	0.36E+05	0.75E-02
4388.5	4272.1	0.13E-02	0.18E+02	0.67E+00	0.42E-01	
	-46.6	0.18E-05	0.47E+03		0.35E-02	
fa#	0.86E-02	0.20E-02	0.22E+06	0.36E+00	0.41E+05	0.60E+00
4649.5	4689.3	0.13E-02	0.18E+02	0.64E+00	0.37E-01	
	14.8	0.41E-05	0.44E+03		0.35E-02	
fa#2	0.20E-01	0.20E-02	0.24E+06	0.38E+00	0.43E+05	0.67E-01
4649.5	4557.7	0.13E-02	0.17E+02	0.62E+00	0.88E-02	
	-34.5	0.15E-05	0.44E+03		0.33E-02	
sol	0.15E-02	0.20E-02	0.21E+06	0.35E+00	0.40E+05	0.98E+00
4926.0	4918.4	0.13E-02	0.19E+02	0.65E+00	0.90E-02	
	-2.7	0.15E-04	0.44E+03		0.36E-02	
sol#	0.20E-02	0.20E-02	0.26E+06	0.43E+00	0.52E+05	0.97E+00
5218.9	5229.2	0.13E-02	0.17E+02	0.57E+00	0.26E-01	
	3.4	0.53E-05	0.40E+03		0.34E-02	
la	0.22E-02	0.20E-02	0.23E+06	0.43E+00	0.51E+05	0.97E+00
5529.2	5541.2	0.13E-02	0.18E+02	0.57E+00	0.25E-02	
	3.8	0.25E-04	0.40E+03		0.37E-02	
la#	0.30E-01	0.20E-02	0.30E+06	0.48E+00	0.59E+05	0.22E-02
5858.0	5684.1	0.13E-02	0.17E+02	0.52E+00	0.19E-01	
	-52.2	0.56E-05	0.36E+03		0.33E-02	
si	0.19E-03	0.20E-02	0.26E+06	0.48E+00	0.59E+05	0.10E+01
6206.3	6207.5	0.13E-02	0.18E+02	0.52E+00	0.12E-01	
	0.3	0.36E-04	0.35E+03		0.37E-02	
do	0.10E-01	0.20E-02	0.30E+06	0.52E+00	0.63E+05	0.50E+00
6575.4	6509.4	0.13E-02	0.17E+02	0.48E+00	0.62E-01	
	-17.5	0.28E-04	0.32E+03		0.35E-02	
do#	0.37E-02	0.20E-02	0.33E+06	0.53E+00	0.63E+05	0.91E+00
6966.4	6940.5	0.13E-02	0.17E+02	0.47E+00	0.56E-01	
	-6.4	0.25E-04	0.29E+03		0.34E-02	
ré	0.63E-02	0.20E-02	0.34E+06	0.56E+00	0.64E+05	0.76E+00
7380.6	7427.1	0.13E-02	0.17E+02	0.44E+00	0.22E-01	
	10.9	0.29E-04	0.26E+03		0.36E-02	
ré#	0.14E-01	0.20E-02	0.37E+06	0.50E+00	0.59E+05	0.26E+00
7819.5	7928.3	0.13E-02	0.19E+02	0.50E+00	0.21E-01	
	23.9	0.22E-05	0.28E+03		0.76E-03	
mi	0.11E-01	0.20E-02	0.52E+06	0.43E+00	0.52E+05	0.46E+00
8284.4	8371.8	0.13E-02	0.22E+02	0.57E+00	0.16E-01	
	18.2	0.21E-05	0.31E+03		-0.23E-04	
fa	0.15E-01	0.20E-02	0.71E+06	0.52E+00	0.56E+05	0.20E+00
8777.1	8644.1	0.13E-02	0.18E+02	0.48E+00	0.44E-02	
	-26.4	0.14E-05	0.23E+03		-0.24E-04	
fa#	0.18E-01	0.20E-02	0.92E+06	0.56E+00	0.49E+05	0.99E-01

```
    9299.0     9468.6   0.13E-02   0.18E+02   0.44E+00   0.20E-01
                 31.3   0.16E-05   0.16E+03             -0.26E-04
..................................................... ..............
    sol      0.12E-01   0.20E-02   0.87E+06   0.56E+00   0.47E+05   0.39E+00
    9851.9     9967.3   0.13E-02   0.18E+02   0.44E+00   0.33E-01
                 20.2   0.25E-05   0.16E+03             -0.30E-04
..................................................... ..............
    sol#     0.14E-01   0.20E-02   0.16E+07   0.63E+00   0.66E+04   0.24E+00
   10437.7    10288.3   0.13E-02   0.15E+02   0.37E+00   0.46E-01
                -25.0   0.13E-05   0.15E+02             -0.34E-04
..................................................... ..............
ATTENTION, L AUTO ENTRETIEN NE PEUT AVOIR LIEU!
    la       0.82E-02   0.20E-02   0.16E+07   0.66E+00   0.00E+00   0.63E+00
   11058.4    11149.1   0.13E-02   0.15E+02   0.34E+00   0.61E-02
                14.1   0.13E-05   0.00E+00             -0.25E-04
..................................................... ..............
    la#      0.15E-01   0.20E-02   0.16E+07   0.61E+00   0.41E+04   0.21E+00
   11716.0    11891.2   0.13E-02   0.17E+02   0.39E+00   0.25E-01
                25.7   0.64E-06   0.99E+01             -0.45E-04
..................................................... ..............
ATTENTION, L AUTO ENTRETIEN NE PEUT AVOIR LIEU!
    si       0.53E-02   0.20E-02   0.23E+07   0.65E+00   0.00E+00   0.82E+00
   12412.6    12478.1   0.13E-02   0.15E+02   0.35E+00   0.12E-02
                 9.1   0.44E-06   0.00E+00              0.10E-02
..................................................... ..............
ATTENTION, L AUTO ENTRETIEN NE PEUT AVOIR LIEU!
    do       0.38E-02   0.20E-02   0.31E+07   0.71E+00   0.00E+00   0.91E+00
   13150.7    13101.3   0.13E-02   0.13E+02   0.29E+00   0.12E-01
                -6.5   0.39E-06   0.00E+00              0.62E-03
..................................................... ..............
```

3. Exemples de fichiers d'entrée et de sortie de Tutt pour quelques instruments types

Flûte à bec

Voir au chapitre précédent le cas d'un flûte à bec soprano vanEyck

Flûte Boehm

Les commentaires sont en italique.

Flûte Boehm
(C'est la ligne de titre. L'instrument décrit ici est une flûte Boehm d'excellente facture, dont je ne donne pas l'origine pour ne pas faire de publicité au constructeur).

PARAMETRES PHYSIQUES DE L' AIR :RHOA,P0,GAMMA, CV, ETA, TONEW,DLAMBA
1.204 1.014E5 1.400 719. 1.8E-5 11.7 2.4E-2
(ρ_A est la densité de l'air; P_0 est la pression atmosphérique; Cv est la chaleur spécifique de l'air; η est la viscosité de l'air, Tonew ne sert à rien, et λ est la conductivité thermique de l'air. On ne doit rien changer dans cette ligne).

NOMBRE DE TRONCONS DE LA LIGNE (-1) N
21
(Ici, le tube principal est divisé en 21 troncs de cône, dont la plupart sont de purs cylindres, plus 1 pour décrire l'embouchure).

BAS DE LIGNE OUVERT OU FERME C1 (0=OUVERT, 1=FERME)
0.
(Ici, le bas du tube est ouvert)

TABLEAU PERCE D0 (DIMENSION N+1)
1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02
1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02
1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.89E-02 1.85E-02 1.76E-02 1.73E-02
1.17E-02
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus proche de l'embouchure; L'avant dernier chiffre, ici 1.73 e-2, est le diamètre du tube au niveau du trou d'embouchure ; Le dernier chiffre, ici 1.17 e-2, est le diamètre équivalent du trou d'embouchure au niveau de l'extérieur du tuyau). Attention : mettre D0 = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TABLEAU PERCE DL (DIMENSION N+1)
1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02
1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02
1.90E-02 1.90E-02 1.90E-02 1.89E-02 1.89E-02 1.85E-02 1.76E-02
1.50E-02
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus loin de l'embouchure; Le dernier chiffre, ici 1.5 e-2, est le diamètre équivalent du trou d'embouchure au niveau de son raccordement avec l'intérieur du tuyau). Pour les flûtes Boehm, le trou d'embouchure est en général ovale. Or, Tutt ne considère que les trous circulaires. Pour décrire l'embouchure des flûtes Boehm,

l'utilisateur devra rentrer dans TuTT le diamètre d'un trou circulaire de même surface que celle de l'ovale du trou d'embouchure.

TABLEAU SURFACE LIBRE DE LA PERCE/SURFACE OFFICIELLE OFILIB (DIM N+1)
1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5
1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5
1.5 1.5
(ce chiffre 1.5 caractérise la rugosité de la perce. Ici, on a supposé ici que la surface libre de la perce était 1.5 fois plus grande que la surface d'un tube à parois lisses de mêmes dimensions. Valeur recommandée : 1.5 pour du métal, 2 pour du bois poli.).

TABLEAU DES TRONCONS DE LA LIGNE PRINCIPALE L (DIMENSION N+1)
4.20E-02 3.38E-02 3.25E-02 3.13E-02 2.95E-02 2.72E-02 2.60E-02
2.35E-02 5.00E-04 2.30E-02 2.25E-02 2.10E-02 1.90E-02 3.10E-02
2.08E-02 1.47E-02 8.25E-02 1.40E-02 3.40E-02 5.00E-02 1.65E-02
5.20E-03
(Ce sont les longueurs des tronçons du tube principal; Le dernier chiffre, ici 5.2 e-3, est la hauteur du trou d'embouchure);
Attention : mettre L = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TEMPERATURE DE L' AIR EN TETE? ET TEMPERATURE AMBIANTE(CELSIUS) TT TB
25. 20.
(Ici : Température = 25°C près de l'embouchure, et 20°C dans la pièce).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX D0P (DIMENSION N)
1.55E-02 1.55E-02 1.55E-02 1.41E-02 1.41E-02 1.41E-02 1.41E-02
1.32E-02 1.22E-02 1.32E-02 1.32E-02 1.32E-02 1.24E-02 7.00E-03
7.00E-03 7.00E-03 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.71E-02
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de la face externe du tube; Le dernier chiffre, ici 1.71 e-3, est le diamètre du bout mort au niveau de son extrémité)

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX DLP (DIMENSION N)
1.55E-02 1.55E-02 1.55E-02 1.41E-02 1.41E-02 1.41E-02 1.41E-02
1.32E-02 1.22E-02 1.32E-02 1.32E-02 1.32E-02 1.24E-02 7.00E-03
7.00E-03 7.00E-03 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.73E-02
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de l'intérieur du tube; Le dernier chiffre, ici 1.73 e-3, est le diamètre du bout mort au niveau de son raccordement avec le tube principal)

TABLEAU LONGUEUR DES TRONCONS LATERAUX LP0 (DIMENSION N)
2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03
2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03 2.00E-03
2.00E-03 2.00E-03 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.85E-02
(C'est la hauteur des cheminées des trous latéraux, ou l'épaisseur de la paroi du tube, si le trou est percé perpendiculairement à l'axe du tube. Le dernier chiffre, ici 1.85e-2 m, est la longueur du bout mort).

TABLEAU STYLE DES CLES ISTYLE (DIMENSION N)
2 2 2 1 1 1 2 2 2 1
1 2 2 2 2 2 0 0 0 0
0
(2 pour un plateau plein, 1 pour un plateau creux).

TABLEAU LEVEE DES CLES LEVEE (DIMENSION N)
0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035
0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.0035 0.00001 0.00001 0.00001 0.00001
0.00001
(3.5 mm pour la levée de toutes les clés)

FREQUENCE DU LA DE REFERENCE FLA

442.

(La 442 : voilà le diapason)

Tempérament de reference ITMPNT (0 si teqj, 1 si teoj)

1

(La justesse de chaque note sera jugée par rapport à un tempérament égal à octaves justes)

TESSITURE NTESSC, NTESSG, NTESSB

37 37 9

(Ici, on étudie 37 doigtés différents, et la tessiture de l'instrument comprend 37 notes. Il y a autant de doigtés étudiés que de degrés de la gamme, car dans ce fichier, on n'a mis que les doigtés principaux, en négligeant les doigtés alternatifs : il y a donc un seul doigté pour chaque note; La note la plus basse est le do1, soit 9 demi-tons au dessous du La1 de référence).

TABLE DES DOIGTES DOIGTE(I,J) (NTESSC LIGNES, N COLONNES)

Chaque ligne du tableau correspond à une note de la tessiture; L'avant-dernier nombre de la ligne rappelle son numéro dans le tableau, le dernier donne le numéro du degré de la gamme auquel il correspond.

Chaque colonne du tableau correspond à un trou latéral : 1 = trou fermé, 0 = trou ouvert.

On notera qu'ici, les sept derniers trous latéraux n° N-6, N-5, … et N sont toujours fermés : ce ne sont pas des trous de jeu, mais simplement des raccordements entre tronçons du tube principal.

Le chiffre du tableau situé juste après le nom de la note (3ème avant la fin de chaque ligne) donne la justesse expérimentale de l'instrument pour le doigté correspondant (C'est la justesse expérimentale, mesurée par exemple avec un accordeur électronique, en prenant soin de se placer pour chaque note aussi près que possible du milieu du champ de liberté en fréquence. Ces chiffres expérimentaux sont destinés à être comparés avec les prédictions de TUTT). Sur cet exemple d'instrument, la justesse expérimentale n'a pas été mesurée, on a donc mis ici une valeur réelle quelconque, 0.0

```
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'do  '0.0  1       1
 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'do# '0.0  2       2
 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'ré  '0.0  3       3
 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'ré# '0.0  4       4
 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'mi  '0.0  5       5
 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'fa  '0.0  6       6
 0 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'fa# '0.0  7       7
 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'sol '0.0  8       8
 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'sol#'0.0  9       9
 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'la  '0.0  10      10
 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'la# '0.0  11      11
 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'si  '0.0  12      12
 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 'do  '0.0  13      13
 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 'do# '0.0  14      14
 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 'ré  '0.0  15      15
 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 'ré# '0.0  16      16
 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'mi  '0.0  17      17
 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'fa  '0.0  18      18
 0 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'fa# '0.0  19      19
 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'sol '0.0  20      20
 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'sol#'0.0  21      21
 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'la  '0.0  22      22
 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'la# '0.0  23      23
 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'si  '0.0  24      24
 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 'do  '0.0  25      25
 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 'do# '0.0  26      26
 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 'ré  '0.0  27      27
 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'ré# '0.0  28      28
```

0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	'	mi	'	0.0	29	29
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	'	fa	'	0.0	30	30
0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	'	fa#	'	0.0	31	31
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	'	sol	'	0.0	32	32
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	'	sol#	'	0.0	33	33
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	'	la	'	0.0	34	34
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	'	la#	'	0.0	35	35
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	'	si	'	0.0	36	36
0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	'	do	'	0.0	37	37

DONNEES CONCERNANT L' EMBOUCHURE

IFLUTE	FCM	FCP	G0	LA0	alpha	E0	V0	V1	LEVRES	PAREMB	DECOUV
-1	1.	0.	1.e-2	7.e-3	2.	6.e-4	20.	9.	-0.01	1.2	0.4

(Ici, IFLUTE = -1 nous dit qu'on a affaire à une flûte traversière. Ce paramètre n'est utilisé que pour calculer la correction de longueur à l'embouchure;
FCM =1, FCP = 0 sont les paramètres de couplage entre l'anche aérienne et le tuyau;
G0 est la largeur de l'anche aérienne : la largeur du jet est ici de 1 cm;
LA0 est la longueur de l'anche aérienne : la distance lumière-biseau est ici de 7 mm;
Alpha est un paramètre permettant d'ajuster finement la raideur de l'anche aérienne. La valeur recommandée pour toutes les flûtes est alpha = 2;
E0 est l'épaisseur de l'anche aérienne, ici 0.6 mm;
V0 et V1 sont les paramètres qui définissent la vitesse du jet d'air : ici, la vitesse moyenne est de 20 m/s et les vitesses extrêmes sont environ 20-9 = 11m/s pour la note la plus grave et 20+9 = 29 m/s pour la note la plus aigüe.
LEVRES et PAREMB sont des paramètres qui décrivent la couverture de l'embouchure par les lèvres pour une flûte traversière.
DECOUV est la proportion de la surface du trou d'embouchure laissée découverte par les lèvres (ici, 40%).

LIBERTE SUR LES PARAMETRES DE L' ANCHE

DMA	DKA	DFCM	DFCP	DCLOUT
0.1	0.1	0.1	0.	0.

(Tous ces paramètres servent à définir la liberté dont dispose l'instrumentiste pour faire varier les paramètres de l'anche et les paramètres de couplage anche-tuyau. Ce sont des variations relatives des paramètres MA,KA FCM et CLOUT que l'instrumentiste peut réaliser autour de leurs valeurs nominales. Ici, on a supposé 10% de liberté sur la masse effective et la raideur effective du jet (DMA = DKA = 0.1), et 10% sur la constante de couplage jet-tube (DFCM = 0.1). La quantité DFCP est une variation absolue de la constante de couplage anche-tuyau. On a supposé aussi DCLOUT = 0, soit 0% de liberté sur la correction de longueur à l'embouchure. TUTT utilise ces paramètres pour calculer les champs de liberté de l'instrument.

