

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



**Étude qualitative d'un panel d'anches de clarinette par corrélations
canoniques généralisées**

P.-A. Taillard^a et J.-P. Dalmont^b

^aLAUM, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans, France

^bLaboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans - UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085
cedex 09 Le Mans, France
taillard@hispeed.ch

Un panel de 40 anches de clarinette Vandoren classic, forces 2 à 3.5 a été joué, mesuré et analysé par différentes méthodes indépendantes. 1) un musicien professionnel a évalué chaque anche selon 4 descripteurs subjectifs (avec 4 répétitions à l'aveugle). Parallèlement, les anches ont été montées sur un bec M30, instrumenté par un capteur de pression dans la chambre du bec et par 2 capteurs optiques mesurant le déplacement de la pointe de l'anche (gauche/droite). Ce dispositif est complété par une lèvre artificielle en silicone dont le déplacement est contrôlé par une vis micrométrique. Les anches ont été soumises à des mesures répétées à l'état sec (sans humidification préalable). Ces mesures - réalisées pour différentes embouchures - sont les suivantes : 2) mesure quasi statique de section aéraulique en fonction de Δp 3) mesure du déplacement de la pointe de l'anche en fonction de Δp 4) photographies du canal vu de face 5) diagrammes de bifurcation avec un cylindre de 26 cm de long, joué par la bouche artificielle. Ces mesures sont complétées par 6) simulation du jeu par synthèse physique à partir des pressions de jeu enregistrées lors de l'étape 5) à l'aide d'un modèle mécanique non linéaire d'anche issu de l'étape 3) et d'un modèle non linéaire de section aéraulique issu de l'étape 2). Les blocs de données correspondant à ces 6 types de données ont été analysées par corrélations canoniques généralisées. Les résultats prouvent l'existence d'au moins 4 facteurs indépendants présentant des corrélations statistiquement hautement significatives avec toutes les blocs de données. Cette étude ouvre la voie à un tri qualitatif des anches réalisé immédiatement après la fabrication. Les critères proposés autorisent une optimisation de la géométrie de l'anche d'après la table du bec ou vice versa.

1 Introduction

Cette étude a pour but de faire une synthèse des travaux que nous avons réalisés ces dernières années sur l'acoustique de la clarinette, par le biais d'un panel d'anches examiné avec diverses approches (acoustique, musique, synthèse sonore, statistiques). Son but principal consiste à vérifier la solidité du lien qui lie les mesures physiques réalisées à partir de ce panel d'anche et l'évaluation musicale subjective de ces mêmes anches, à l'aveugle, par un clarinettiste. Le deuxième but de l'étude est de vérifier la pertinence des modèles physiques développés dernièrement, en les confrontant aux données expérimentales acquises lors du jeu de ce panel d'anche par une bouche artificielle.

La première partie de ce travail consiste à récolter ces 3 catégories de données qui vont être confrontées, à savoir :

- mesures physiques objectives
- évaluations musicales subjectives
- simulations par modèle physique

La deuxième partie du travail consiste à confronter ces données sur une base statistique, par analyse canonique des corrélations et de vérifier la signification statistique des corrélations trouvées. La troisième partie du travail consiste à interpréter les résultats des points de vue acoustique et musical, à la lumière des corrélations statistiquement significatives relevées entre facteurs canoniques.

On trouvera un bon résumé récent des travaux existants autour du lien entre mesures acoustiques et descripteurs musicaux subjectifs (pour les anches simples) dans le 1er chapitre du mémoire de thèse d'A. Muñoz Arancón [1]. Les études - dont la signification statistique des résultats a été évaluée - sont arrivés à la conclusion que les anches peuvent être classifiées sur la base de 2 descripteurs (facilité de jeu et timbre). C'est notamment le cas de l'étude décrite au chapitre 3 de la thèse citée, ainsi que celle de Gazengel [3].

Nous ne connaissons pas d'étude qui analyse d'un point de vue statistique la pertinence d'un modèle d'anche pour la synthèse par modèle physique, au travers de mesures expérimentales réalisées sur un panel d'anches.

