

NOUVEAUX DEVELOPPEMENTS MODALYS

tuyau conique & anche double

– Compte-Rendu –

Introduction

Le document fait la synthèse des travaux effectués à l'occasion d'une collaboration avec l'association Louis Ferdinand (Michel Aubry, Claude Reyraud et Philippe Ravier). L'étude présentée constitue la phase exploratoire (1 mois) d'un projet à caractère muséographique visant à développer un système de restauration et de jeu virtuels d'instruments de musiques traditionnels ; ce projet s'inscrit dans le cadre de la restructuration du "Musée des Musiques Populaires de Montluçon" qui possède une importante collection d'instruments traditionnels et populaires.

Dans ce contexte, le hautbois de cornemuse est retenu comme support pour la présente recherche. Plusieurs raisons ont motivé ce choix : outre le fait que la cornemuse cadre parfaitement avec les lignes du projet, elle permet de s'intéresser à la famille des instruments à anche double et perce conique, qui ne possède pour l'instant aucun représentant dans Modalys. Enfin, la collection personnelle de Michel Aubry ainsi que ses connaissances organologiques et techniques de l'instrument nous seront très utiles.

D'un point de vue méthodologique, étant donné les similitudes avec une étude antérieure menée sur l'accordéon [1], la démarche générale est reconduite, à savoir, compréhension et approche expérimentale de l'instrument puis travail de développement et d'exploration propre à Modalys.

A/ La cornemuse

1. Généralités

La famille des cornemuses est grande et ne se limite pas aux instruments d'Ecosse ou de Bretagne qui en sont les symboles les plus couramment évoqués [2]. Ceci étant, quelque soit son origine, la constitution globale de la cornemuse varie peu : un sac rempli d'air auquel sont reliés des tubes acoustiques qui sont soit des bourdons, jouant en continu une note unique, soit des chalumeaux, jouant la mélodie avec l'intervention du musicien (voir fig. 1a). Une part active du jeu étant de maintenir le sac rempli d'air sous pression afin qu'il puisse alimenter les différentes embouchures – de type anche simple ou double – reliées à chacun de ces résonateurs.