DONNEES CONCERNANT L' AUTO ENTRETIEN

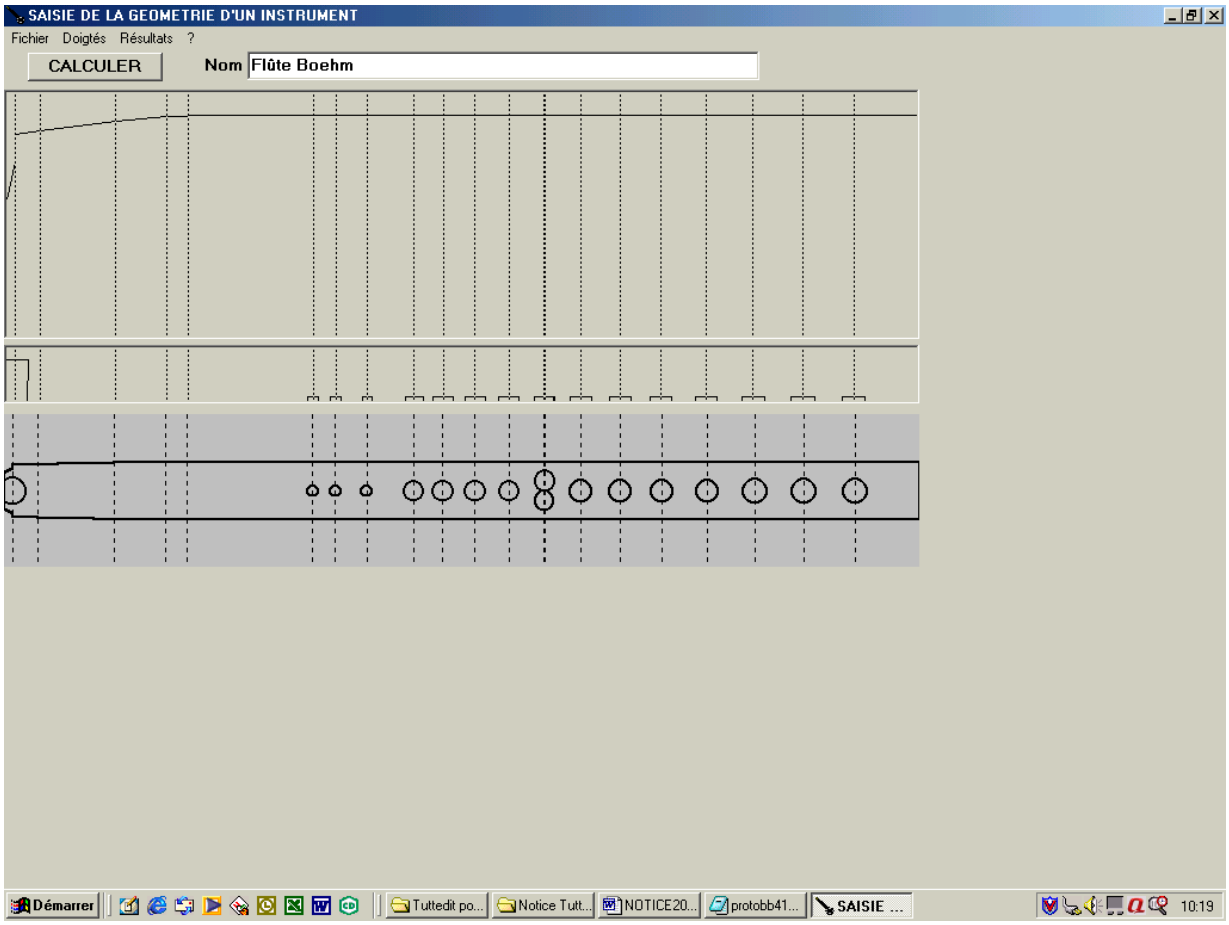
GA	GB
700.	1.

(Ces paramètres décrivent la relation non linéaire entre la puissance générée par l'auto entretien de l'oscillation, et l'énergie stockée dans le résonateur. GA et GB fixent l'amplitude des champs sonores dans le tuyau. Faute d'une connaissance détaillée du mécanisme d'auto entretien, la valeur de ces paramètres est actuellement très pifométrée. Les recherches sont en cours!).

COEFFICIENTS SUR LES CRITERES DE SATISFACTION

CJUS	CTIM	CVOL	CEMI	CLIB
1.	0.	0.	0.	0.

(Le critère de satisfaction global repose ici exclusivement sur la justesse : CJUS = 1; Les autres critères (timbre, volume, facilité d'émission, largeur des champs de liberté) ont un coeficient de pondération nul, c'est à dire qu'ils comptent pour du beurre!).



Le plan de perce de la flûte Boehm correspondant au fichier Tutt ci-dessus

Traverso baroque

Les commentaires sont en italique.

Traverso baroque proto bb
(C'est la ligne de titre. Ce traverso est inspiré de la flûte Martin Lot du Conservatoire, mais j'y ai apporté des modifications. Cet instrument marche très bien).

PARAMETRES PHYSIQUES DE L' AIR :RHOA,P0,GAMMA, CV, ETA, TONEW,DLAMBA
1.204 1.014E5 1.400 719. 1.8E-5 11.7 2.4E-2
(ρ_A est la densité de l'air; P_0 est la pression atmosphérique; Cv est la chaleur spécifique de l'air; η est la viscosité de l'air, Tonew ne sert à rien, et λ est la conductivité thermique de l'air. On ne doit rien changer dans cette ligne).

NOMBRE DE TRONCONS DE LA LIGNE (-1) N
11
(Ici, le tube principal est divisé en 11 troncs de cône, plus 1 pour décrire l'embouchure).

BAS DE LIGNE OUVERT OU FERME C1 (0=OUVERT, 1=FERME)
0.
(Ici, le bas du tube est ouvert)

TABLEAU PERCE D0 (DIMENSION N+1)
1.31E-02 1.26E-02 1.35E-02 1.42E-02 1.48E-02 1.49E-02 1.57E-02
1.64E-02 1.70E-02 1.90E-02 1.90E-02 8.70E-03
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus proche de l'embouchure;
Le dernier chiffre, ici 8.7 e-3, est le diamètre équivalent du trou d'embouchure au niveau de l'extérieur du tuyau).
Attention : mettre D0 = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TABLEAU PERCE DL (DIMENSION N+1)
1.47E-02 1.31E-02 1.26E-02 1.35E-02 1.42E-02 1.48E-02 1.49E-02
1.57E-02 1.64E-02 1.70E-02 1.90E-02 1.04E-02
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus loin de l'embouchure; Le dernier chiffre, ici 1.04 e-2, est le diamètre équivalent du trou d'embouchure au niveau de son raccordement avec l'intérieur du tuyau). Pour les traversos, le trou d'embouchure est parfois ovale. Or, Tutt ne considère que les trous circulaires. Pour décrire l'embouchure des traversos, l'utilisateur devra rentrer dans Tutt le diamètre d'un trou circulaire de même surface que celle de l'ovale du trou d'embouchure.

TABLEAU SURFACE LIBRE DE LA PERCE/SURFACE OFFICIELLE OFILIB (DIM N+1)
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 *(ce chiffre 2 caractérise la rugosité de la perce. Ici, on a supposé ici que la surface libre de la perce était 2 fois plus grande que la surface d'un tube à parois lisses de mêmes dimensions. Valeur recommandée : 1.5 pour du métal, 2 pour du bois poli.).*

TABLEAU DES TRONCONS DE LA LIGNE PRINCIPALE L (DIMENSION N+1)
5.50E-02 2.30E-02 4.40E-02 3.50E-02 3.50E-02 1.40E-02 5.05E-02
3.75E-02 3.45E-02 1.28E-01 9.50E-02 5.00E-03
(Ce sont les longueurs des tronçons du tube principal; Le dernier chiffre, ici 5 e-3, est la hauteur du trou d'embouchure);
Attention : mettre L = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TEMPERATURE DE L' AIR EN TETE? ET TEMPERATURE AMBIANTE(CELSIUS) TT TB
25. 20.
(Ici : Température = 25°C près de l'embouchure, et 20°C dans la pièce).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX D0P (DIMENSION N)
1.09E-02 0.00E+00 5.24E-03 5.74E-03 6.19E-03 0.00E+00 5.36E-03
6.24E-03 6.17E-03 0.00E+00 1.88E-02
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de la face externe du tube; Le dernier chiffre, ici 1.88 e-2, est le diamètre du bout mort au niveau de son extrémité).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX DLP (DIMENSION N)
1.31E-02 0.00E+00 6.28E-03 6.89E-03 7.42E-03 0.00E+00 6.43E-03
7.49E-03 7.40E-03 0.00E+00 1.88E-02
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de l'intérieur du tube; Le dernier chiffre, ici 1.88 e-3, est le diamètre du bout mort au niveau de son raccordement avec le tube principal).

TABLEAU LONGUEUR DES TRONCONS LATERAUX LP0 (DIMENSION N)
5.11E-03 0.00E+00 6.22E-03 4.24E-03 5.27E-03 0.00E+00 4.96E-03
4.56E-03 4.35E-03 0.00E+00 2.30E-02
(C'est la hauteur des cheminées des trous latéraux, ou l'épaisseur de la paroi du tube, si le trou est percé perpendiculairement à l'axe du tube. Le dernier chiffre, ici 2.3 cm, est la longueur du bout mort).

TABLEAU STYLE DES CLES ISTYLE (DIMENSION N)
2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
(Ces zéros signifient qu'il n'y a pas de clés sur le traverso décrit ici, sauf la clé de ré#, qui est du type plateau plein, d'où le chiffre 2).

TABLEAU LEVEE DES CLES LEVEE (DIMENSION N)
4.e-3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
(La levée de la clé de ré# est de 4 mm).

FREQUENCE DU LA DE REFERENCE FLA
415.
(La 415 : voilà le diapason)

Tempérament de reference ITMPNT (0 si teqj, 1 si teoj)
1
(La justesse de chaque note sera jugée par rapport à un tempérament égal à octaves justes)

TESSITURE NTESSC, NTESSG, NTESSB
33 33 7
(Ici, on étudie 33 doigtés différents, et la tessiture de l'instrument comprend 33 notes. Il y a autant de doigtés étudiés que de degrés de la gamme, car on n'a retenu qu'un seul doigté pour chaque note. La note la plus basse est le ré, soit 7 demi-tons au dessous du La de référence).

TABLE DES DOIGTES DOIGTE(I,J) (NTESSC LIGNES, N COLONNES)
Chaque ligne du tableau correspond à une note de la tessiture; L'avant-dernier nombre de la ligne rappelle son numéro dans le tableau, le dernier donne le numéro du degré de la gamme auquel il correspond. On n'a retenu pour chaque note qu'un seul doigté : le doigté principal de la table de Quantz.
Chaque colonne du tableau correspond à un trou latéral : 1 = trou fermé, 0 = trou ouvert.
On notera qu'ici, les deux derniers trous latéraux n° N-1 et N sont toujours fermés : ce ne sont pas des trous de jeu, mais simplement des raccordements entre tronçons du tube principal.
Le chiffre du tableau situé juste après le nom de la note (3ème avant la fin de chaque ligne) donne la justesse expérimentale de l'instrument pour le doigté correspondant (C'est la justesse expérimentale, mesurée par exemple avec un accordeur électronique, en prenant soin de se placer pour chaque note aussi près que possible du milieu du champ de liberté en fréquence. Ces chiffres expérimentaux sont destinés à être comparés avec les prédictions de TUTT). En l'occurrence, la justesse expérimentale n'a pas été mesurée : on a rentré ici une valeur réelle quelconque, par exemple 0.0.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	' ré	'0.0	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	' ré#	'0.0	2	2
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	' mi	'0.0	3	3
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	' fa	'0.0	4	4
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	' fa#	'0.0	5	5
1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	' sol	'0.0	6	6
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	' sol#	'0.0	7	7
1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	' la	'0.0	8	8
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	' la#	'0.0	9	9
1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	' si	'0.0	10	10
1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	' do	'0.0	11	11
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	' do#	'0.0	12	12
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	' ré	'0.0	13	13
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	' ré#	'0.0	14	14
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	' mi	'0.0	15	15
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	' fa	'0.0	16	16
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	' fa#	'0.0	17	17
0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	' sol	'0.0	18	18
0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	' sol#	'0.0	19	19
0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	' la	'0.0	20	20
1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	' la#	'0.0	21	21
0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	' si	'0.0	22	22
0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	' do	'0.0	23	23
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	' do#	'0.0	24	24
0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	' ré	'0.0	25	25

```
 0  1  1  1  0  1  1  1  1  1  1 ' ré#  '0.0     26        26
 0  1  1  1  0  1  0  1  1  1  1 ' mi   '0.0     27        27
 0  1  0  0  1  1  0  1  1  1  1 ' fa   '0.0     28        28
 1  1  0  0  1  1  0  1  1  1  1 ' fa#  '0.0     29        29
 1  1  0  0  0  1  1  0  1  1  1 ' sol  '0.0     30        30
 1  1  0  0  0  1  1  0  0  1  1 ' sol# '0.0     31        31
 1  1  0  1  1  1  1  1  0  1  1 ' la   '0.0     32        32
 1  1  0  0  1  1  0  1  0  1  1 ' la#  '0.0     33        33
```

DONNEES CONCERNANT L' EMBOUCHURE

IFLUTE	FCM	FCP	G0	LA0	alpha	E0	V0	V1	LEVRES	PAREMB	DECOUV
-1	1.	0.	1.e-2	6.e-3	2.	6.e-4	15.	7.	-0.01	1.4	0.6

(Ici, IFLUTE = -1 nous dit qu'on a affaire à une flûte traversière. Ce paramètre n'est utilisé que pour calculer la correction de longueur à l'embouchure;
FCM =1, FCP = 0 sont les paramètres de couplage entre l'anche aérienne et le tuyau;
G0 est la largeur de l'anche aérienne : la largeur du jet est ici de 1 cm;
LA0 est la longueur de l'anche aérienne : la distance lumière-biseau est ici de 6 mm;
Alpha est un paramètre permettant d'ajuster finement la raideur de l'anche aérienne. La valeur recommandée pour toutes les flûtes est alpha = 2;
E0 est l'épaisseur de l'anche aérienne, ici 0.6 mm;
V0 et V1 sont les paramètres qui définissent la vitesse du jet d'air : ici, la vitesse moyenne est de 15 m/s et les vitesses extrêmes sont environ 15-7 = 8m/s pour la note la plus grave et 15+7 = 22 m/s pour la note la plus aigüe.
LEVRES et PAREMB sont des paramètres qui décrivent la couverture de l'embouchure par les lèvres pour une flûte traversière.
DECOUVest la proportion de la surface du trou d'embouchure laissée découverte par les lèvres (ici, 60%).

LIBERTE SUR LES PARAMETRES DE L' ANCHE DMA DKA DFCM DFCP DCLOUT

DMA	DKA	DFCM	DFCP	DCLOUT
0.1	0.1	0.1	0.	0.

(Tous ces paramètres servent à définir la liberté dont dispose l'instrumentiste pour faire varier les paramètres de l'anche et les paramètres de couplage anche-tuyau. Ce sont des variations relatives des paramètres MA,KA FCM et CLOUT que l'instrumentiste peut réaliser autour de leurs valeurs nominales. Ici, on a supposé 10% de liberté sur la masse effective et la raideur effective du jet (DMA = DKA = 0.1), et 10% sur la constante de couplage jet-tube (DFCM = 0.1). La quantité DFCP est une variation absolue de la constante de couplage anche-tuyau. On a supposé aussi DCLOUT = 0, soit 0% de liberté sur la correction de longueur à l'embouchure. TUTT utilise ces paramètres pour calculer les champs de liberté de l'instrument.

DONNEES CONCERNANT L' AUTO ENTRETIEN GA GB

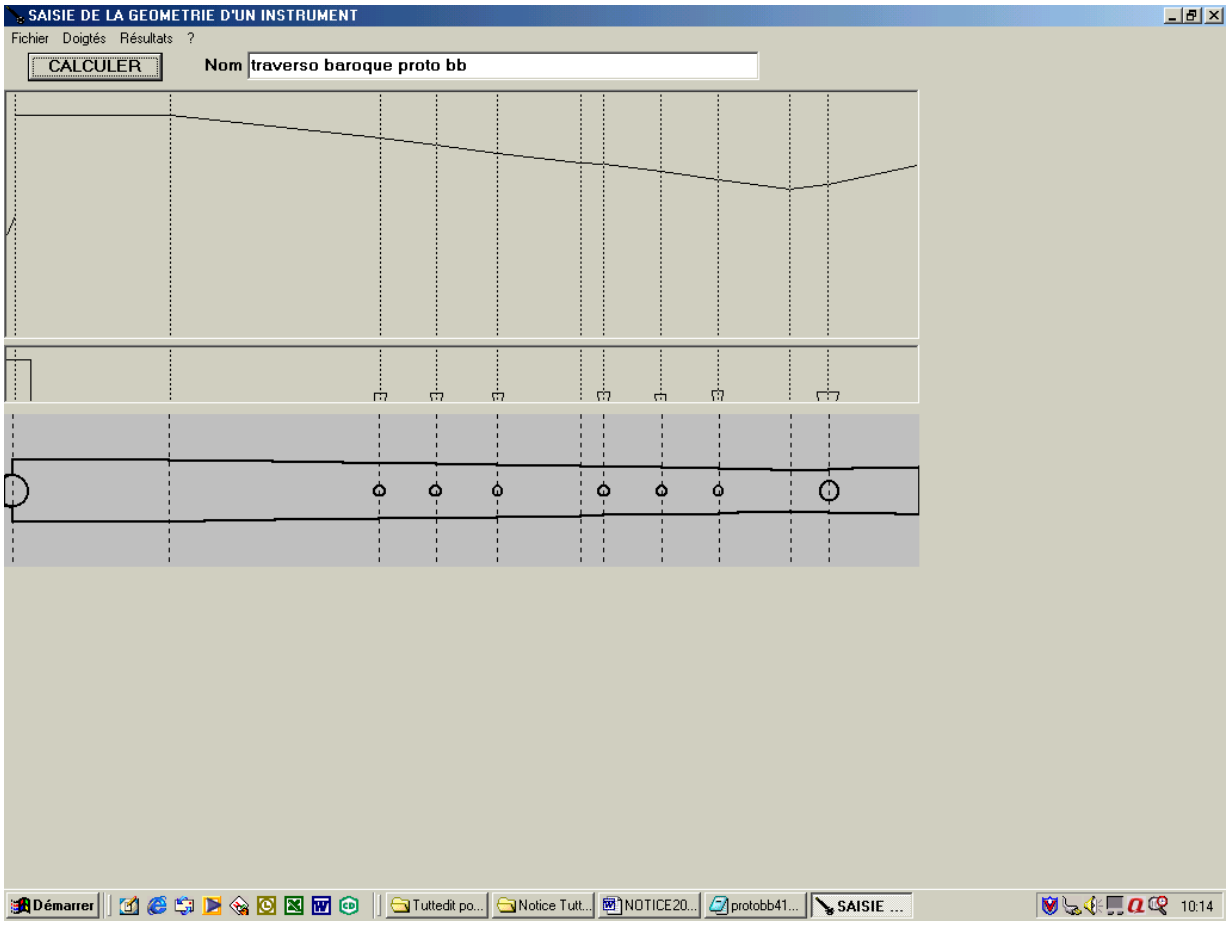
GA	GB
700.	1.

(Ces paramètres décrivent la relation non linéaire entre la puissance générée par l'auto entretien de l'oscillation, et l'énergie stockée dans le résonateur. GA et GB fixent l'amplitude des champs sonores dans le tuyau. Faute d'une connaissance détaillée du mécanisme d'auto entretien, la valeur de ces paramètres est actuellement très pifométrée. Les recherches sont en cours!).

COEFFICIENTS SUR LES CRITERES DE SATISFACTION CJUS CTIM CVOL CEMI CLIB

CJUS	CTIM	CVOL	CEMI	CLIB
1.	0.	0.	0.	0.

(Le critère de satisfaction global repose ici exclusivement sur la justesse : CJUS = 1; Les autres critères (timbre, volume, facilité d'émission, largeur des champs de liberté) ont un coeficient de pondération nul, c'est à dire qu'ils comptent pour du beurre!).