1.1 Problématique et philosophie adoptée pour l'analyse de données

Etant donné le volume considérable des données récoltées (env. 100 GB), il est indispensable de concentrer au préalable l'information à l'aide de représentations parcimonieuses. Pour les mesures physiques, qui sont particulièrement variées et volumineuses - même après compression linéaire de chaque bloc de données récolté par Principal Component Analysis (PCA) - on tirera parti des différentes expériences réalisées et de la diversité des mesures acquises à l'intérieur de chaque bloc de données pour dégager par Canonical-Correlation Analysis (CCA) [4] les facteurs latents qui sont communs aux différents blocs. Ces facteurs latents (aussi nommé facteurs canoniques, que nous nommerons ici facteurs CCA, par opposition aux facteurs PCA) serviront de base pour la confrontation avec les deux autres catégories de données, après compression linéaire par PCA.

La confrontation proprement dite entre les 3 catégories de données (désignées ci-après par objective, subjective et synthesis) pourra être effectuée par paires, par CCA, de manière à identifier le nombre de facteurs CCA communs à chaque paire, présentant des corrélations statistiquement significatives. Cette identification servira de base à l'interprétation des résultats.

La CCA permet de comparer deux groupes de variables provenant de mesures quantitatives réalisées sur les mêmes individus, pour savoir s'ils décrivent un même phénomène. Le nombre de facteurs liés de manière statistiquement significative renseigne sur la dimensionnalité du phénomène observé. L'analyse permet également de sélectionner certaines variables représentatives (faciles à mesurer), permettant de décrire convenablement le phénomène, de manière à prédire statistiquement les valeurs attendues pour d'autres variables (plus difficiles à mesurer). L'analyse canonique **généralisée** permet de pratiquer cette analyse simultanément pour un nombre arbitraire de blocs de données composant le corpus de mesures.

1.2 Plan de l'article

Tout d'abord, la procédure d'acquisition des données est décrite en Sec. 2, puis les différents types de données collectées sont détaillées en Sec. 3, à savoir les photographies

du canal (fente entre l'anche et le bec à travers laquelle l'air pénètre dans l'instrument), les mesures aérauliques et optiques, les diagrammes de bifurcation, l'évaluation musicale subjective et la synthèse par modèle physique. On y décrit aussi le prétraitement apporté à certaines mesures, ainsi que certaines vérifications sur la cohérence des données. L'analyse des données est effectuée en Sec. 4, puis une interprétation des facteurs détectés est tentée en Sec 5, suivi des conclusions en Sec. 6.

2 Dispositif expérimental

2.1 Banc de mesure

Le banc de mesure a été conçu pour autoriser plusieurs types de mesures (statiques et dynamiques), tout en assurant une bonne reproductibilité, sans obligation de modifier les paramètres d'embouchure ni le placement de l'anche entre deux expériences de natures différentes.

2.1.1 Bec instrumenté

Il a été réalisé à partir d'un bec Vandoren modèle M30 dans lequel différents capteurs ont été implémentés : un capteur de pression (modèle Endevco 8507C-2) et 2 capteurs optiques (coupleurs à réflexion ITR8307). Le bec instrumenté est assujéti dans un étau dont les mors ont été usinés pour permettre une fixation sans endommager le bec. Les anches sont fixées au bec par l'intermédiaire d'une ligature de type Vandoren optimum, exactement comme en situation de jeu. La précision du positionnement longitudinal et latéral des anches est assurée par deux guides métalliques.

2.1.2 Lèvre artificielle

La lèvre artificielle est constituée d'un parallélépipède de silicone de dimensions approximatives 11 X 13 X 10 mm. La lèvre est collée sur une tige en acier de 3 mm de diamètre, maintenue par un étrier métallique. Le tout est fixé à la tige de mesure d'un comparateur digital autorisant une lecture au micromètre. L'étau comportant le bec instrumenté et le comparateur comportant la lèvre artificielle sont fixés au bâti d'une ancienne fraiseuse 2 axes.