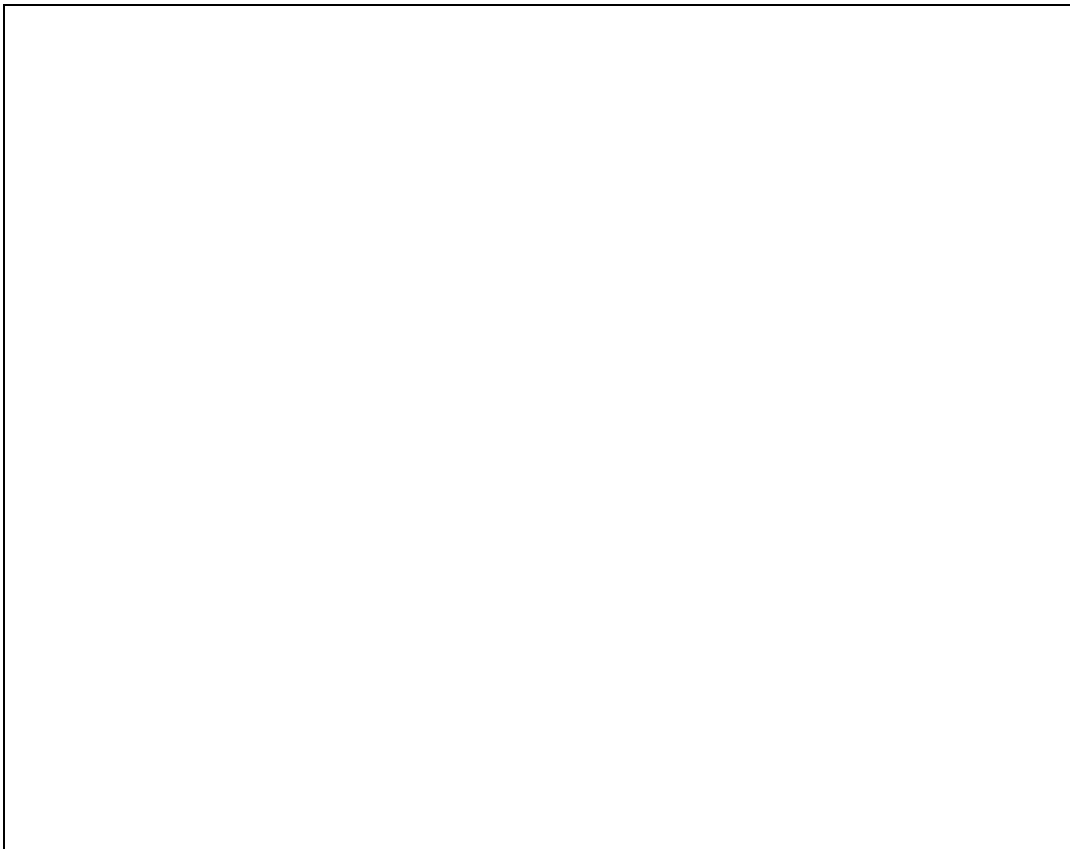


fig. 1a : détails organologiques d'une cornemuse d'Ecosse

La différence la plus marquante qui existe entre les variétés de cornemuse, outre les variations de dimensions et de type de perce des tubes, a trait au principe d'alimentation en air du sac : il se fait soit par un tube dans lequel le musicien souffle (voir fig. 1a), soit par un soufflet placé sous son bras et qui s'utilise comme une pompe à air (voir fig. 1b). La présence du soufflet a des implications à la fois sur le jeu de l'instrument car le contrôle de la pression se fait différemment, mais aussi sur le comportement des anches car l'air du sac est, de fait, beaucoup plus sec que lorsqu'il est insufflé par le musicien.