Le plan de perce du traverso baroque correspondant au fichier Tutt ci-dessus

Hautbois baroque

Les commentaires sont en italique.

Hautbois baroque Bizey
(C'est la ligne de titre). Il s'agit du hautbois Bizey du musée d'Oxford

PARAMETRES PHYSIQUES DE L' AIR :RHOA,P0,GAMMA, CV, ETA, TONEW,DLAMBA
1.204 1.014E5 1.400 719. 1.8E-5 11.7 2.4E-2
(ρ_A est la densité de l'air; P_0 est la pression atmosphérique; Cv est la chaleur spécifique de l'air; η est la viscosité de l'air, Tonew ne sert à rien, et λ est la conductivité thermique de l'air. On ne doit rien changer dans cette ligne).

NOMBRE DE TRONCONS DE LA LIGNE (-1) N
19
(Ici, le tube principal est divisé en 19 troncs de cône, plus 1 pour décrire l'embouchure).

BAS DE LIGNE OUVERT OU FERME C1 (0=OUVERT, 1=FERME)
0.
(Ici, le bas du tube est ouvert)

TABLEAU PERCE D0 (DIMENSION N+1)

4.25E-02 3.00E-02 2.13E-02 2.00E-02 1.98E-02 1.51E-02 1.45E-02
1.36E-02 1.30E-02 1.22E-02 1.22E-02 1.15E-02 9.80E-03 9.80E-03
8.96E-03 8.05E-03 6.00E-03 6.00E-03 2.00E-03 6.50E-03
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus proche de l'embouchure; L'ante pénultième chiffre, ici 6 mm, est le diamètre de la perce de l'instrument à l'endroit où elle rencontre le bocal ; L'avant dernier chiffre, ici 2mm, est le diamètre du bocal à sa petite extrémité ; Le dernier chiffre, ici 6.5 mm, est le diamètre équivalent de l'extrémité de l'anche).
Attention : mettre D0 = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TABLEAU PERCE DL (DIMENSION N+1)
4.25E-02 4.50E-02 3.00E-02 2.13E-02 2.00E-02 1.63E-02 1.51E-02
1.45E-02 1.36E-02 1.30E-02 1.22E-02 1.22E-02 1.06E-02 9.80E-03
9.80E-03 8.96E-03 8.05E-03 6.00E-03 5.00E-03 3.00E-03
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus loin de l'embouchure; L'avant dernier chiffre, ici 5 mm, est le diamètre du bocal à son gros bout ; Le dernier chiffre, ici 3 mm, est le diamètre équivalent de l'anche au niveau de son raccordement avec le bocal).

TABLEAU SURFACE LIBRE DE LA PERCE/SURFACE OFFICIELLE OFILIB (DIM N+1)
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
(ce chiffre 2 caractérise la rugosité de la perce. Ici, on a supposé ici que la surface libre de la perce était 2 fois plus grande que la surface d'un tube à parois lisses de mêmes dimensions. Valeur recommandée : 1.5 pour du métal, 2 pour du bois poli.).

TABLEAU DES TRONCONS DE LA LIGNE PRINCIPALE L (DIMENSION N+1)
5.40E-03 3.91E-02 3.75E-02 2.90E-02 2.15E-02 5.02E-02 3.13E-02
5.20E-02 3.20E-02 3.28E-02 1.20E-03 2.30E-02 3.85E-02 1.00E-03
3.25E-02 3.78E-02 7.57E-02 4.15E-02 5.70E-02 2.30E-02
(Ce sont les longueurs des tronçons du tube principal; L'avant dernier chiffre, ici 5.7 cm, est la longueur du bocal ; Le dernier chiffre, ici 2.3 cm, est la longueur de l'anche, comptée entre son apex et l'endroit de son raccordement au bocal);
Attention : mettre L = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TEMPERATURE DE L' AIR EN TETE? ET TEMPERATURE AMBIANTE(CELSIUS) TT TB
25. 20.
(Ici : Température = 25°C près de l'embouchure, et 20°C dans la pièce).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX D0P (DIMENSION N)
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 6.22E-03 0.00E+00 7.15E-03 5.22E-03
4.10E-03 4.80E-03 2.80E-03 2.80E-03 0.00E+00 2.20E-03 2.20E-03
2.85E-03 2.80E-03 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de la face externe du tube; Certains raccordements entre troncs de cône ne correspondent pas à des trous latéraux, mais simplement à des changement de conicité de la perce principale. C'est le cas par exemple au niveau du pavillon et au niveau du bocal. On a rentré dans Tutt des trous de diamètre nul pour ces « trous latéraux » particuliers).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX DLP (DIMENSION N)
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 8.50E-03 0.00E+00 9.00E-03 7.25E-03
5.70E-03 6.70E-03 2.80E-03 2.80E-03 0.00E+00 2.20E-03 2.20E-03
3.50E-03 3.00E-03 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de l'intérieur du tube. On notera le sous coupage des trous de jeu, qui se traduit par un diamètre D0P inférieur au diamètre DLP correspondant).

TABLEAU LONGUEUR DES TRONCONS LATERAUX LP0 (DIMENSION N)
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 3.50E-03 0.00E+00 5.20E-03 5.00E-03
4.70E-03 4.50E-03 5.00E-03 5.00E-03 0.00E+00 6.00E-03 6.00E-03
5.50E-03 7.00E-03 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00

(C'est la hauteur des cheminées des trous latéraux, ou l'épaisseur de la paroi du tube, si le trou est percé perpendiculairement à l'axe du tube. Certains raccordements entre troncs de cône ne correspondent pas à des trous latéraux, mais simplement à des changement de conicité de la perce principale. C'est le cas par exemple au niveau du pavillon et au niveau du bocal. On a rentré dans Tutt des trous de longueur nulle pour ces « trous latéraux » particuliers).

TABLEAU STYLE DES CLES ISTYLE (DIMENSION N)
0 0 0 0 0 2 2 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
(Il y a deux clés de type « plateaux pleins » au niveau des trous latéraux n° 6 et 7 correspondant respectivement aux clés de do et de mib).

TABLEAU LEVEE DES CLES LEVEE (DIMENSION N)
0 0 0 0 0 4.e-3 4.e-3 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
(*La levée des clés est de 4 mm).*

FREQUENCE DU LA DE REFERENCE FLA
407.
(La 407 : voilà le diapason bizarre de cet instrument, dixit le conservateur du musée d'Oxford).

Température de reference ITMPNT (0 si teqj, 1 si teoj)
1
(La justesse de chaque note sera jugée par rapport à un tempérament égal à octaves justes)

TESSITURE NTESSC, NTESSG, NTESSB
27 27 9
(Ici, on étudie 27 doigtés différents, et la tessiture de l'instrument comprend 27 notes. Il y a autant de doigtés étudiés que de degrés de la gamme, car on n'a retenu que le doigté principal pour chaque note ; La note la plus basse est le ré, soit 9 demi-tons au dessous du La de référence).

TABLE DES DOIGTES DOIGTE(I,J) (NTESSC LIGNES, N COLONNES)
Chaque ligne du tableau correspond à une note de la tessiture; L'avant-dernier nombre de la ligne rappelle son numéro dans le tableau, le dernier donne le numéro du degré de la gamme auquel il correspond.
Chaque colonne du tableau correspond à un trou latéral : 1 = trou fermé, 0 = trou ouvert.
On notera qu'ici, les trois derniers « trous latéraux » n° N-2, N-1 et N sont toujours fermés : ce ne sont pas des trous de jeu, mais simplement des raccordements entre tronçons du tube principal.
Le chiffre du tableau situé juste après le nom de la note (3ème avant la fin de chaque ligne) donne la justesse expérimentale de l'instrument pour le doigté correspondant (C'est la justesse expérimentale, mesurée sur sur l'instrument réel avec un accordeur électronique, en prenant soin de se placer pour chaque note aussi près que possible du milieu du champ de liberté en fréquence. Ces chiffres expérimentaux sont destinés à être comparés avec les prédictions de TUTT). Ici, la justesse de l'instrument n'a pas été mesurée, on a rentré ici une valeur réelle quelconque, en l'occurrence 0.0.

1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ' do '0.0 1 1
1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ' do# '0.0 2 2
(NB : c'est le même doigté pour do et do# graves)
1 1 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ' ré '0.03 3
1 1 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ' ré# '0.0 4 4
1 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ' mi '0.0 5 5
1 1 1 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ' fa '0.06 6
1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ' fa# '0.0 7 7
1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ' sol '0.0 8 8
1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 ' sol# '0.0 9 9
1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 ' la '0.0 10 10
1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1 1 ' la# '0.0 11 11

```
 1  1  1  0  1  0  1  0  0  0  0  1  0  0  0  1  1  1  1 ' si   '0.0 12      12
 1  1  1  0  1  0  1  0  0  0  0  1  0  0  1  0  1  1  1 ' do   '0.0       13      13
 1  1  1  0  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  0  1  1  1 ' do#  '0.0       14      14
(NB : on a choisi le doigté long pour le do# médium)
 1  1  1  0  1  0  1  1  1  1  1  1  1  1  1  0  1  1  1 ' ré   '0.015     15
 1  1  1  0  1  0  0  1  1  1  1  1  1  1  1  0  1  1  1 ' ré#  '0.0       16      16
 1  1  1  0  1  0  1  0  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 ' mi   '0.0       17      17
 1  1  1  0  1  0  1  1  0  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 ' fa   '0.018     18
 1  1  1  0  1  0  1  1  1  0  0  1  1  1  1  1  1  1  1 ' fa#  '0.0       19      19
 1  1  1  0  1  0  1  0  0  0  0  1  1  1  1  1  1  1  1 ' sol  '0.0       20      20
 1  1  1  0  1  0  1  0  0  0  0  1  0  1  1  1  1  1  1 ' sol# '0.0       21      21
 1  1  1  0  1  0  1  0  0  0  0  1  0  0  1  1  1  1  1 ' la   '0.0 22     22
 1  1  1  0  1  0  1  0  0  0  0  1  1  1  0  1  1  1  1 ' la#  '0.0       23      23
 1  1  1  0  1  0  1  0  0  0  0  1  0  0  0  1  1  1  1 ' si   '0.0 24     24
(NB : on a choisi le doigté court pour le si aigu)
 1  1  1  0  1  0  1  0  0  0  0  1  0  0  0  0  1  1  1 ' do   '0.0       25      25
 1  1  1  0  1  0  0  0  0  1  1  1  1  1  1  0  1  1  1 ' do#  '0.0       26      26
 1  1  1  0  1  0  0  0  0  0  0  1  1  1  1  0  1  1  1 ' ré   '0.027     27
```

DONNEES CONCERNANT L' EMBOUCHURE

IFLUTE	FCM	FCP	G0	LA0	alpha	E0	V0	V1	LEVRES	PAREMB	DECOUV
1	0.	0.	9.e-3	1.4e-2	1.	1.e-4	1.e10	0.	0.	0.	0.

(Ici, IFLUTE = 1 nous dit qu'on a affaire à un instrument à anche « roseau ». Ce paramètre n'est utilisé que pour calculer la correction de longueur à l'embouchure; en l'occurrence ici : pas de correction) ;
FCM =0, FCP = 0 sont les paramètres de couplage entre l'anche aérienne et le tuyau; en l'occurrence ici : FCM = 0 indique qu'on néglige le couplage à l'anche. C'est la prescription que je recommande actuellement pour calculer tous les instruments à anche solide avec Tutt). Avec ce choix de couplage, les paramètres suivants ne servent à rien, et ne sont là que pour mémoire.
G0 est la largeur de l'anche : en l'occurrence ici 9 mm;
LA0 est la longueur vibrante de l'anche aérienne : ici 1.4 cm;
Alpha est un paramètre permettant d'ajuster finement la raideur de l'anche. On a pris ici alpha = 1;
E0 est l'épaisseur de l'anche, ici 0.1 mm;
V0 est le module d'élasticité du roseau: ici 10 GPa. V1 n'est pas utilisé.
LEVRES PAREMB et DECOUV ne sont utilisés que pour les flûtes et sont mis ici arbitrairement à zéro.

LIBERTE SUR LES PARAMETRES DE L' ANCHE

DMA	DKA	DFCM	DFCP	DCLOUT
0.1	0.1	0.1	0.	0.

(Tous ces paramètres servent à définir la liberté dont dispose l'instrumentiste pour faire varier les paramètres de l'anche et les paramètres de couplage anche-tuyau. Ce sont des variations relatives des paramètres MA,KA FCM et CLOUT que l'instrumentiste peut réaliser autour de leurs valeurs nominales. Ici, on a supposé 10% de liberté sur la masse effective et la raideur effective de l'anche (DMA = DKA = 0.1), et 10% sur la constante de couplage anche-tube (DFCM = 0.1). La quantité DFCP est une variation absolue de la constante de couplage anche-tuyau. On a supposé aussi DCLOUT = 0, soit 0% de liberté sur la correction de longueur à l'embouchure. TUTT utilise ces paramètres pour calculer les champs de liberté de l'instrument. Dans la mesure où on a négligé le couplage à l'anche, les paramètres ci-dessus ne servent à rien.

DONNEES CONCERNANT L' AUTO ENTRETIEN

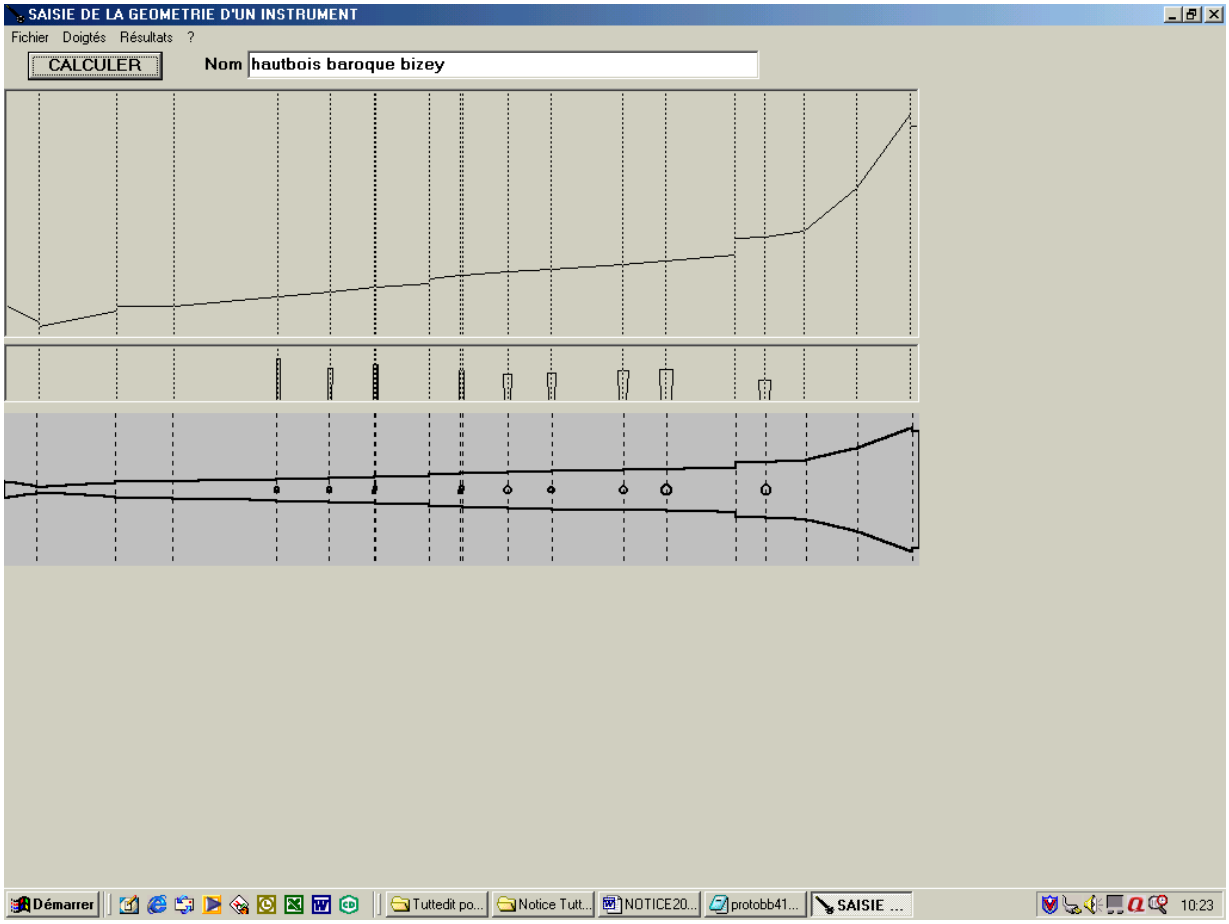
GA	GB
700.	1.

(Ces paramètres décrivent la relation non linéaire entre la puissance générée par l'auto entretien de l'oscillation, et l'énergie stockée dans le résonateur. GA et GB fixent l'amplitude des champs sonores dans le tuyau. Faute d'une connaissance détaillée du mécanisme d'auto entretien, la valeur de ces paramètres est actuellement très pifométrée. Les recherches sont en cours!).

COEFFICIENTS SUR LES CRITERES DE SATISFACTION

CJUS	CTIM	CVOL	CEMI	CLIB
1.	0.	0.	0.	0.

(Le critère de satisfaction global repose ici exclusivement sur la justesse : CJUS = 1; Les autres critères (timbre, volume, facilité d'émission, largeur des champs de liberté) ont un coeficient de pondération nul, c'est à dire qu'ils comptent pour du beurre!).



Le plan de perce du hautbois baroque correspondant au fichier Tutt ci-dessus

Saxophone

Les commentaires sont en italique.

Saxophone soprano
(C'est la ligne de titre). Il s'agit d'un saxophone bon marché d'une marque étrangère dont je tairai le nom.

PARAMETRES PHYSIQUES DE L' AIR :RHOA,P0,GAMMA, CV, ETA, TONEW,DLAMBA
1.204 1.014E5 1.400 719. 1.8E-5 11.7 2.4E-2
(ρ_A est la densité de l'air; P_0 est la pression atmosphérique; Cv est la chaleur spécifique de l'air; η est la viscosité de l'air, Tonew ne sert à rien, et λ est la conductivité thermique de l'air. On ne doit rien changer dans cette ligne).

NOMBRE DE TRONCONS DE LA LIGNE (-1) N
21

(Ici, le tube principal est divisé en 21 troncs de cône, plus 1 pour décrire l'embouchure).

BAS DE LIGNE OUVERT OU FERME C1 (0=OUVERT, 1=FERME)
0.
(Ici, le bas du tube est ouvert)

TABLEAU PERCE D0 (DIMENSION N+1)
4.58E-02 4.31E-02 4.07E-02 3.86E-02 3.65E-02 3.43E-02 3.23E-02
3.05E-02 2.88E-02 2.73E-02 2.61E-02 2.41E-02 2.28E-02 2.14E-02
2.05E-02 1.96E-02 1.77E-02 1.59E-02 1.17E-02 9.00E-03 1.00E-02
1.10E-02
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus proche de l'embouchure; L'avant dernier chiffre, ici 10 mm, est le diamètre du bocal à sa petite extrémité ; Le dernier chiffre, ici 11 mm, est le diamètre équivalent de l'extrémité de l'anche).
Attention : mettre D0 = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TABLEAU PERCE DL (DIMENSION N+1)
5.00E-02 4.58E-02 4.31E-02 4.07E-02 3.86E-02 3.65E-02 3.43E-02
3.23E-02 3.05E-02 2.88E-02 2.73E-02 2.61E-02 2.41E-02 2.28E-02
2.14E-02 2.05E-02 1.96E-02 1.77E-02 1.50E-02 1.17E-02 1.00E-02
1.00E-02
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus loin de l'embouchure; Le dernier chiffre, ici 10 mm, est le diamètre équivalent du bec au niveau de son raccordement avec le bocal).

TABLEAU SURFACE LIBRE DE LA PERCE/SURFACE OFFICIELLE OFILIB (DIM N+1)
1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5
1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5
1.5 1.5
(Ce chiffre 1.5 caractérise la rugosité de la perce. Ici, on a supposé ici que la surface libre de la perce était 1.5 fois plus grande que la surface d'un tube à parois lisses de mêmes dimensions. Valeur recommandée : 1.5 pour du métal, 2 pour du bois poli.).

TABLEAU DES TRONCONS DE LA LIGNE PRINCIPALE L (DIMENSION N+1)
6.70E-02 4.30E-02 3.80E-02 3.40E-02 3.40E-02 3.50E-02 3.10E-02
2.90E-02 2.80E-02 2.30E-02 2.00E-02 3.10E-02 2.10E-02 2.20E-02
1.50E-02 1.40E-02 3.00E-02 3.00E-02 5.30E-02 4.50E-02 1.20E-02
3.20E-02
(Ce sont les longueurs des tronçons du tube principal; Le dernier chiffre, ici 3.2 cm, est la longueur de l'anche, comptée entre son apex et l'endroit de son raccordement au bocal);
Attention : mettre L = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TEMPERATURE DE L' AIR EN TETE? ET TEMPERATURE AMBIANTE(CELSIUS) TT TB
25. 20.
(Ici : Température = 25°C près de l'embouchure, et 20°C dans la pièce).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX D0P (DIMENSION N)
3.10E-02 3.05E-02 2.75E-02 2.80E-02 2.07E-02 2.37E-02 1.95E-02
2.13E-02 1.85E-02 1.45E-02 1.80E-02 1.10E-02 9.00E-03 1.23E-02
7.30E-03 6.00E-03 1.50E-03 0.00E+00 1.00E-03 0.00E+00 0.00E+00
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de la face externe du tube; Certains raccordements entre troncs de cône ne correspondent pas à des trous latéraux, mais simplement à des changement de conicité de la perce principale. C'est le cas au niveau du bocal. On a rentré dans Tutt des trous de diamètre nul pour ces « trous latéraux » particuliers).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX DLP (DIMENSION N)
3.10E-02 3.05E-02 2.75E-02 2.80E-02 2.07E-02 2.37E-02 1.95E-02

2.13E-02 1.85E-02 1.45E-02 1.80E-02 1.10E-02 9.00E-03 1.23E-02
7.30E-03 6.00E-03 1.50E-03 0.00E+00 1.00E-03 0.00E+00 0.00E+00
(C'est le diamètre des trous latéraux, au voisinage de l'intérieur du tube. On notera que les trous de jeu, sont cylindriques, ce qui se traduit par un diamètre D0P égal au diamètre DLP correspondant).

TABLEAU LONGUEUR DES TRONCONS LATERAUX LP0 (DIMENSION N)
3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03
3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03
3.00E-03 3.00E-03 3.00E-03 0.00E+00 3.00E-03 0.00E+00 0.00E+00
(C'est la hauteur des cheminées des trous latéraux. Certains raccordements entre troncs de cône ne correspondent pas à des trous latéraux, mais simplement à des changement de conicité de la perce principale. C'est le cas par exemple au niveau du bocal. On a rentré dans Tutt des trous de longueur nulle pour ces « trous latéraux » particuliers).

TABLEAU STYLE DES CLES ISTYLE (DIMENSION N)
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
(Toutes les clés sont de type « plateaux pleins », codées dans le programme par un « 2 »).

TABLEAU LEVEE DES CLES LEVEE (DIMENSION N)
0.0031 0.00305 0.00275 0.0028 0.00207 0.00237 0.00195 0.00213 0.00185 0.00145
0.0018 0.0011 0.0009 0.00123 0.00073 0.0006 0.00015 0.0001 0.0001 0.0001
0.0001
(*La levée des clés est un paramètre important de la justesse d'un saxophone).*

FREQUENCE DU LA DE REFERENCE FLA
440.
(La 440 : voilà le diapason).

Tempérament de reference ITMPNT (0 si teqj, 1 si teoj)
1
(La justesse de chaque note sera jugée par rapport à un tempérament égal à octaves justes)

TESSITURE NTESSC, NTESSG, NTESSB
28 28 13
(Ici, on étudie 28 doigtés différents, et la tessiture de l'instrument comprend 28 notes. Il y a autant de doigtés étudiés que de degrés de la gamme, car on n'a retenu que le doigté principal pour chaque note;Je n'ai pas rentré ici les doigtés alternatifs ni les doigtés de multiphoniques ! La note la plus basse est le lab (réel), ou encore sib (pensé) car l'instrument est transpositeur, soit 13 demi-tons au dessous du La de référence).

TABLE DES DOIGTES DOIGTE(I,J) (NTESSC LIGNES, N COLONNES)

Chaque ligne du tableau correspond à une note de la tessiture; L'avant-dernier nombre de la ligne rappelle son numéro dans le tableau, le dernier donne le numéro du degré de la gamme auquel il correspond.
Chaque colonne du tableau correspond à un trou latéral : 1 = trou fermé, 0 = trou ouvert.
On notera qu'ici, les deux derniers « trous latéraux » n° N-1 et N sont toujours fermés : ce ne sont pas des trous de jeu, mais simplement des raccordements entre tronçons du tube principal.
Le nom associé à chaque doigté est celui de la note pensé par le musicien quand il la joue (le saxophone est transpositeur !). Mais le programme Tutt s'y retrouve car il sait que le doigté n°1 correspond à un sib (pensé), mais aussi à une note située NTESSB=13 demi tons au dessous du la de référence, soit un lab (réel).
Le chiffre du tableau situé juste après le nom de la note (3ème avant la fin de chaque ligne) donne la justesse expérimentale de l'instrument pour le doigté correspondant (C'est la justesse expérimentale,

mesurée sur sur l'instrument réel avec un accordeur électronique, en prenant soin de se placer pour chaque note aussi près que possible du milieu du champ de liberté en fréquence. Ces chiffres expérimentaux sont destinés à être comparés avec les prédictions de TUTT). Ici, la justesse de l'instrument n'a pas été mesurée, on a rentré ici une valeur réelle quelconque, en l'occurrence 0.0.

```
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'sib   '0.0    1        1
 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'si    '0.0    2        2
 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'do    '0.0    3        3
 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'do#   '0.0    4        4
 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'ré    '0.0    5        5
 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'ré#   '0.0    6        6
 0 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'mi    '0.0    7        7
 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'fa    '0.0    8        8
 0 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'fa#   '0.0    9        9
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'sol   '0.0    10       10
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'sol#  '0.0    11       11
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 'la    '0.0    12       12
 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 'la#   '0.0    13       13
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 'si    '0.0    14       14
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 'do    '0.0    15       15
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 'do#   '0.0    16       16
 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 'ré    '0.0    17       17
 0 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 'ré#   '0.0    18       18
 0 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 'mi    '0.0    19       19
 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 'fa    '0.0    20       20
 0 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 'fa#   '0.0    21       21
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 'sol   '0.0    22       22
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 'sol#  '0.0    23       23
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 0 1 'la    '0.0    24       24
 0 0 1 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 0 1 'la#   '0.0    25       25
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1 'si    '0.0    26       26
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 1 1 0 1 1 1 1 0 1 'do    '0.0    27       27
 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 1 'do#   '0.0    28       28
```

DONNEES CONCERNANT L' EMBOUCHURE

IFLUTE	FCM	FCP	G0	LA0	alpha	E0	V0	V1	LEVRES	PAREMB	DECOUV
1	0.	0.	1.3e-2	1.5e-2	1.	3.e-4	1.e10	0.	0.	0.	0.

(Ici, IFLUTE = 1 nous dit qu'on a affaire à un instrument à anche « roseau ». Ce paramètre n'est utilisé que pour calculer la correction de longueur à l'embouchure; en l'occurrence ici : pas de correction) ;
FCM =0, FCP = 0 sont les paramètres de couplage entre l'anche aérienne et le tuyau; en l'occurrence ici : FCM = 0 indique qu'on néglige le couplage à l'anche. C'est la prescription que je recommande actuellement pour calculer tous les instruments à anche solide avec Tutt). Avec ce choix de couplage, les paramètres suivants ne servent à rien, et ne sont là que pour mémoire.
G0 est la largeur de l'anche : en l'occurrence ici 13 mm;
LA0 est la longueur vibrante de l'anche aérienne : ici 1.5 cm;
Alpha est un paramètre permettant d'ajuster finement la raideur de l'anche. On a pris ici alpha = 1;
E0 est l'épaisseur de l'anche, ici 0.3 mm;
V0 est le module d'élasticité du roseau: ici 10 GPa. V1 n'est pas utilisé.
LEVRES PAREMB et DECOUV ne sont utilisés que pour les flûtes et sont mis ici arbitrairement à zéro.

LIBERTE SUR LES PARAMETRES DE L' ANCHE

DMA	DKA	DFCM	DFCP	DCLOUT
0.1	0.1	0.1	0.	0.

(Tous ces paramètres servent à définir la liberté dont dispose l'instrumentiste pour faire varier les paramètres de l'anche et les paramètres de couplage anche-tuyau. Ce sont des variations relatives des paramètres MA,KA FCM et CLOUT que l'instrumentiste peut réaliser autour de leurs valeurs nominales. Ici, on a supposé 10% de liberté sur la masse effective et la raideur effective de l'anche (DMA = DKA =

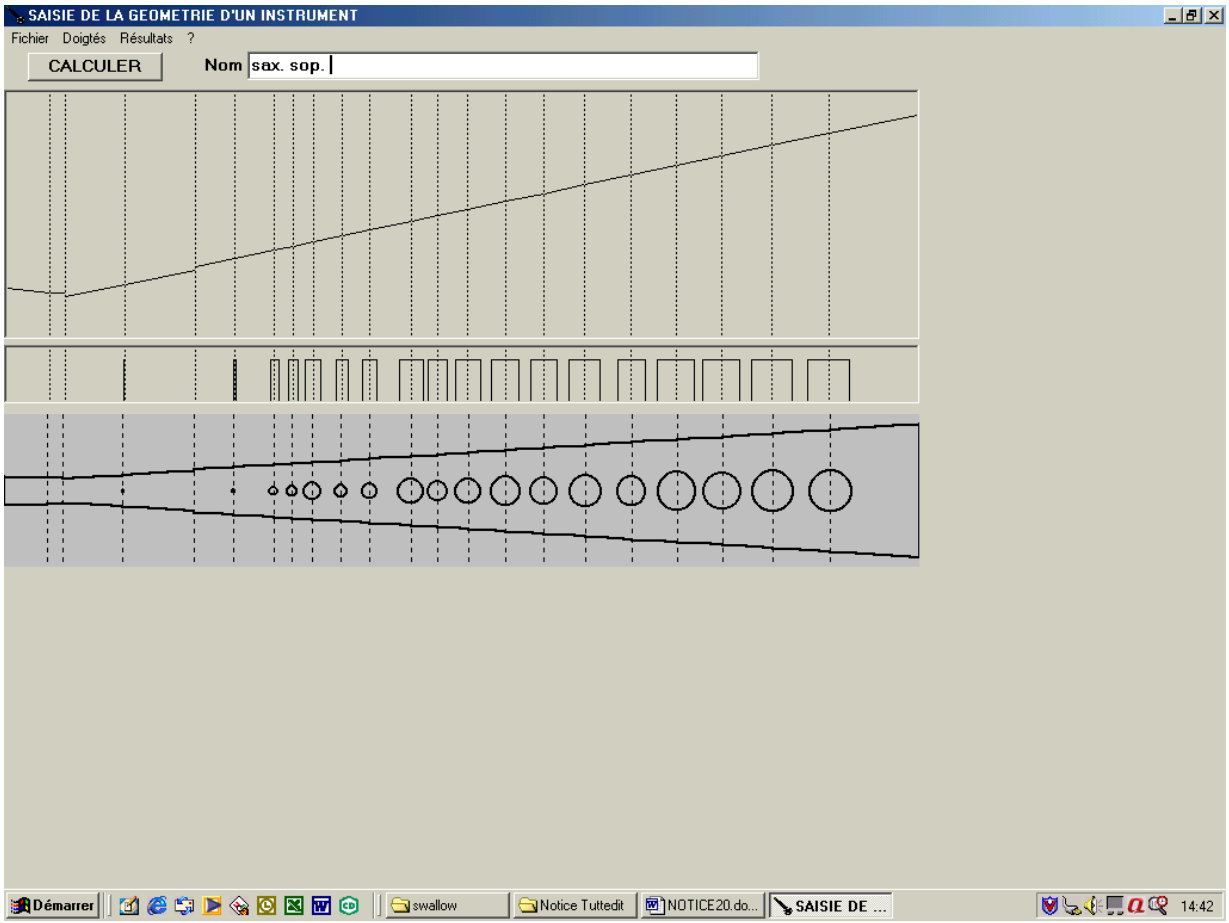
0.1), et 10% sur la constante de couplage anche-tube (DFCM = 0.1). La quantité DFCP est une variation absolue de la constante de couplage anche-tuyau. On a supposé aussi DCLOUT = 0, soit 0% de liberté sur la correction de longueur à l'embouchure. TUTT utilise ces paramètres pour calculer les champs de liberté de l'instrument. Dans la mesure où on a négligé le couplage à l'anche, les paramètres ci-dessus ne servent à rien.

DONNEES CONCERNANT L' AUTO ENTRETIEN GA GB
700. 1.

(Ces paramètres décrivent la relation non linéaire entre la puissance générée par l'auto entretien de l'oscillation, et l'énergie stockée dans le résonateur. GA et GB fixent l'amplitude des champs sonores dans le tuyau. Faute d'une connaissance détaillée du mécanisme d'auto entretien, la valeur de ces paramètres est actuellement très pifométrée. Les recherches sont en cours!).

COEFFICIENTS SUR LES CRITERES DE SATISFACTION CJUS CTIM CVOL CEMI CLIB
1. 0. 0. 0. 0.

(Le critère de satisfaction global repose ici exclusivement sur la justesse : CJUS = 1; Les autres critères (timbre, volume, facilité d'émission, largeur des champs de liberté) ont un coeficient de pondération nul, c'est à dire qu'ils comptent pour du beurre!).



Le plan de perce du saxophone soprano correspondant au fichier Tutt ci-dessus

Trompette

Les commentaires sont en italique.

Trompette sib

(C'est la ligne de titre). Il s'agit d'une excellente trompette européenne dont beaucoup de morceaux sont fabriqués en Chine, et dont je tairai le nom pour éviter les ennuis.

PARAMETRES PHYSIQUES DE L' AIR :RHOA,P0,GAMMA, CV, ETA, TONEW,DLAMBA
1.204 1.014E5 1.400 719. 1.8E-5 11.7 2.4E-2

(ρ_A est la densité de l'air; P_0 est la pression atmosphérique; Cv est la chaleur spécifique de l'air; η est la viscosité de l'air, Tonew ne sert à rien, et λ est la conductivité thermique de l'air. On ne doit rien changer dans cette ligne).

NOMBRE DE TRONCONS DE LA LIGNE (-1) N
14

(Ici, le tube principal est divisé en 14 troncs de cône, plus 1 pour décrire l'embouchure).

BAS DE LIGNE OUVERT OU FERME C1 (0=OUVERT, 1=FERME)
0.

(Ici, le bas du tube est ouvert)

TABLEAU PERCE D0 (DIMENSION N+1)
7.61E-02 4.08E-02 3.00E-02 1.86E-02 1.17E-02 1.17E-02 1.30E-02
1.17E-02 1.30E-02 7.80E-03 9.90E-03 3.66E-03 3.66E-03 1.00E-02
1.70E-02
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus proche de l'embouchure;
Le dernier chiffre, ici 17 mm, est le diamètreinterne de la pièce d'embouchure).
Attention : mettre D0 = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TABLEAU PERCE DL (DIMENSION N+1)
1.20E-01 7.61E-02 4.08E-02 3.00E-02 1.86E-02 1.17E-02 1.30E-02
1.17E-02 1.30E-02 1.17E-02 9.90E-03 7.80E-03 3.66E-03 3.66E-03
1.00E-02
(Ce sont les diamètres des tronçons du tube principal, à leur extrémité la plus loin de l'embouchure;
L'avant dernier chiffre, ici 3.6 mm, est le diamètre du grain).

TABLEAU SURFACE LIBRE DE LA PERCE/SURFACE OFFICIELLE OFILIB (DIM N+1)
1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5
1.5 1.5 1.5 1.5 1.5
(Ce chiffre 1.5 caractérise la rugosité de la perce. Ici, on a supposé ici que la surface libre de la perce était 1.5 fois plus grande que la surface d'un tube à parois lisses de mêmes dimensions. Valeur recommandée : 1.5 pour du métal, 2 pour du bois poli.).

TABLEAU DES TRONCONS DE LA LIGNE PRINCIPALE L (DIMENSION N+1)
1.40E-02 3.60E-02 4.30E-02 1.54E-01 2.45E-01 2.42E-01 1.50E-02
2.86E-01 1.50E-02 2.19E-01 3.00E-03 7.20E-02 2.00E-03 6.00E-03
7.00E-03
(Ce sont les longueurs des tronçons du tube principal;
Attention : mettre L = 0 est interdit : ça fait planter le programme.

TEMPERATURE DE L' AIR EN TETE? ET TEMPERATURE AMBIANTE(CELSIUS) TT TB
25. 20.

(Ici : Température = 25°C près de l'embouchure, et 20°C dans la pièce).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX D0P (DIMENSION N)

0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
(Le programme Tutt suppose par défaut l'existence d'un trou latéral à chaque raccordement entre les trons de cône de la perce. La trompette n'ayant pas de trous latéraux, on a rentré ici des diamètres de trous latéraux nuls).