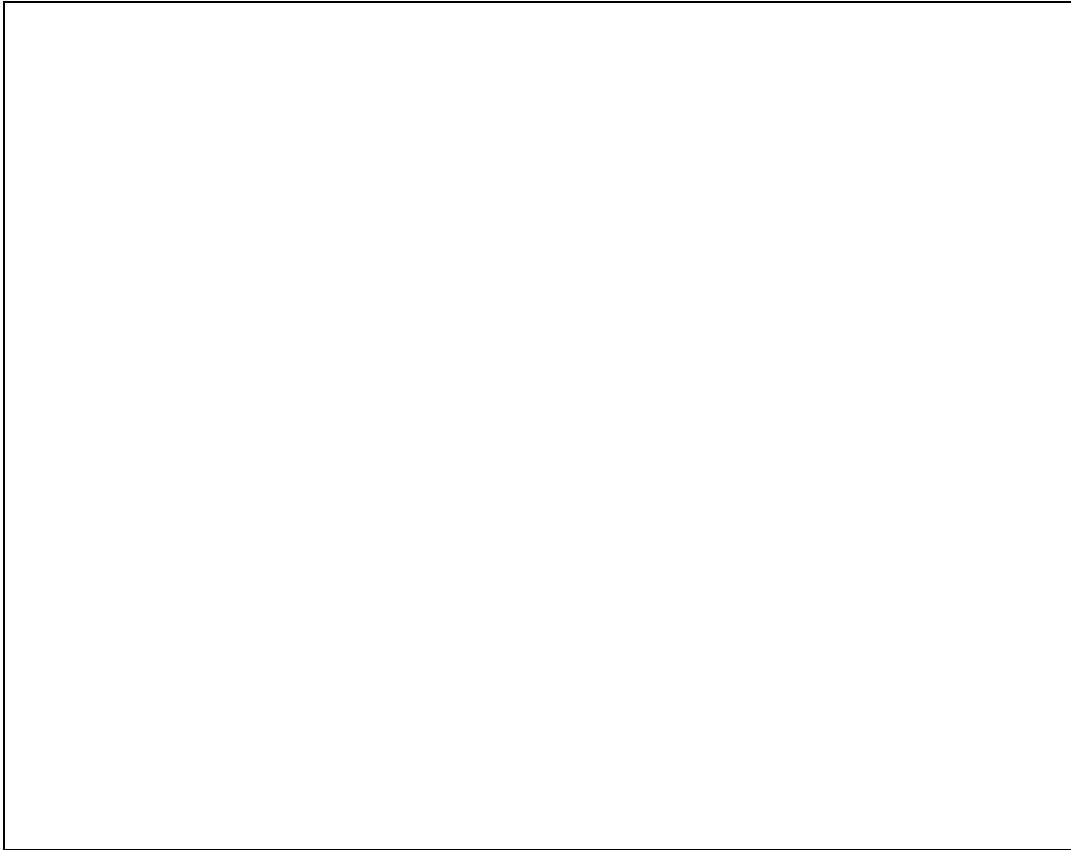


fig. 1b : vue d'ensemble d'une cornemuse à soufflet

L'instrument qui sert de support à l'étude est une cornemuse à soufflet du Centre de la France, copie d'un modèle datant du XVIII^{ème} siècle. Elle possède trois bourdons et un chalumeau auquel nous nous intéressons plus précisément. Il présente, d'une part, les caractéristiques communes à un hautbois classique (perce conique et anche double) et, d'autre part, les particularités propres à ce type de cornemuse (embouchure isolée du musicien, dessin et comportement spécifiques de l'anche).

2. Approche expérimentale

Comme dans le cas de l'accordéon, l'investigation sur l'instrument réel se limite à l'observation détaillée de sa facture et à l'écoute – et l'enregistrement – de ses possibilités sonores. Le hautbois de cornemuse (chalumeau) est ensuite isolé de son contexte afin de procéder à des mesures physiques plus fines, impossibles à réaliser *in situ* sans endommager l'instrument.

Pour cela, un dispositif expérimental est mis au point avec l'aide de l'atelier de Mécanique de l'IRCAM : il s'agit d'une cavité à volume constant alimentée en air comprimé et dont l'extrémité supérieure est dotée d'une pièce usinée qui permet l'emboîtement du chalumeau et donc la réalisation de la liaison air/anche, l'étanchéité étant naturellement assurée par la présence de

liège à l'embouchure. Le système ainsi conçu permet, grâce à une pression d'alimentation réglable, de simuler les modes de jeu de l'instrument en jouant comme d'une véritable cornemuse.

En outre, des microphones, placés à l'intérieur, au voisinage de l'embouchure, et à l'extérieur, devant le pavillon, permettent de mesurer les signaux de pression acoustique en condition quasi-réelle de jeu. Les données recueillies sont analysées par un oscilloscope et un analyseur de fréquence temps réel ; elles serviront de référence dans l'étude du comportement du modèle de synthèse (voir fig. 4a).

Par ailleurs, tous les éléments du montage sont fabriqués en matériau transparent (plexiglas) afin de pouvoir visualiser le mouvement de l'anche : le hautbois est alors placé en position horizontale – et non plus verticale, comme c'est le cas dans la réalité – pour se positionner en vue de face par rapport à la direction principale du flux d'air. Le dispositif est éclairé par une lumière stroboscopique, réglée sur la fréquence de la note jouée par l'instrument, qui permet de ralentir visuellement les oscillations de l'anche. La prise de vue est effectuée avec une caméra vidéo dont on utilise au maximum la fonction *zoom* étant donné les petites dimensions de l'anche. L'ensemble des expériences est enregistré et conservé sur bande.

On visualise ainsi plusieurs phénomènes :

- la faible amplitude des oscillations et la tendance de l'anche à 'se coller' lorsque la pression d'alimentation devient trop élevée ;
- la forte variation de déplacement entre le centre de l'anche où l'ouverture est maximum et les bords de l'anche où l'ouverture est nulle (voir fig. 2) ;
- la symétrie du mouvement par rapport au plan séparant les parties inférieure et supérieure de l'anche ;
- pour les notes graves, la courte durée de fermeture de l'anche ;
- la présence de plusieurs 'respirations' secondaires au cours d'un cycle complet d'ouverture, c'est-à-dire entre deux fermetures ;
- lorsque le régime d'oscillations est instable, la présence de vibrations 'parasites' dans la direction latérale (perpendiculaire à la direction principale du flux d'air).



fig. 2 : profil de déformation d'une anche double (vue de face)

B/ Les objets Modalys issus de la cornemuse

1. Le tuyau conique

Le tuyau conique ne constitue pas en lui-même un nouvel objet Modalys. En effet, il fait implicitement partie des classes 'closed-closed-tube ou 'closed-open-tube, décrivant les tubes acoustiques : à priori, la description de la conicité pour un tel objet revient à imposer le rayon d'entrée (r_1) différent du rayon de sortie (r_2), mais en réalité, cette définition aboutit systématiquement à un modèle non valide, rejeté par le compilateur, signe de la présence d'un défaut de programmation.