TABLEAU PERCE DES TRONCONS LATERAUX DLP (DIMENSION N)
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
(Même remarque).

TABLEAU LONGUEUR DES TRONCONS LATERAUX LP0 (DIMENSION N)
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
(Même remarque).

TABLEAU STYLE DES CLES ISTYLE (DIMENSION N)
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
(Pas de trous latéraux, et donc, pas de clés !).

TABLEAU LEVEE DES CLES LEVEE (DIMENSION N)
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
(Pas de trous latéraux, pas de clés, et donc, pas de levée de clés !).

FREQUENCE DU LA DE REFERENCE FLA
440.
(La 440 : voilà le diapason).

Tempérament de reference ITMPNT (0 si teqj, 1 si teoj)
1
(La justesse de chaque note sera jugée par rapport à un tempérament égal à octaves justes)

TESSITURE NTESSC, NTESSG, NTESSB
6 25 11
On examine 6 partiels de la trompette (NTESSC = 6), la tessiture de la trompette comprend 25 demi-tons (NTESSG = 25), et la note de base de la tessiture de l'instrument est un « do » (pensé), en fait un sib réel à 11 demi-tons au dessous du la 440 (NTESSB=11).

TABLE DES DOIGTES DOIGTE(I,J) (NTESSC LIGNES, N COLONNES)
Chaque ligne du tableau correspond à une note de la tessiture; L'avant-dernier nombre de la ligne rappelle son numéro dans le tableau, le dernier donne le numéro du degré de la gamme auquel il correspond.
Chaque colonne du tableau correspond à un trou latéral : 1 = trou fermé, 0 = trou ouvert. Dans le cas des cuivres, on n'a pas de trous latéraux, mettre une ligne de « 1 ».

```
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'do   '0.0     1        1
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'sol  '0.0     2        8
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'do   '0.0     3        13
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'mi   '0.0     4        17
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'sol  '0.0     5        20
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'do   '0.0     6        25
```

La première ligne de la table correspond à la note de base (il s'agit du partiel 2 du tuyau, mais on n'a pas besoin de le dire au programme :Tutt le calcule tout seul en cherchant quel est le mode du tuyau situé dans le domaine de fréquence à 11 demi-tons au dessous du la 440) ;
La seconde correspond au sol (pensé) situé 8 demi-tons au dessus de la note de base de la tessiture. Il s'agit du 3è partiel du tuyau, mais là encore, on n'a pas besoin de le dire au programme ;

Les trois lignes suivantes correspondent respectivement au do, mi et sol, à 13, 17 et 20 demi-tons au dessus de la note de base (4è, 5è et 6è partiels du tuyau) ;
La dernière ligne (6è de la liste) correspond au do aigu, dernière note de la tessiture, à 25 demi-tons au dessus de la note de base (8è partiel du tuyau).
On remarquera que le 7è partiel, qui correspondrait à un sib très faux, a été délibérément omis de la table car il n'est en général pas utilisé musicalement.
Le nom associé à chaque doigté est celui de la note pensée par le musicien quand il la joue (la trompette en sib est transpositrice !). Le programme Tutt s'y retrouve car il sait que le doigté n°1 correspond à un do (pensé), mais aussi à une note située NTESSB=11 demi tons au dessous du la de référence, soit un sib (réel).
Le chiffre du tableau situé juste après le nom de la note (3ème avant la fin de chaque ligne) donne la justesse expérimentale de l'instrument pour le doigté correspondant (C'est la justesse expérimentale, mesurée sur sur l'instrument réel avec un accordeur électronique, en prenant soin de se placer pour chaque note aussi près que possible du milieu du champ de liberté en fréquence. Ces chiffres expérimentaux sont destinés à être comparés avec les prédictions de TUTT). Ici, la justesse de l'instrument n'a pas été mesurée, on a rentré ici une valeur réelle quelconque, en l'occurrence 0.0.

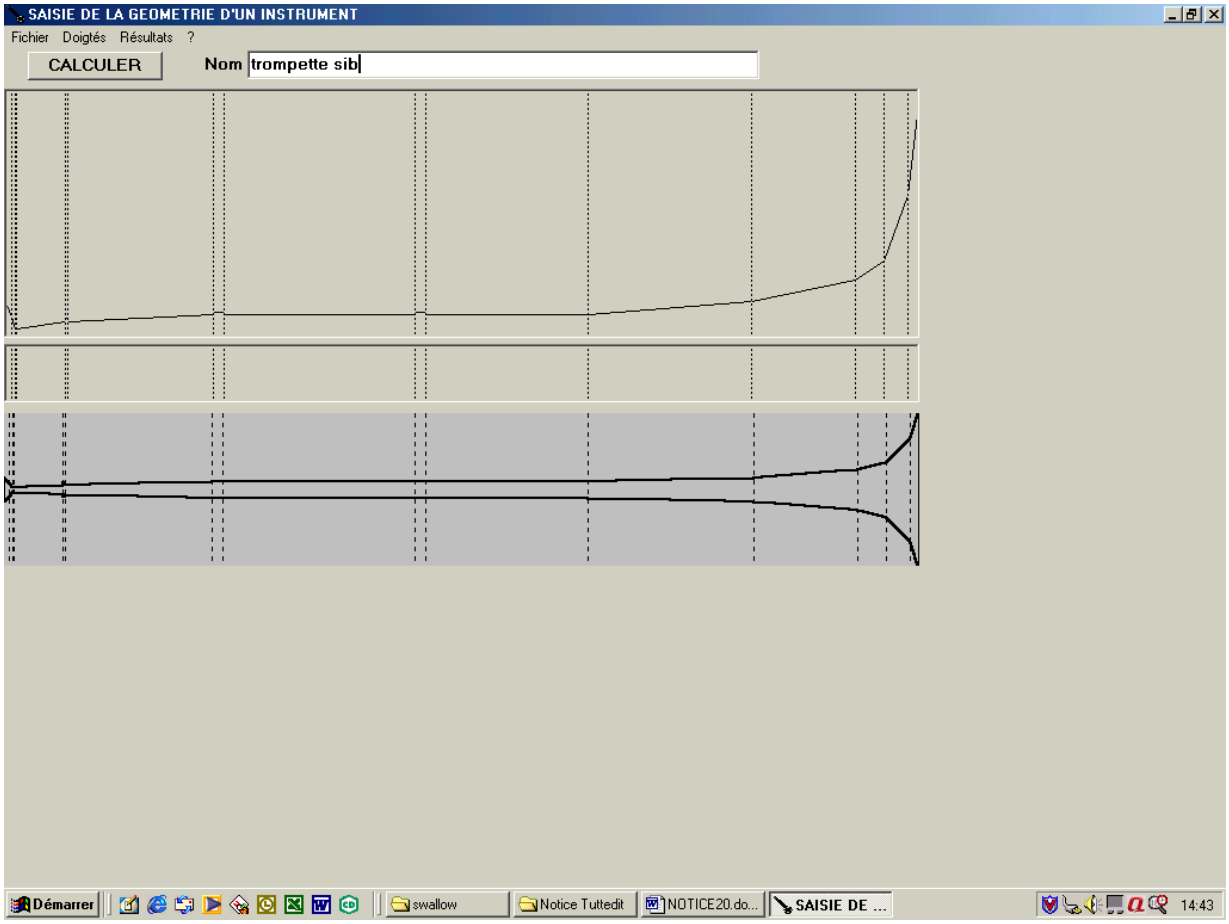
DONNEES CONCERNANT L' EMBOUCHURE
IFLUTE FCM FCP G0 LA0 alpha E0 V0 V1 LEVRES PAREMB DECOUV
2 0. 0. 9.e-3 1.4e-2 1. 1.e-4 1.e10 0. 0. 0. 0.
(Ici, IFLUTE = 2 nous dit qu'on a affaire à un instrument à anche lippale. Ce paramètre n'est utilisé que pour calculer la correction de longueur à l'embouchure; en l'occurrence ici : pas de correction) ;
FCM =0, FCP = 0 sont les paramètres de couplage entre l'anche aérienne et le tuyau; en l'occurrence ici : FCM = 0 indique qu'on néglige le couplage à l'anche. C'est la prescription que je recommande actuellement pour calculer tous les instruments à anche solide avec Tutt). Avec ce choix de couplage, les paramètres suivants ne servent à rien, et ne sont là que pour mémoire.
G0 est la largeur de l'anche lippale: en l'occurrence ici 9 mm;
LA0 est la longueur vibrante de l'anche aérienne : ici 1.4 cm;
Alpha est un paramètre permettant d'ajuster finement la raideur de l'anche. On a pris ici alpha = 1;
E0 est l'épaisseur de l'anche, ici sans objet;
V0 est le module d'élasticité du roseau: ici 10 GPa. V1 n'est pas utilisé.
LEVRES PAREMB et DECOUV ne sont utilisés que pour les flûtes et sont mis ici arbitrairement à zéro.

LIBERTE SUR LES PARAMETRES DE L' ANCHE DMA DKA DFCM DFCP DCLOUT
0.1 0.1 0.1 0. 0.
(Tous ces paramètres servent à définir la liberté dont dispose l'instrumentiste pour faire varier les paramètres de l'anche et les paramètres de couplage anche-tuyau. Ce sont des variations relatives des paramètres MA,KA FCM et CLOUT que l'instrumentiste peut réaliser autour de leurs valeurs nominales. Ici, on a supposé 10% de liberté sur la masse effective et la raideur effective de l'anche (DMA = DKA = 0.1), et 10% sur la constante de couplage anche-tube (DFCM = 0.1). La quantité DFCP est une variation absolue de la constante de couplage anche-tuyau. On a supposé aussi DCLOUT = 0, soit 0% de liberté sur la correction de longueur à l'embouchure. TUTT utilise ces paramètres pour calculer les champs de liberté de l'instrument. Dans la mesure où on a négligé le couplage à l'anche, les paramètres ci-dessus ne servent à rien.

DONNEES CONCERNANT L' AUTO ENTRETIEN GA GB
700. 1.
(Ces paramètres décrivent la relation non linéaire entre la puissance générée par l'auto entretien de l'oscillation, et l'énergie stockée dans le résonateur. GA et GB fixent l'amplitude des champs sonores dans le tuyau. Faute d'une connaissance détaillée du mécanisme d'auto entretien, la valeur de ces paramètres est actuellement très pifométrée. Les recherches sont en cours!).

COEFFICIENTS SUR LES CRITERES DE SATISFACTION CJUS CTIM CVOL CEMI CLIB
1. 0. 0. 0. 0.

(Le critère de satisfaction global repose ici exclusivement sur la justesse : CJUS = 1; Les autres critères (timbre, volume, facilité d'émission, largeur des champs de liberté) ont un coeficient de pondération nul, c'est à dire qu'ils comptent pour du beurre!).



Le plan de perce de la trompette correspondant au fichier Tutt ci-dessus

4. Mode d'emploi du logiciel d'édition TUTTEDIT

TUTTEDIT est un programme qui permet d'éditer le fichier d'entrée de TUTT, de façon interactive et conviviale, avec une visualisation de la perce de l'instrument. TUTTEDIT permet de modifier ce fichier d'entrée sans avoir à rentrer dans de rébarbatifs tableaux de chiffres.
Il permet aussi de lancer le calcul dans TUTT, et d'afficher graphiquement les résultats de ce calcul.
Grâce à TUTTEDIT, les tâtonnements nécessaires à la conception d'un instrument se trouvent facilités.

Le fichier d'entrée de TUTT représente l'instrument. Son nom doit être de la forme ***.DAT.

Le programme TUTTEDIT comporte 4 étapes distinctes :

1. Chargement du fichier d'entrée
2. Modification du fichier d'entrée dans la fenêtre graphique d'édition
3. Appel du moteur de calcul TUTT, pour calcul à partir du fichier d'entrée
4. Affichage des résultats

A partir des résultats, on peut ensuite éventuellement re-modifier le fichier d'entrée et procéder par itérations successives jusqu'à obtention d'un résultat satisfaisant.

Pour installer TUTTEDIT sur le disque dur

Le programme est actuellement prévu pour Windows 95 et 98. Il tourne également sous Windows XP moyennant l'ajout dans le répertoire windows/system de sous-programmes associés à Visual Basic, langage utilisé pour la rédaction du programme Tuttedit (vb40032.dll, comdlg32.ocx et spin32.ocx, que vous trouverez dans le dossier System).

Installation « orthodoxe » :Insérer le CD « **Tout sur Tutt** », et cliquer deux fois sur **setup.**
Suivre ensuite les instructions. Le logiciel d'installation crée un répertoire appelé **tuttedit**, dans lequel se trouve le programme exécutable **tuttedit.exe**.
Vérifier que le moteur de calcul **tutt.exe** (dans l'actuelle version du programme, cet exécutable s'appelle en fait **anche4.exe**) est présent dans le même répertoire.
Le CD « **Tout sur Tutt** » contient un certain nombre de fichiers d'entrée « type » au format .dat, correspondant à plusieurs types d'instruments (flûte à bec, flûte traversière Boehm, clarinette, saxophone, hautbois baroque, traverso baroque, cornet à bouquin, trompette, euphonium,…). Il est conseillé d'utiliser ces fichiers comme point de départ, et de construire le fichier correspondant à l'instrument à calculer en les modifiant grâce à l'éditeur Tuttedit.

Installation « simplifiée » : importer les programmes exécutables **tuttedit.exe** et **anche4.exe**, importer le fichier d'entrée **Tutt25.dat**, mettre tout cela dans le même répertoire, et lancer l'exécution. Si les programmes marchent, félicitations. S'ils ne marchent pas, il vous manque probablement les librairies appelées par Visual Basic : importez les, ou revenez à la procédure d'installation orthodoxe.

Pour lancer TUTTEDIT

tuttedit.exe

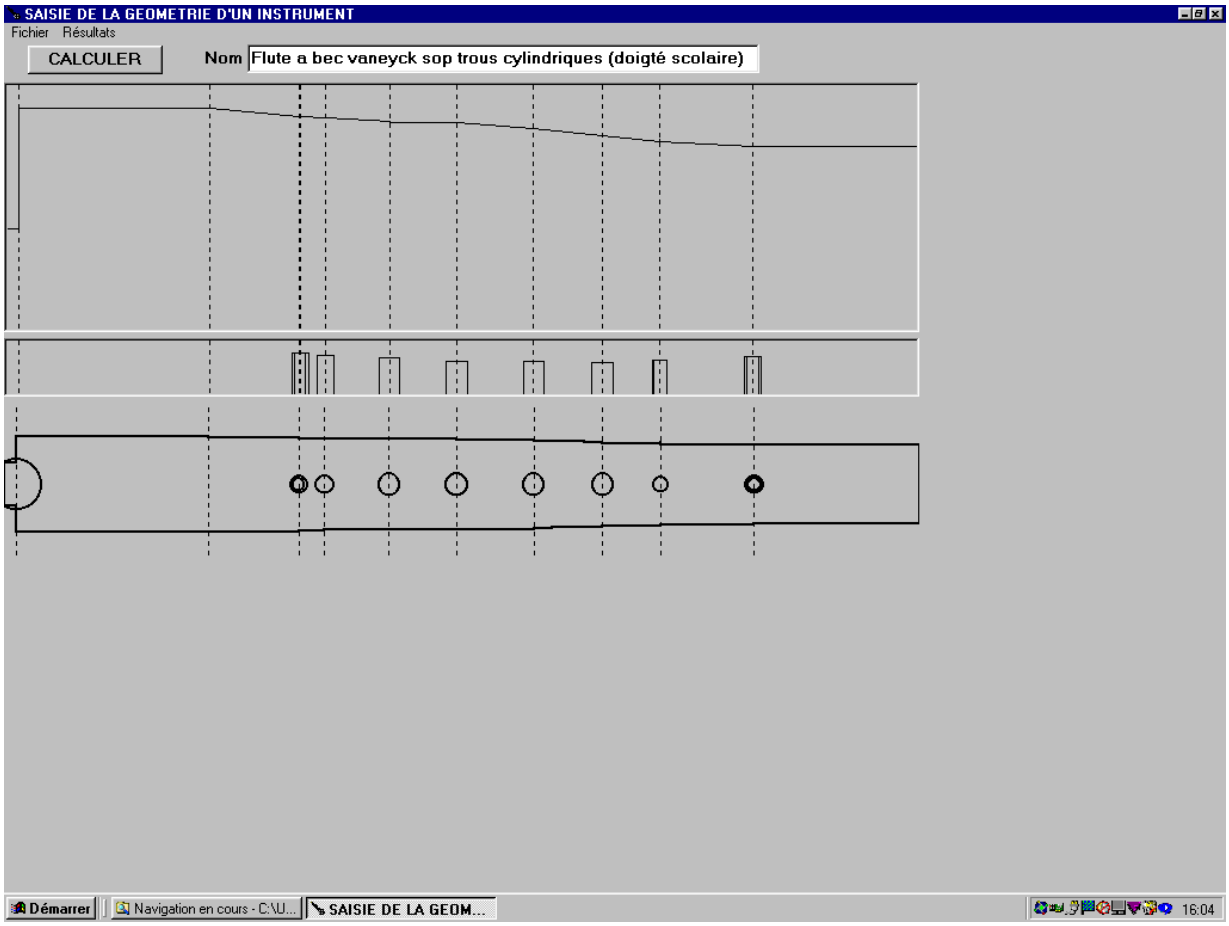
cliquer sur Démarrer → Programme → Tuttedit (clic sur l'icône).
Ou encore : naviguer avec l'explorateur windows jusqu'au répertoire tuttedit, et cliquer sur l'icône Tuttedit.
Le programme affiche alors à l'écran une fenêtre graphique, vide pour l'instant. Pour la remplir, il faut charger un fichier d'entrée.

Pour charger un fichier d'entrée

cliquer sur Fichier → ouvrir → naviguer dans l'arborescence des fichiers pour trouver le fichier .DAT à ouvrir.
Le programme affiche alors la perce de l'instrument.

.

Le schéma de tronçonnement apparaît à l'écran, avec affichage du diamètre du tube principal. La position des trous latéraux, leur diamètre et la hauteur des cheminées s'affiche aussi à l'écran. Le graphe ci-dessus donne l'exemple d'une flûte à bec Soprano Van Eyck.

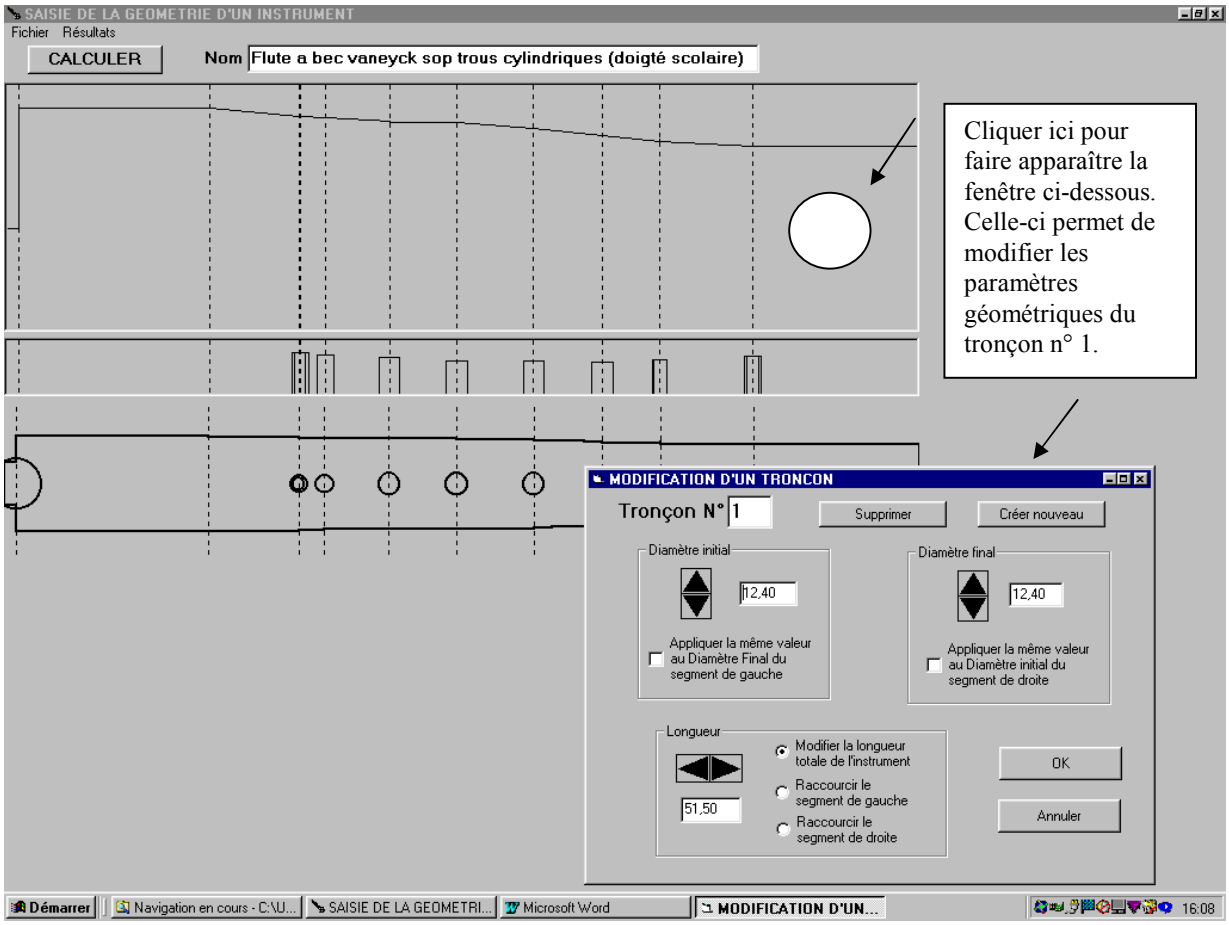


Dessin de ce qu'affiche TUTTEDIT, et signification des symboles et différentes parties du dessin

Pour modifier le fichier d'entrée

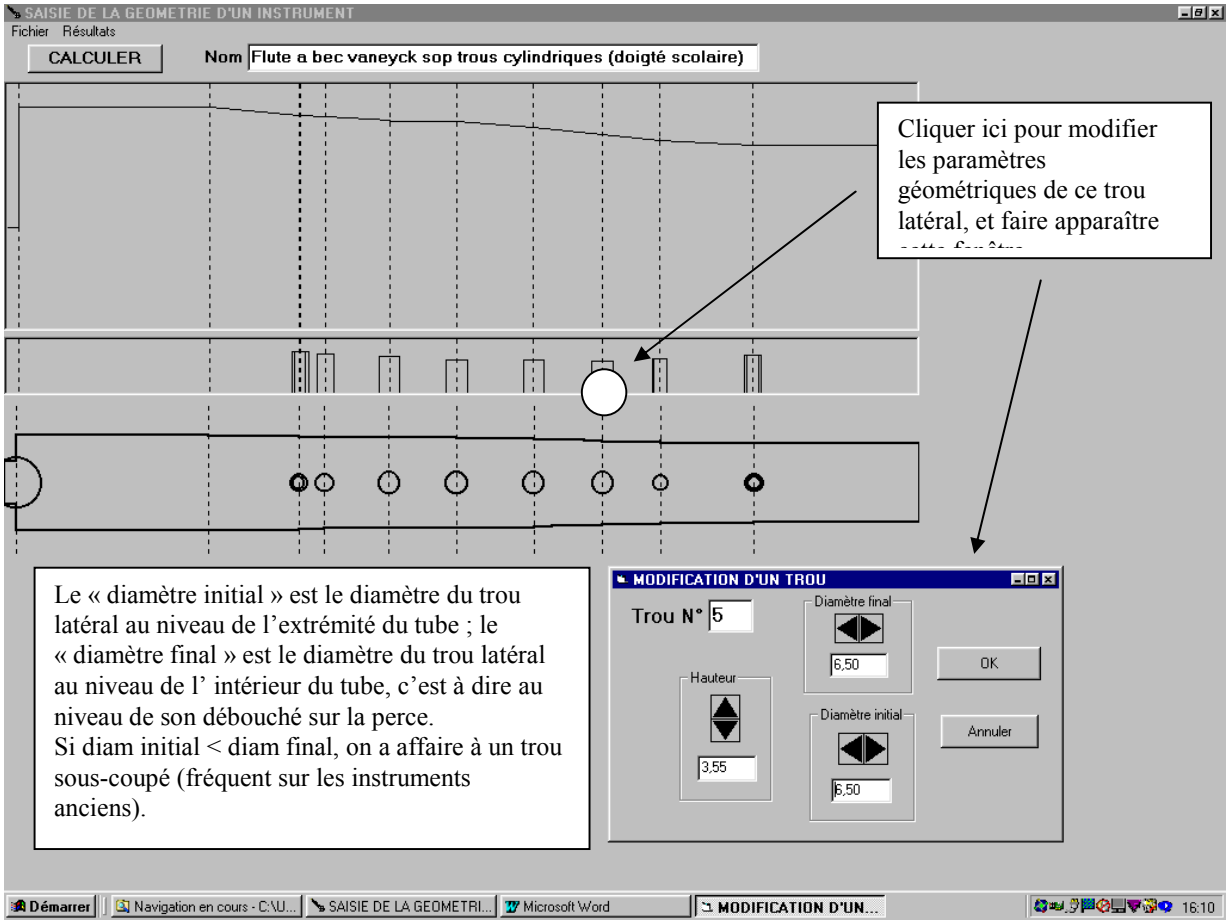
En cliquant sur les différentes parties du dessin de l'instrument affiché à l'écran, on peut modifier les paramètres principaux de la perce dans le fichier d'entrée de TUTTEDIT. En particulier, on peut changer les diamètres et longueurs de tronçons de la perce, ainsi que les diamètres et hauteurs de cheminée des trous latéraux.
Pour modifier la perce : cliquer dans le dessin de la perce, n'importe où dans la fenêtre entre les lignes verticales : une fenêtre d'édition apparaît, pour changer à la fois longueurs et diamètres. Selon l'endroit où on clique, on peut ainsi modifier un tronçon de la ligne principale ou un trou latéral.

Pour modifier un tronçon :



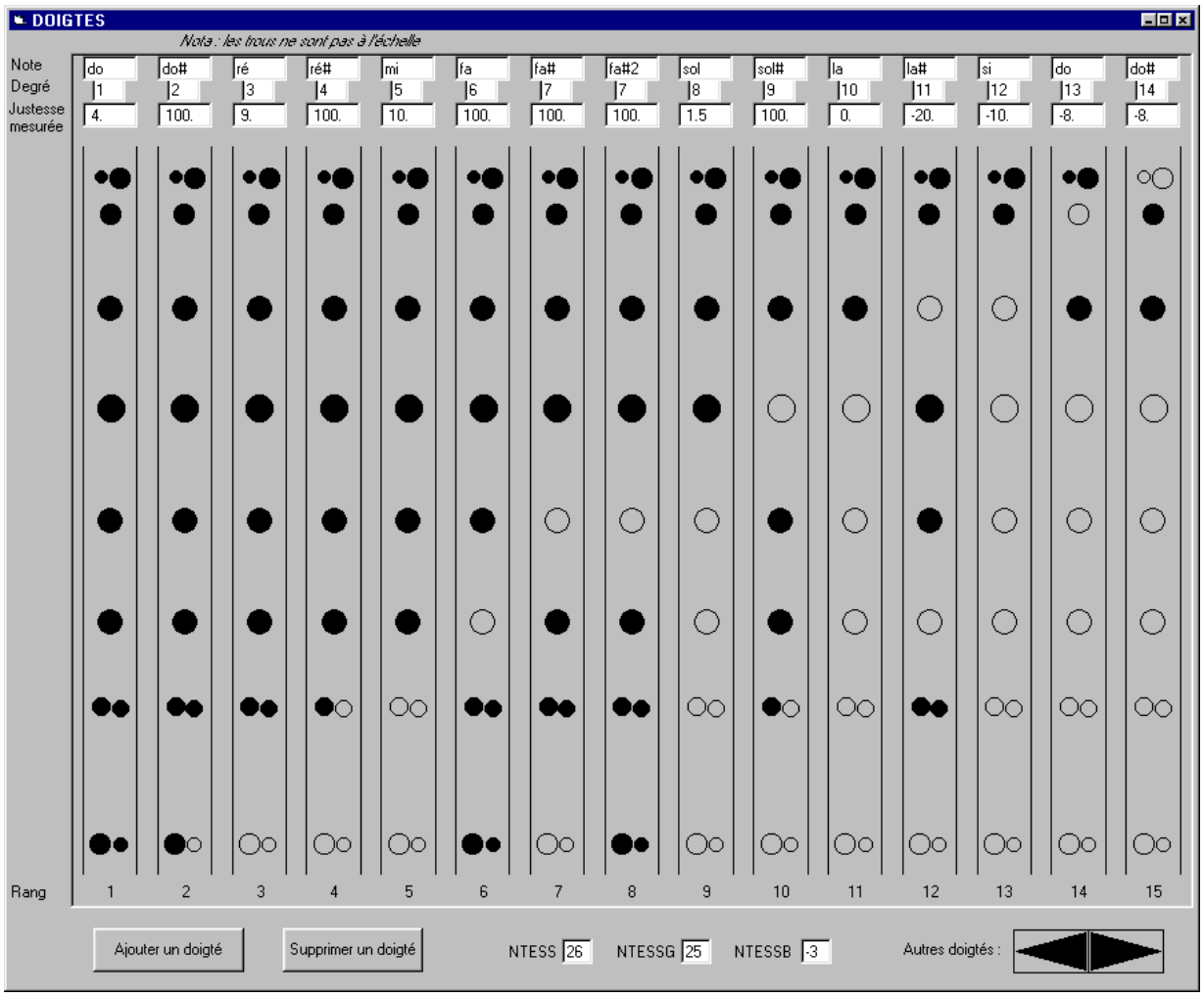
Le logiciel Tuttedit permet la suppression ou la création de nouveaux tronçons de la ligne principale. Cette opération délicate n'est pas entièrement débuggée actuellement, et peut entraîner un plantage du logiciel.

Pour modifier un trou : cliquer dessus pour modifier son diamètre ou la hauteur de la cheminée.



Pour modifier la table des doigtés

Tuttedit permet d'afficher et de modifier la table des doigtés de l'instrument.
Pour l'afficher : cliquer sur le menu correspondant, intitulé "table des doigtés". Une fenêtre s'ouvre alors.



On voit sur cet exemple le début de la table des doigtés d'une flûte à bec soprano. Les trous fermés sont représentés en noir. Le trou du pouce est traité ici comme un trou double, ce qui permet de décrire les "demi-trous". Le 7ème degré de la gamme (fa#) a deux doigtés possibles.

Le logiciel permet de rajouter des doigtés alternatifs en cliquant sur le bouton correspondant. Il permet également de modifier les doigtés existants en cliquant sur les trous pour les faire passer de la position "ouverte" à la position "fermée" ou vice-versa.
Lors de l'établissement de la table de doigtés, il faut se souvenir que le programme Tutt ne connaît pas le mécanisme ni le clétage de l'instrument, mais seulement des trous ouverts ou fermés. C'est à l'utilisateur de faire la traduction entre la position des doigts sur les clés et l'ouverture des divers trous latéraux de l'instrument.
La table des doigtés des cuivres (trompette, trombone, tuba, cor) obéit à une autre logique, car elle ne correspond pas à des trous latéraux bouchés ou débouchés. Rien n'est prévu dans Tutt pour éditer les doigtés de ces instruments, dont chaque position de piston correspond à une perce donnée qui doit être étudiée au cas par cas. Pour des raisons d'homogénéité de traitement de tous les instruments, il n'en reste pas moins nécessaire de donner dans le fichier d'entrée des instruments de type « cuivre »une

« table des doigtés » avec autant de lignes que de notes à étudier. Cette table de doigtés n'en est pas une au sens musical du terme : elle ne correspond pas à un mouvement de valves ou de pistons, car l'instrument est étudié pour une seule longueur de tuyauterie. Chaque ligne de la table comporte une rangée de 1 indiquant que tous les trous latéraux sont fermés, le nom de la note, le numéro d'ordre de la note, et son rang dans la liste de demi-tons de la tessiture.

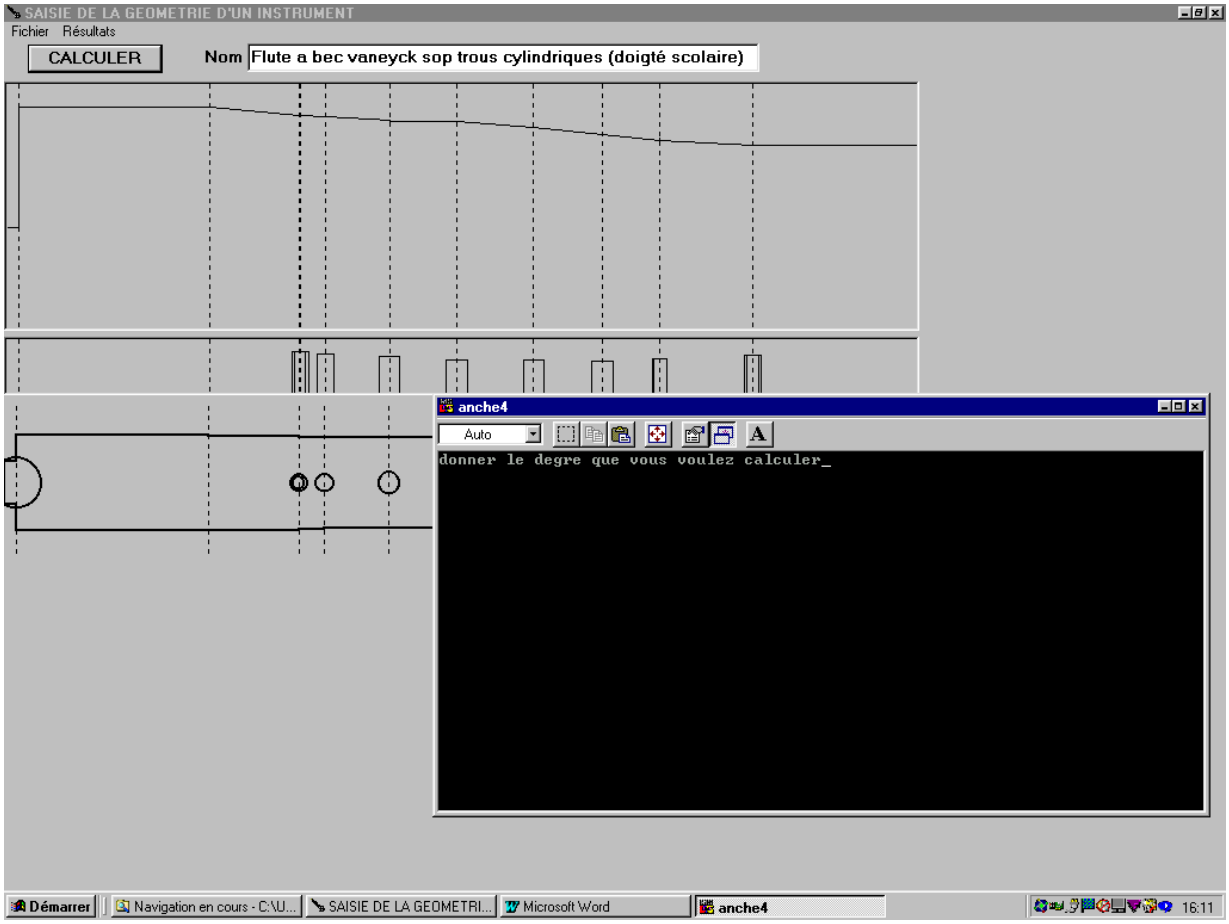
Exemple de table « de doigtés » pour un cuivre dans le fichier d'entrée Tutt.dat:

```
……..
TESSITURE NTESSC, NTESSG, NTESSB
 6   25   11
Table des doigtés
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'do   '0.0      1         1
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'sol  '0.0      2         8
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'do   '0.0      3         13
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'mi   '0.0      4         17
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'sol  '0.0      5         20
 1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1 'do   '0.0      6         25
……..
```

On examine 6 partiels de la trompette (NTESSC = 6), la tessiture de la trompette comprend 25 demi-tons (NTESSG = 25), et la note de base de la tessiture de l'instrument est un « do » (pensé), en fait un sib réel à 11 demi-tons au dessous du la 440 (NTESSB=11).
La première ligne de la table correspond à cette note de base (il s'agit du partiel 2 du tuyau, mais on n'a pas besoin de le dire au programme :Tutt le calcule tout seul en cherchant quel est le mode du tuyau situé dans le domaine de fréquence à 11 demi-tons au dessous du la 440) ;
La seconde correspond au sol (pensé) situé 8 demi-tons au dessus de la note de base de la tessiture. Il s'agit du 3è partiel du tuyau, mais là encore, on n'a pas besoin de le dire au programme ;
Les trois lignes suivantes correspondent respectivement au do, mi et sol, à 13, 17 et 20 demi-tons au dessus de la note de base (4è, 5è et 6è partiels du tuyau) ;
La dernière ligne (6è de la liste) correspond au do aigu, dernière note de la tessiture, à 25 demi-tons au dessus de la note de base (8è partiel du tuyau).
On remarquera que le 7è partiel, qui correspondrait à un sib très faux, a été délibérément omis de la table car il n'est en général pas utilisé musicalement.

Pour calculer l'instrument

En cliquant sur « calculer », on lance le calcul TUTT correspondant à ce fichier d'entrée. Une fenêtre DOS (généralement sur fond noir) s'affiche alors.