Après examen détaillé des sources concernées (*ClosedOpenTube.cc* et *ClosedClosedTube.cc*), il s'avère que l'erreur se situe au moment de la prise en compte de la conicité dans le calcul des fréquences modales.

D'une manière générale, quelque soit la géométrie du tube et les conditions aux limites qu'on lui impose, les valeurs des fréquences modales sont obtenues à partir de l'impédance d'entrée, grandeur physique caractéristique du résonateur calculée en fonction de ses données géométriques, de son impédance terminale et de la fréquence.

Pour un tube cylindrique, l'expression de cette grandeur est relativement simple et peut se mettre sous la forme (d'après [3]):

$$Z_{in} = Z_0 \cdot \left[\frac{Z_L \cos(kL) + jZ_0 \sin(kL)}{jZ_L \sin(kL) + Z_0 \cos(kL)} \right], \text{ avec } Z_0 = \frac{\rho c}{S} \text{ et } k = \frac{2\pi f}{c}$$

où Z_L : impédance terminale ;
 L : longueur du tube ; S : section du tube ; f : fréquence
 c : célérité du son dans l'air ; ρ : masse volumique de l'air.

Les fréquences de résonance sont telles que $Z_{in} = 0$, en imposant, dans les deux cas qui nous intéressent, une valeur d'impédance terminale spécifique :

- extrémité fermée : $Z_L = \infty$,
- extrémité ouverte : $Z_L = 0$.

Lorsque le tube est conique, par contre, l'impédance d'entrée prend une forme beaucoup plus complexe et la condition d'annulation engendre une équation transcendante – faisant intervenir des fonctions non-algébriques – qui ne peut pas se résoudre analytiquement :

$$f(x) = \operatorname{tg}(xL) + \alpha \cdot xL = 0, \text{ où } \alpha \text{ est une constante dépendante des rayons } r_1 \text{ et } r_2 \text{ aux extrémités.}$$

D'un point de vue mathématique, les solutions de ce genre d'équations peuvent être obtenues par dichotomie. Ce procédé utilise la propriété "continue

et monotone par morceaux" de la fonction étudiée et consiste à construire une suite numérique du type $\begin{cases} U_0 \\ U_{n+1} = f(U_n) \end{cases}$ qui converge vers la valeur recherchée.

Dans le cas des algorithmes incriminés (voir plus haut) cette valeur initiale U_0 était mal ajustée ce qui faisait diverger la procédure de recherche de zéros et aboutissait finalement à une matrice de fréquences modales nulle. La découverte et la correction de cette erreur permet dorénavant la description d'un modèle de tube acoustique conique dans Modalys.

2. La connexion 'reed-double

Etant donné la courte durée de cette phase du projet, et dans un souci d'efficacité, le travail de développement à proprement parlé s'est intéressé directement au couplage exciteur/résonateur : de même que la connexion 'reed-free' avait été créée pour la modélisation de l'anche libre d'accordéon, une nouvelle connexion 'reed-double' est implantée pour tenter de décrire les caractéristiques spécifiques à l'anche double du hautbois de cornemuse.

Par similitude de méthodologie également, ce nouveau type d'interaction est directement issu de la connexion 'reed' modélisant le système d'excitation à anche simple tel qu'il existe, par exemple, dans la clarinette Modalys.

En effet, cette connexion 'reed' décrit, de manière générique, le fonctionnement des instruments à vent régis par un mécanisme d'oscillations auto-entretenues et les principales non-linéarités qui en sont le siège :

- l'existence de deux états de fonctionnement successifs (fermé – ouvert) suivant la position de l'anche ;
- la contribution non linéaire de la pression acoustique et du déplacement de l'anche à l'établissement du débit acoustique à l'entrée du résonateur.

En l'occurrence, la principale différence entre anche simple et anche double se situe au niveau de cette dernière relation qui fait intervenir la différence entre pression dans la 'bouche' et pression dans l'embouchure ($P_0 - P$), le débit (U) et le déplacement de l'anche (x) :

- d'après les travaux de Backus [4], la géométrie de l'anche de clarinette implique une dépendance en $x^{4/3}$ sur le débit U , et ceci dû au fait que l'aire d'ouverture de l'anche est la résultante d'une composante frontale et d'une composante latérale correspondant aux bords de l'anche qui se décollent au cours du mouvement :

$$U = \gamma_1 \cdot (P_0 - P)^{2/3} \cdot x^{4/3}, \quad \text{où } \gamma_1 \text{ est une constante positive ;}$$

- par contre, le profil d'ouverture spécifique de l'anche double – notamment le fait que le bord des deux anches soit toujours en contact (voir fig. 2) – réduit cette dépendance à un terme en x^2 :

$$U = \gamma_2 \cdot (P_0 - P)^{2/3} \cdot x^2, \quad \text{où } \gamma_2 \text{ est une constante positive.}$$

Ainsi, en modélisant, comme le fait Modalys avec l'objet 'bi-two-mass, le système mécanique de l'anche par une valve simple (masse + ressort) dont le comportement statique est décrit par la loi :

$$x - x_{eq} = \eta \cdot (P_0 - P), \text{ où } \quad x_{eq} \text{ représente la position d'équilibre,}$$

$$\eta \text{ est une constante propre au système,}$$

on obtient la loi de variation du débit en fonction de la pression pour les instruments de type clarinette et hautbois [5] :

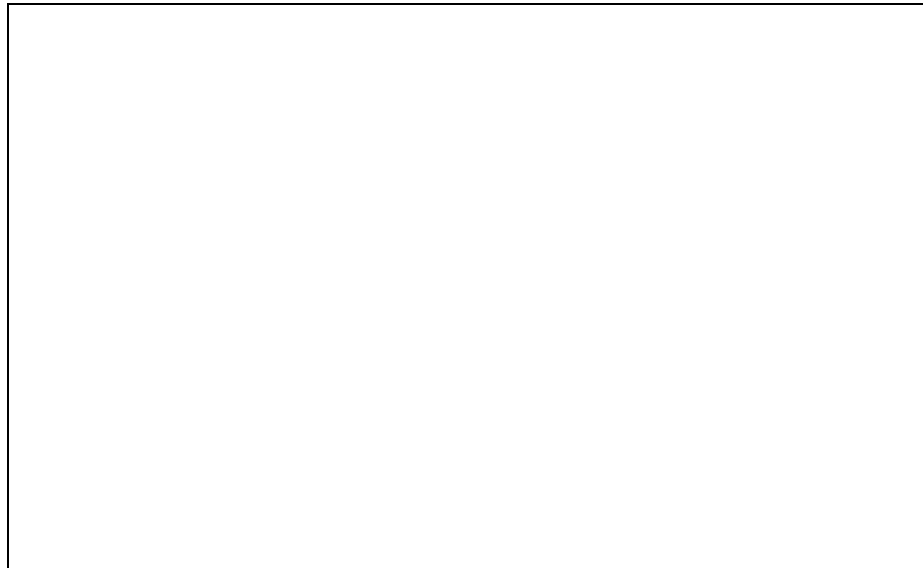


fig. 3 : variation du débit en fonction de la pression pour : - le hautbois (1)
- la clarinette (2)

Cependant, pour des raisons de simplifications inhérentes à la programmation initiale de Modalys [6], cette caractéristique non-linéaire est "brutalement linéarisée" (d'après p. 99 de [6]) dans l'algorithme de référence qui la décrit (*ReedInteraction.cc*) : la fonction $f(x) = K \cdot x^\alpha \cdot \Delta P^\beta$ est implantée sous la forme $\tilde{f}(x) = K \cdot x \cdot \Delta P$.

En évaluant l'intervalle de variation des deux variables (x et ΔP), il est possible de calculer un coefficient directeur mieux adapté que celui fixé par défaut (l'unité) ; le degré d'approximation est estimé par minimisation de l'erreur quadratique et l'on obtient le résultat suivant :

pour $0 \leq x \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ et $0 \leq \Delta P \leq 200 \text{ Pa}$,

$$\begin{cases} U_{clari} = K \cdot x^{4/3} \cdot \Delta P^{2/3} \xrightarrow{\text{linéar.}} U_{clari} \approx 10^{-2} \cdot x \cdot \Delta P \\ U_{oboe} = K \cdot x^2 \cdot \Delta P^{2/3} \xrightarrow{\text{linéar.}} U_{oboe} \approx 10^{-4} \cdot x \cdot \Delta P \end{cases}$$

Cependant, la modification telle quelle de cette donnée dans les lignes du programme conduit à un comportement instable non prévisible en théorie. L'utilisation de la valeur résultante du débit U à d'autres niveaux de la modélisation ainsi que le nécessaire ajustement des valeurs de pression

impliquée dans l'équation sont certainement les causes principales de l'instabilité observée.