Le programme TUTT pose la question suivante : « Donner le degré que vous voulez calculer ».
Répondre par un entier (par ex : 2 si on veut calculer seulement la deuxième note de la liste de la table des doigtés de l'instrument).
Répondre par 0 si on veut calculer en une seule fois toutes les notes de la table.
A la fin du calcul, fermer la fenêtre sur fond noir.

Pour les spécialistes : le clic sur la fenêtre calcul entraîne la production par le programme d'édition **Tuttedit** d'un fichier **Tutt25.dat** dans le répertoire **Tuttedit**. C'est ce fichier d'entrée qui sera utilisé par le moteur de calcul **Tutt.exe** (appelé actuellement **Anche4.exe**). A la fin de son exécution, le programme de calcul produit les fichiers résultat **Tutt.out** (actuellement **Tutt25.out**), **Justesse.out, Press.out, Zim.out** et **Pitch.out**. Tous ces fichiers de résultats sont également dans le répertoire **Tuttedit**.
Après le calcul, le logiciel d'édition **Tuttedit** reprend la main, et offre la possibilité d'afficher graphiquement les résultats de justesse, d'impédance ou de pression.

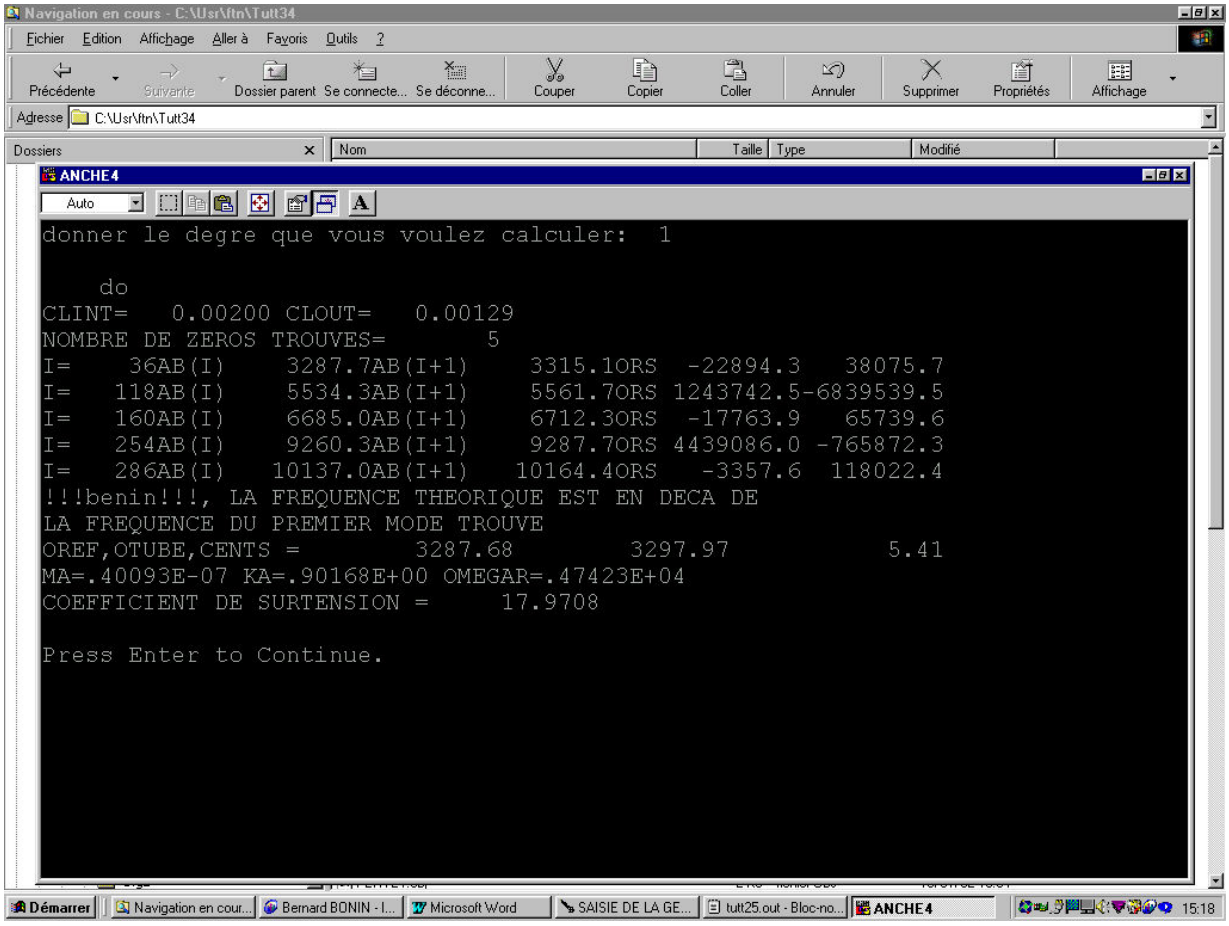
Pour chaque degré de la gamme, la fenêtre Tutt affiche les informations suivantes :

1) Concernant l'embouchure : affichage des corrections de longueur à l'embouchure CLINT et CLOUT (exprimées en m).

2) Concernant le calcul de l'impédance : identification des zéros de la fonction impédance (un zéro pour chaque ligne).

3) Concernant le mode étudié :
affichage d'une ligne avec les pulsations i) OREF, pulsation de référence attendue pour la note associée au doigté qu'on étudie); ii) OTUBE, pulsation calculée par le programme; CENTS, écart en cents entre la pulsation de référence et la pulsation calculée.
Affichage du coefficient de surtension du mode.

4) Concernant l'anche : affichage de la masse effective MA et de la raideur effective KA de l'anche (ou du jet d'air si on a affaire à une flûte), ainsi que de sa pulsation propre de résonance OMEGAR. On peut savoir en comparant OMEGAR et OTUBE si le couplage à l'anche tire vers le grave ou vers l'aigu les fréquences en jeu.

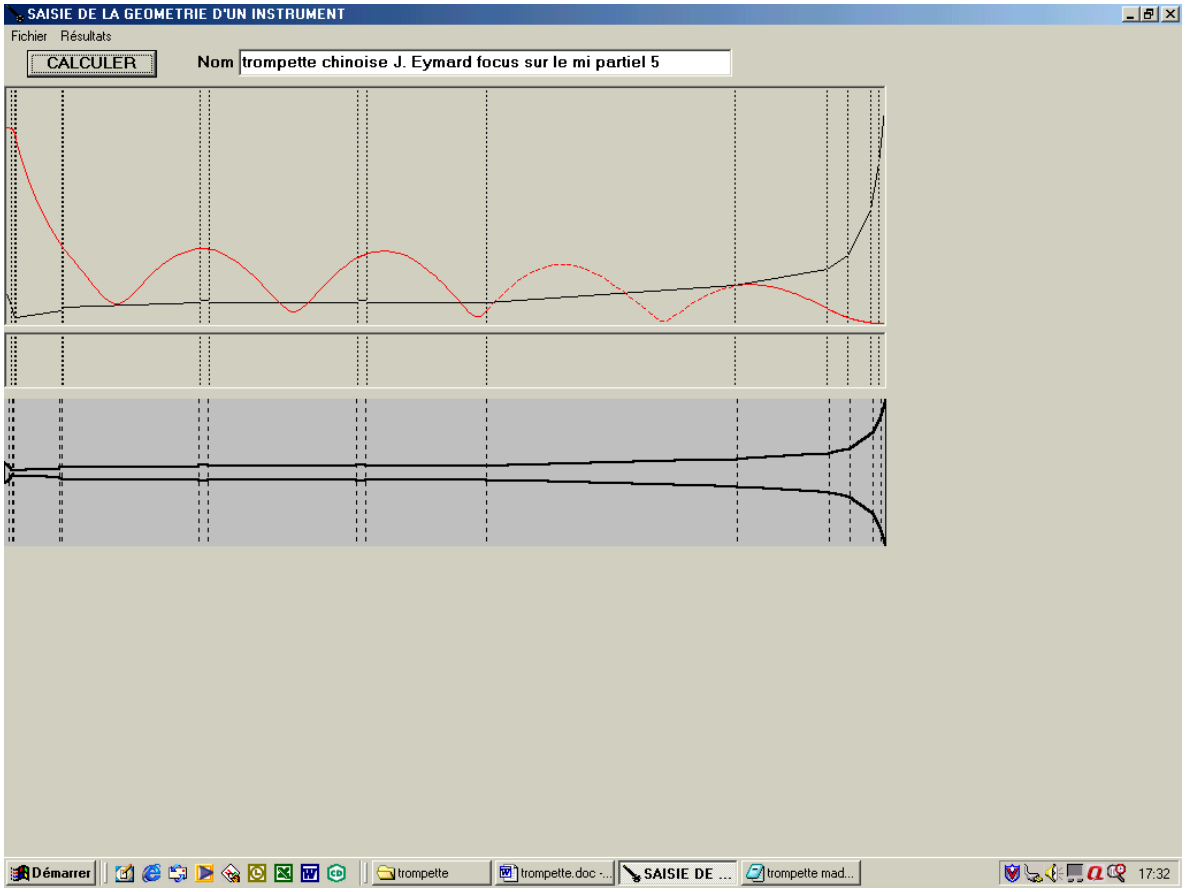


Si on a demandé un calcul global de l'instrument sur l'ensemble de la table des doigtés, les informations concernant chaque note s'affichent toujours comme ci-dessus dans la fenêtre Tutt, mais lors du calcul elles défilent en général trop vite pour être saisies. Le défilement sert alors seulement à vérifier…que le calculateur n'est pas planté!

Pour voir les résultats

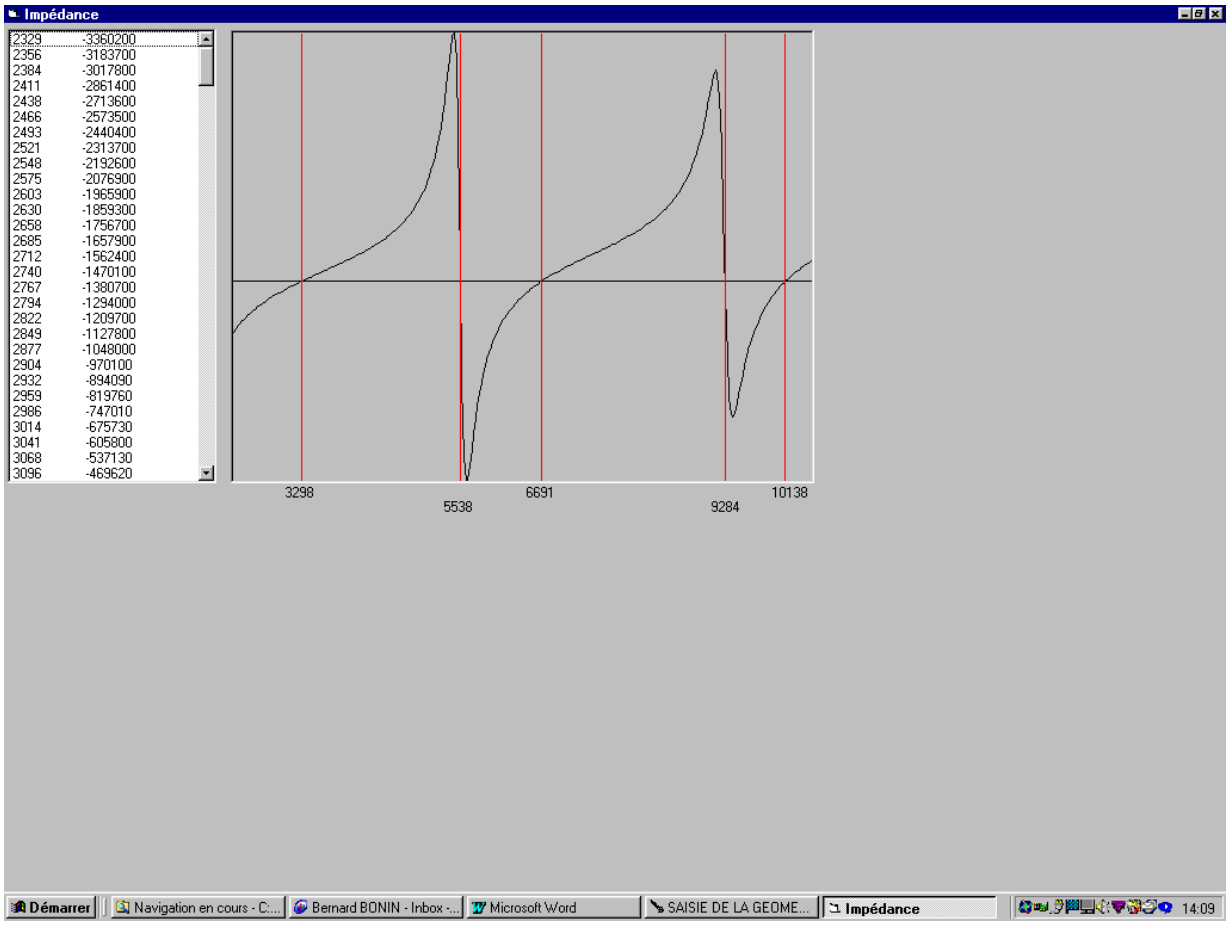
Cliquer sur « résultats ».
Si on a demandé le calcul d'une seule note, on peut accéder au champ de pression dans le tuyau et à la fonction impédance.
Le champ de pression, présenté sous forme graphique, permet de visualiser le fonctionnement acoustique du tuyau.

Champ de pression et fonction impédance peuvent servir à vérifier que le mode choisi par Tutt est bien physique, et correspond bien à celui attendu : le champ de pression doit présenter un nœud au voisinage de l'embouchure (pour les flûtes) et un ventre (pour les instruments à anche solide). Le nombre de lobes du champ de pression renseigne sur le numéro du partiel considéré.



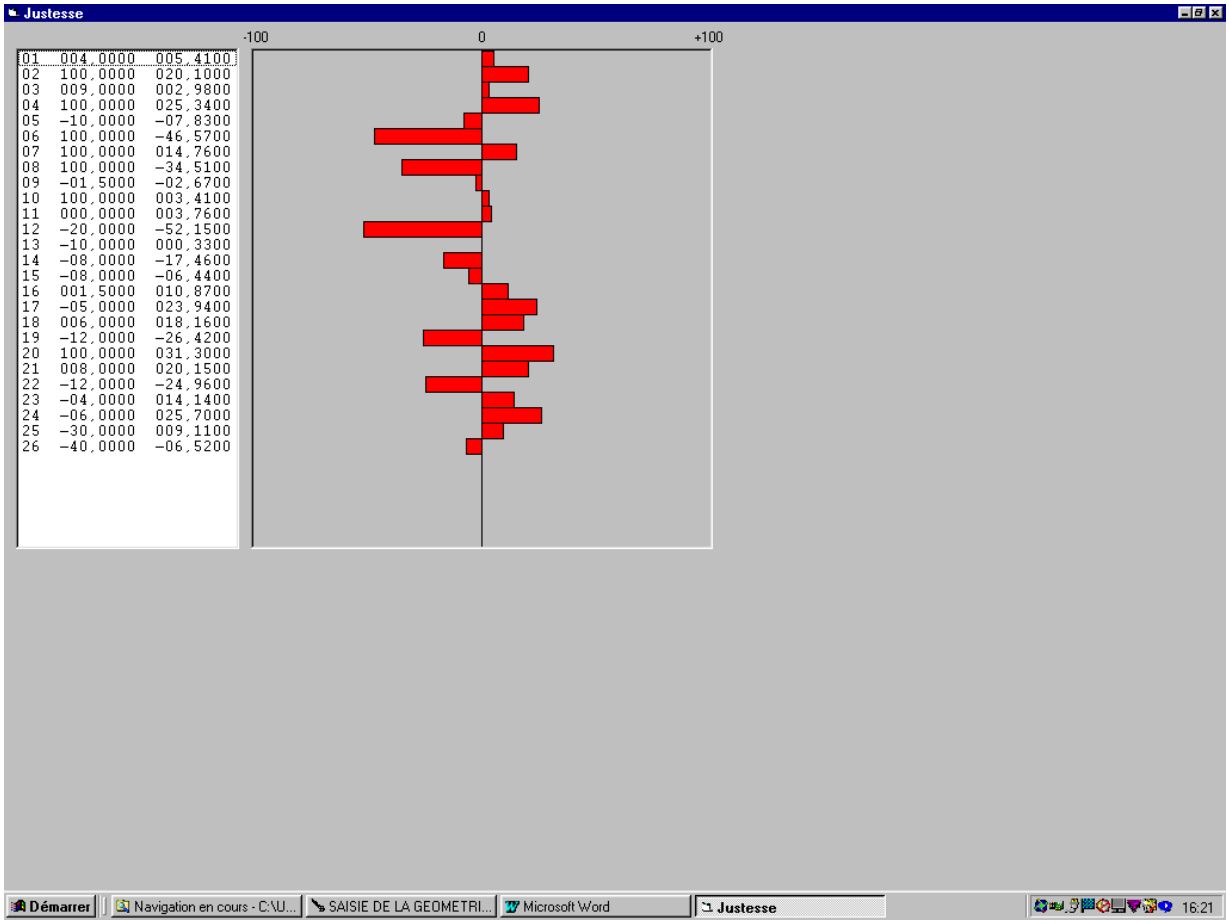
Voici la répartition du champ de pression sur le 5ème partiel (note pensée = mi) d'une trompette.

La fonction impédance permet de juger de l'harmonicité des partiels. Le graphique tracé par Tuttedit est celui de la partie imaginaire de l'impédance en fonction de la pulsation. Les pulsations des modes de résonance sont les zéros de la fonction. L'instrument aura un son riche et timbré si les différents partiels sortent à des pulsations multiples les unes des autres.



*La fonction "Partie imaginaire de l'impédance", calculée par Tutt pour le doigté "Do1" de la flûte à bec soprano VanEyck. Les chiffres en bas du graphique sont les pulsations correspondant aux zéros de la fonction impédance. Les zéros à 5538 rd/s et à 9284 rd/s sont des antirésonances du système; celles à 3298, 6691 et 10138 rd/s sont des résonances. On constate ici que le deuxième mode tombe à une fréquence (ou pulsation) à peu près double de celle du premier partiel (2*3298 vaut à peu près 6691). Mais le troisième mode à 10138 rd/s tombe à une pulsation assez éloignée du triple de celle du premier mode. Dans le cas présent, l'harmonicité des modes n'est pas parfaite, on s'attend donc à un timbre relativement pauvre, avec pas mal d'harmonique 2 mais peu d'harmonique 3..*

Si on a demandé le calcul de tous les degrés de la gamme, l'action de cliquer sur « résultats » puis sur « justesse » permet d'accéder à l'histogramme « justesse calculée », qui donne une vision globale de la justesse de l'instrument sur l'ensemble de la tessiture (une ligne et une barre d'histogramme par ligne de la table des doigtés, dans l'ordre de cette table).