Malgré l'intérêt suscité par cette voie de recherche, le manque de temps, et la volonté d'obtenir un résultat final 'audible', ne nous ont pas permis d'apporter des solutions fiables au problème posé et nous ont obligés à utiliser en l'état les objets Modalys déjà existants. C'est donc avec une connexion 'reed-double non modifiée que l'étape suivante de construction et d'exploration du modèle de hautbois de cornemuse s'est effectuée.

3. Exploration du modèle de hautbois

La construction du modèle de hautbois dans Modalys s'inspire très fortement de celui de clarinette qui constitue la référence en la matière.

L'anche est un système masse-ressort (objet 'bi-two-mass) dont le rapport grande masse/petite masse est élevé pour pouvoir considérer que seule la petite masse est en mouvement ; du fait de la symétrie de mouvement observée expérimentalement (voir §A-2), il n'est pas nécessaire de 'doubler' le système excitateur pour simuler effectivement l'anche double. Par ailleurs, le résonateur est un tube acoustique "fermé/ouvert" (objet 'closed-open-tube), à perce conique, et qui reçoit l'anche à son extrémité fermée. La connexion entre l'excitateur et le résonateur est assurée par la connexion 'reed-double dont il est question au paragraphe précédent.

Cela étant, un soin particulier est apporté à la description physique des éléments constituant l'instrument.

Le tube est modélisé à partir de documents fournis par Michel Aubry : un relevé de cotes et un plan de l'alésoir qui sert à fabriquer la perce du chalumeau ; ils permettent de définir avec exactitude les dimensions géométriques (longueur, rayon d'entrée et rayon de sortie) ainsi que la morphologie des trous (position par rapport à l'embouchure et diamètre propre).

En outre, des renseignements, recueillis également auprès de Michel Aubry, nous éclairent sur le lien entre géométrie de l'anche, perce du tube et facilité de jeu ; il s'avère, par exemple, qu'une anche présentant un dessin très triangulaire fonctionnera bien sur un hautbois à conicité fermée mais ne sera pas du tout adaptée si la conicité devient importante. Ces notions, spécifiques au type d'instrument étudié, confortent d'ailleurs les remarques qui s'étaient dégagées des expériences à propos de la forte sensibilité des anches et de la difficulté à réaliser un couplage anche/tube convenable. Concrètement, elles conduisent à s'intéresser à un facteur relatif à la géométrie du système excitateur : la description de l'objet 'bi-two-mass ne se faisant que sur des critères mécaniques (masses, constantes de raideur, etc. ...), c'est le paramètre 'surface active' de la connexion 'reed-double qui fera naturellement le lien avec les dimensions de l'anche double.

D'un point de vue pratique, un *script* Modalys est écrit pour simuler les procédures d'ouverture/fermeture des différents trous et faciliter ainsi l'exploration du modèle de hautbois. A ce sujet, il est intéressant de faire plusieurs remarques :

- comme sur un instrument réel, la pression d'alimentation joue un rôle important dans le timbre de l'instrument (si la pression est trop élevée, la note sature) mais également dans les transitoires d'attaque (si le profil de pression est mal réglé par rapport au passage entre deux notes, la seconde note aura tendance à 'accrocher' un régime instable autre que le mode de jeu normal).
- conformément à l'idée développée précédemment, la 'surface active' est un paramètre décisif dans la facilité et la qualité d'émission du son.
- les notes du registre aiguë du hautbois sont plus difficiles à obtenir que celles du registre grave ; elles demandent une pression de jeu plus élevée et nécessitent un ajustement plus fin des paramètres.
- outre la validation 'à l'oreille' qui constitue une première étape, la comparaison du signal de pression externe enregistré sur un instrument (voir § A-2) et du signal de synthèse (en plaçant le microphone à la sortie du tube) donne également des éléments de réponse sur la validité du modèle ; en l'occurrence, pour une note stable et avec un réglage adapté des paramètres, le modèle Modalys supporte relativement bien la comparaison avec la même note (Sol[#]₃) jouée à partir du dispositif expérimental (voir fig. 4a & 4b).



fig. 4 a: pression acoustique mesurée sur le dispositif expérimental
[haut : pression ext. (pavillon) - bas : pression int. (embouchure)]

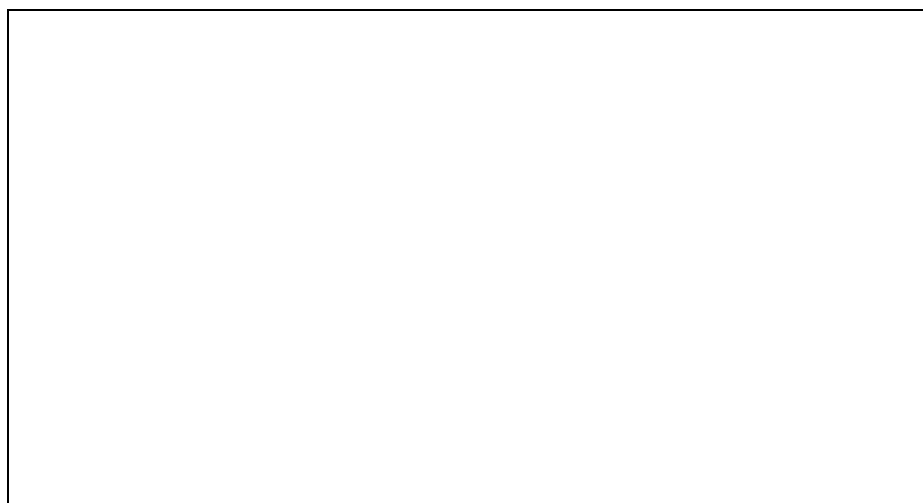


fig. 4 b: pression acoustique issue du modèle de synthèse

Conclusion

L'étude a permis de développer un objet Modalys modélisant le hautbois de cornemuse qui peut être comparé à son homologue acoustique, dans certaines situations de jeu. Malgré des problèmes encore irrésolus dans le développement du modèle, le but que nous nous étions fixé est donc globalement atteint.

D'une manière plus générale, cette recherche a donné l'opportunité de découvrir un instrument : la cornemuse, de visualiser expérimentalement le mouvement d'une anche double et d'ouvrir Modalys à la famille des instruments de type hautbois (perce conique et anche double), même si pour l'instant les spécificités de l'anche double n'y sont que partiellement implémentées.

Pour cette raison, et par rapport aux exigences du projet global qui vise la conception d'un outil de restitution sonore, le travail effectué revêt forcément un caractère exploratoire et le résultat obtenu, même s'il est satisfaisant, ne peut être exploité en l'état. Des travaux complémentaires seront nécessaires pour aboutir à un modèle fiable et conforme, dans une plus grande mesure, à la réalité physique.

N.B. : des exemples sonores illustrant les résultats obtenus ainsi que des échantillons de référence issus des enregistrements sont accessibles via le réseau interne de l'IRCAM ; ils sont situés dans le répertoire 'Modalys-NewDevpt' du 'Dossier partagé' du *Macintosh* "INS-Causse".

Références bibliographiques

- [1] : "Développement d'un 'Objet-Accordéon' pour Modalys" – N. Misdariis, R. Causse – rapport interne IRCAM (juin 1997).
- [2] : The new GROVE dictionary of musical instruments – vol. 1, pp. 99-110 – edited by S. Sadie, Macmillan Press Limited (1984).
- [3] : "The physics of musical instruments" – N. H. Fletcher, T. D. Rossing – Ed. Springer-Verlag (1991).
- [4] : "Small vibration theory of the clarinet" – J. Backus – J. Acoust. Soc. Am. **33**, 806-810 (1961).
- [5] : "Modélisation physique d'instruments à anche double" – O. Theulé – rapport de stage de fin d'études (1997).
- [6] : "Etude de structures complexes vibrantes, application à la synthèse par modèles physiques" – J.M. Adrien – Thèse de doctorat, Université Paris VI (1988).