Exemple de ce que le logiciel TUTTEDIT affiche en sortie : ici, histogramme de la justesse calculée de l'instrument, exprimée en cents pour chaque doigté de la tessiture.

Quand l'instrument modifié par itérations successives présente des caractéristiques jugées satisfaisantes, il faut sauvegarder le précieux fichier d'entrée correspondant. C'est ce dernier qui donnera les plans de l'instrument! Le plan de perce affiché par TuTT respecte les proportions des longueurs et des diamètres. Il

peut être imprimé par simple copie d'écran, puis agrandi à la photocopieuse pour être mis à l'échelle 1. Le plan de perce ainsi obtenu est suffisamment précis pour permettre la construction de l'instrument.

Pour sauvegarder le fichier d'entrée modifié

cliquer sur Fichier → Enregistrer.

Pour sortir de TUTTEDIT

cliquer sur Fichier → Quitter

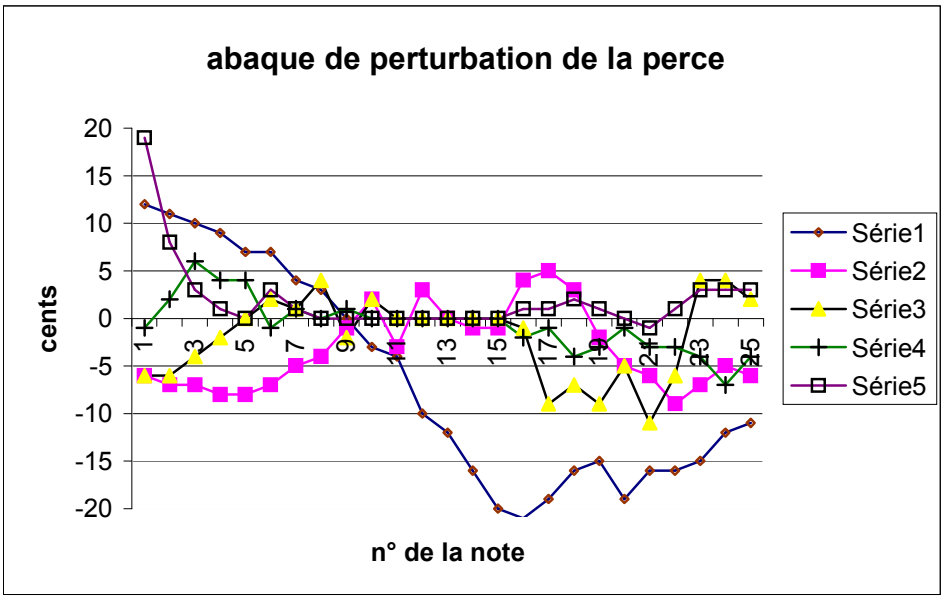
5. Utiliser TUTT intelligemment pour optimiser un instrument

Un guide d'optimisation du dessin des instruments : Les abaques perturbatives

Comment optimiser le dessin d'un instrument :
Partant d'un instrument de référence, on peut avec le programme TUTT calculer quelle est l'influence sur la justesse d'une petite modification de la perce. Si la modification ainsi effectuée est suffisamment petite, la variation de justesse sera proportionnelle à l'amplitude de la modification.

J'ai trouvé utile et efficace de construire des abaques donnant les variations de justesse sur toutes les notes de la tessiture, pour de petites perturbations des principaux paramètres décrivant la perce de l'instrument. Ces abaques peuvent ensuite servir de guide pour corriger avec un minimum de tâtonnements la justesse d'un instrument existant.

On donne ici l'exemple des flûtes à bec. Pour ce type d'instrument, la perce du tube principal joue un rôle primordial sur la justesse, on a donc construit avec TUTT quelques abaques donnant l'influence sur la justesse de l'instrument de variations localisées du diamètre de la perce.



Série 1 : Elargissement de la perce de 1 mm au niveau du bec
Série 2 : Elargissement de la perce de 0.5 mm au niveau du majeur main gauche
Série 3 : Elargissement de la perce de 0.5 mm au niveau de l'index main droite
Série 4 : Elargissement de la perce de 0.5 mm au niveau de l'annulaire main droite
Série 5 : Elargissement de la parce de 1 mm au niveau du bas de la flûte.

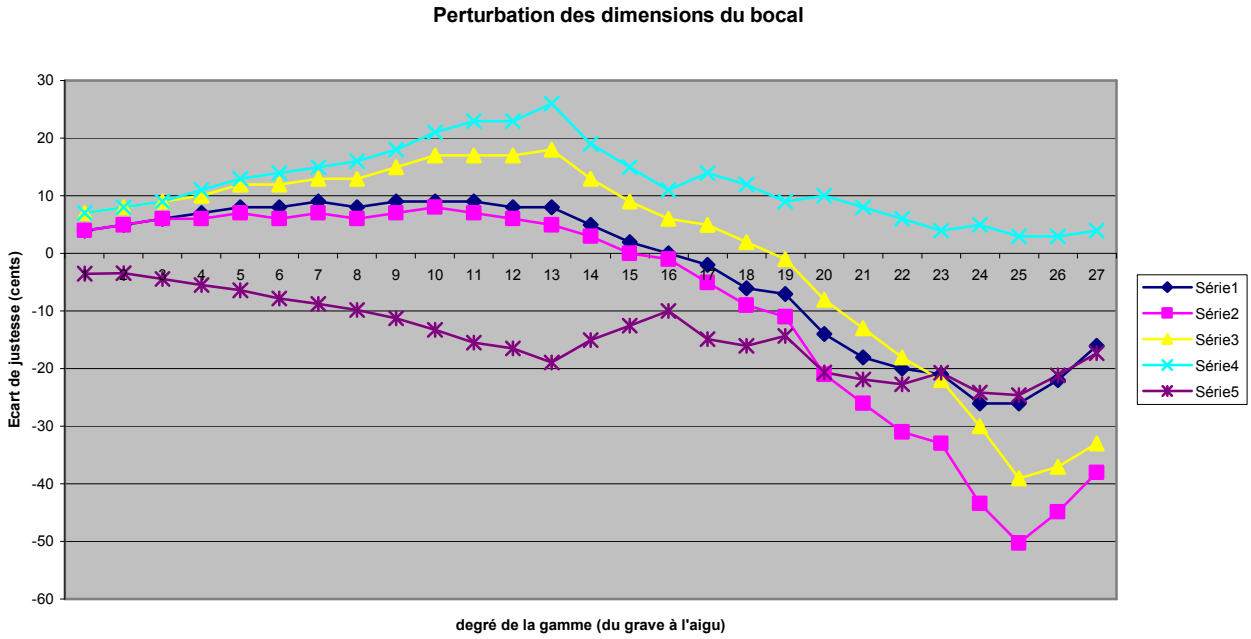
On voit sur ces abaques que si l'on voulait monter les do, do#, et ré graves de 10 cents sans trop affecter les autres notes, il suffirait d'augmenter le diamètre de la perce de 1 mm au voisinage du bout de la flûte.

Les abaques perturbatives peuvent être utilisées d'une façon un peu moins artisanales pour optimiser un instrument, via la méthode des matrices de covariance :

Pour optimiser un instrument en jouant sur un nombre réduit de ses paramètres géométriques : utiliser les matrices de covariance

Exemple : comment trouver le bon bocal pour son hautbois ?

On trouvera dans le graphique ci-dessous l'influence de quelques perturbations des dimensions du bocal sur la justesse de l'instrument. Le calcul a été fait ici avec TUTT pour un hautbois baroque (mon Delanca 415), mais les résultats sont pratiquement les mêmes pour un hautbois moderne. Voilà ci-dessous les abaques perturbatives correspondant à une variation des dimensions d'un bocal de hautbois.



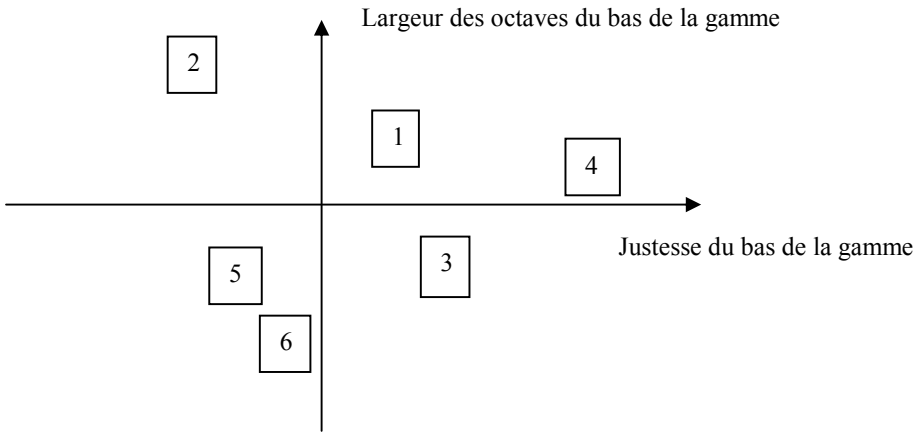
L'effet d'une perturbation des dimensions du bocal d'un hautbois baroque (mon Delanca 415) sur la justesse de l' instrument sur toutes le notes de la tessiture. Les notes vont du grave à l'aigu, et sont numérotées de 1(do grave) à 27 (ré aigu).
1 : diminuer le diamètre du bocal au gros bout de 0.3 mm
2: diminuer le diamètre du bocal de 0.3 mm au petit bout sans changer le diamètre de la colonne d'air côté anche
3 : diminuer le diamètre du bocal de 0.3 mm au petit bout en diminuant également le diamètre de la colonne d'air côté anche
4 : raccourcir le bocal de 3 mm en coupant le gros bout
5 : allonger la longueur du bocal de 3 mm sans changer ses diamètres d'extrémité

Comme on le voit ci-dessus, tout changement de dimension du bocal a des influences multiples et croisées sur l'ensemble des notes de la tessiture, et il n'est pas facile de séparer ces influences pour corriger tel ou tel défaut de justesse. Pour démêler cet écheveau, j'ai fait un petit logiciel capable de déterminer les dimensions optimales du bocal pour un instrument (et un instrumentiste) donnés. Le programme utilise la matrice de covariance tirée des abaques perturbatives ci-dessus pour minimiser les défauts de justesse observés sur l'instrument joué par son utilisateur actuel et équipé de son bocal actuel. L'utilisateur donne au logiciel la justesse de l'instrument (mesurée par exemple à l'aide d'un accordeur électronique) sur quelques notes, avec le bocal existant. En réponse, le logiciel minimise un critère de satisfaction quadratique du type chi2, considéré comme une fonction des paramètres géométriques du bocal à optimiser. La condition de chi2 minimal se ramène à un système linéaire d'équations dont les variables sont les écarts des paramètres géométriques par rapport à leur valeur initiale. Après résolution du système, le logiciel indique comment il convient de modifier ledit bocal pour rendre l'instrument le plus juste possible. Le logiciel en question tourne sur un vulgaire PC : il est possible de le télécharger gratuitement sur le site internet de Joël Eymard www.trompette.eymard sous le nom de bocaloptim.exe.

La méthode est générale, et applicable facilement toutes les fois qu'on cherche l'optimum de quelques paramètres géométriques d'un instrument (disons trois au plus). Exemples d'application : le bocal d'un hautbois ou d'un basson, la tête d'une flûte traversière, l'embouchure d'une flûte à bec, les dimensions d'un barillet de clarinette. Elle a pour intérêt d'optimiser l'instrument joué par son utilisateur habituel, toutes choses égales par ailleurs, c'est à dire sans changer les habitudes et défauts de l'instrumentiste, ni son anche (si on optimise le bocal du hautbois), ni le corps de la flûte (si on optimise la tête de l'instrument).

Autre possibilité pour améliorer un instrument par itérations : les algorithmes génétiques

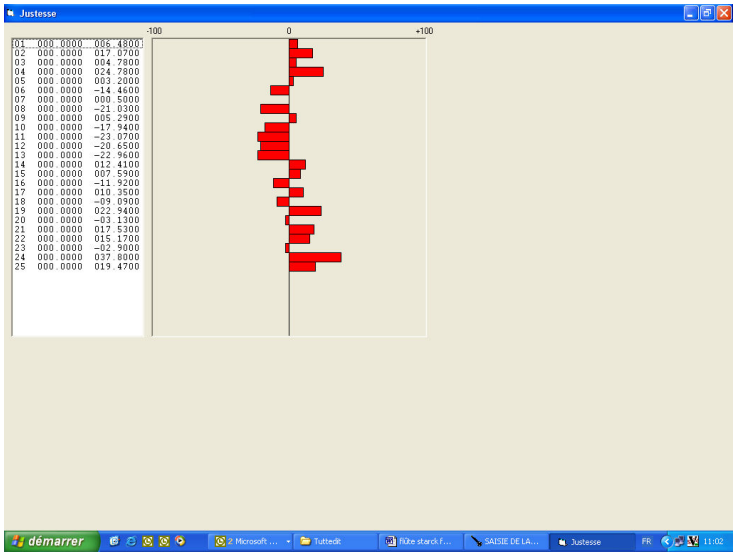
Si on dispose de nombreux spécimens d'un instrument d'un type bien spécifié que l'on désire optimiser, on peut avoir recours aux algorithmes génétiques, méthode d'optimisation extrêmement efficace pour les systèmes à très grand nombre de paramètres.
La méthode consiste à calculer tous les spécimens d'instrument dont on dispose, et à classer les instruments selon quelques critères ou caractéristiques, par exemple la largeur des octaves et la justesse du bas de la gamme. Après calcul, chaque spécimen peut être placé dans un diagramme selon ces critères.



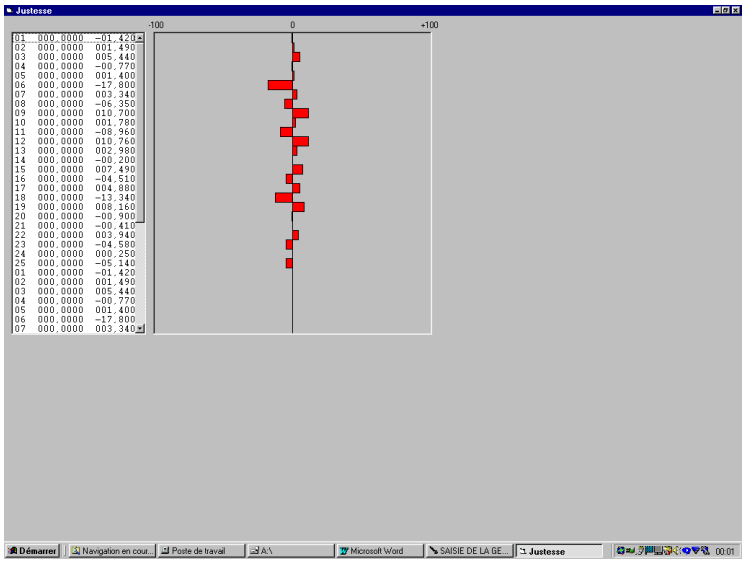
Classement de 6 instruments selon deux critères, par exemple la largeur des octaves et la justesse du bas de la gamme. Aucun des instruments calculés n'est parfait selon ces deux critères. Le diagramme montre que les instruments 1 et 4 possèdent à la fois un bas de gamme trop haut et des octaves trop larges, alors que les instruments 5 et 6 ont les défauts inverses. Un croisement entre les instruments 1 et 5 a de bonnes chances de produire un instrument déjà assez satisfaisant.

On aperçoit alors certains instruments possédant des défauts complémentaires, ce qui suggère de les "croiser". Le croisement consiste à moyenner purement et simplement les caractéristiques géométriques desdits instruments pour générer un nouveau fichier Tutt. Le nouvel instrument "fils" possède en général des caractéristiques déjà améliorées par rapport aux instruments parents. Rien n'empêche alors de croiser à nouveau ce fils avec un autre instrument possédant des défauts complémentaires. La méthode converge très rapidement vers des instruments de caractéristiques excellentes, bien meilleures que celles obtenues en pratique en utilisant les méthodes perturbatives. Il n'est même pas nécessaire de recourir à un véritable algorithme car deux ou trois itérations suffisent le plus souvent à produire un design difficilement améliorable.

A titre d'exemple, voici un diagramme de justesse typique d'une flûte à bec du commerce de bonne qualité :



Et voilà ci-dessous le résultat correspondant à la justesse d'une flûte optimisée par algorithmes génétiques, dont les plans sont pour l'instant tenus top secrets :



Entre les deux, il y a vraiment un saut qualitatif !
Je ne crois pas que la méthode des algorithmes génétiques ait déjà été utilisée pour la conception instrumentale. Je compte bien m'en servir désormais pour améliorer d'autres instruments à vent.

Pour améliorer un instrument par itérations

Voici une méthode semi empirique que j'ai beaucoup employée pour développer de bons hautbois baroques. C'est assez artisanal, mais au moins, on n'a pas à se casser la tête à faire des calculs abstraits.

Faire un fichier TUTT n° 1 (F1)

Construire l'instrument correspondant (I1)

Mesurer sa justesse (à l'accordeur électronique, par la méthode des matrices), et re-mesurer sa perce (il y a probablement de petits écarts par rapport au fichier 1)

Faire un fichier TUTT F'1 correspondant à cet instrument n° 1 (on peut y inclure la mesure de la justesse expérimentale centsexp).

Retoucher le fichier F'1 pour corriger les défauts de justesse mesurés (conseil : procéder en différentiel, en s'aidant des abaques perturbatives ou des matrices de covariance). Le résultat de ces retouches est un fichier TUTT (F2).

Construire l'instrument I2 correspondant au fichier F2 (à partir du I1 si c'est possible, sinon, en faire un nouveau.

Et recommencer, jusqu'à ce que tout soit satisfaisant.

Ça donne le schéma suivant :

F1
↓ Fabrication
I1
↓ Mesure de la géométrie et de la justesse expérimentale
F'1
↓ Retouches avec TUTT et les abaques des pertubations
F2
↓Fabrication
I2
↓ Mesure de la géométrie et de la justesse expérimentale
F'2
↓ Retouches avec TUTT et les abaques des pertubations
F3
…

L'intérêt de cette démarche, c'est de faire travailler TUTT en différentiel, et non pas en absolu. La précision des prédictions de TUTT est certainement bien meilleure dans ces conditions.

Le système converge assez rapidement. Cependant, la convergence sera limitée par la précision des mesures de justesse, par la précision de la fabrication, et par la fiabilité des calculs TUTT (ce dernier point ne devrait pas être le facteur limitant, surtout si on travaille en différentiel). Il faut arrêter d'itérer quand les corrections de justesse à apporter deviennent comparables à la précision des mesures de justesse elles-mêmes, ou quand les modifications de la géométrie deviennent comparables à la précision de la fabrication.