2.2 Panel d'anche étudié

40 anches de clarinette Vandoren classic ont été achetées dans le commerce, de force 2, 2.5, 3, 3.5 (10 de chaque). Les anches ont été numérotées de R00 à R39 suite à un tirage au hasard réalisé par ordinateur. En principe, toutes les anches devraient avoir la même géométrie, puisqu'elles ont toutes été fabriquées de la même manière. Théoriquement, seule la raideur et l'homogénéité du bois diffère, mais en réalité, l'usinage n'est pas aussi régulier que supposé, comme l'a montré une étude préalable. La géométrie des anches du panel étudié n'a pas (encore) été relevée.

2.3 Déroulement de l'acquisition des données

Les anches ont fait l'objet de plusieurs sessions de mesures. La première session a été réalisée immédiatement après ouverture de l'emballage scellé, garantissant une stabilité hygrométrique depuis la fabrication. Une série de

clichés du canal a été réalisée pour l'anche neuve, avec 16 embouchures différentes. Les anches ont fait ensuite l'objet d'une quinzaine cycles d'humidification (trempage bref dans l'eau) et de séchage (durant 1 jour avec une humidité relative d'air comprise entre 70 et 75%). Dès le premier cycle d'humidification / dessiccation, chaque anche a été jouée quelques minutes par un musicien. Après le 3ème cycle, chaque anche a été jouée puis notée subjectivement par le clarinettiste, procédure répétée lors de 4 cycles consécutifs. L'anche n'a plus été jouée lors des cycles suivants, mais uniquement mesurée sous contrainte. A l'issue de ce traitement, on considère que l'état de l'anche correspond à celui d'une anche "rodée", selon la terminologie des clarinettistes. Une série de mesures aérauliques, optiques et photographiques a été réalisée, à chaque cycle, mais seule la dernière série de mesures réalisée est incorporée au corpus de mesure de la présente étude, par souci de simplification. Les anches ont ensuite été jouées à sec, (c'est-à-dire sans humidification) par la bouche artificielle, de manière à établir les diagrammes de bifurcation. En dernier lieu, une série de clichés du canal de l'anche rodée a été réalisée, pour 25 embouchures différentes.

3 Données collectées

3.1 Photographies du canal

Les photographies ont été réalisées à l'aide d'objectif macro Micro Nikkor AF, 105 mm 1/2.8 D, disposé à env. 30 cm du bec, frontalement au canal (taille du pixel : 4.1 microns). Les photos sont traitées à l'aide des procédures de traitement d'image de Mathematica EdgeDetect et MorphologicalComponents, pour aboutir à 30 mesures de déflexion de la pointe de l'anche par cliché.

3.2 Mesures aérauliques et optiques

Les mesures ont été réalisées à l'aide de la technique "de la bouteille" [5], pour 7 embouchures différentes (positions du support de lèvre variant de 2.500 à 1.750 mm, par pas de 0.125 mm ; le zéro est arbitrairement fixé env. 0.3mm avant le contact de la lèvre avec l'anche) et discrétisées pour une différence de pression Δp de 0 à 14 kPa, par pas de 0.2 kPa. Les signaux optiques mesurant la déflexion à gauche et à droite de l'anche ont été acquis simultanément aux mesures aérauliques. Ils ont été calibrés en fonction des photos du canal réalisées à l'issue de chaque mesure aéraulique.

3.3 Diagrammes de bifurcation

Le banc de mesure a été transformé en bouche artificielle en fixant un tube de PVC de 15.5 mm de diamètre intérieur et 261 mm de long au bec instrumenté. L'extrémité du tube a été enfilée dans un orifice circulaire pratiqué dans une cuve parallélépipédique d'environ 100 litres, autorisant une connexion étanche avec celle-ci. On fait chanter "l'instrument", en augmentant la dépression dans la cuve jusqu'au seuil d'extinction (crescendo), puis on ferme le robinet d'aspiration et on observe le comportement dans le decrescendo, qui se régule de lui-même en fonction de la consommation d'air. L'expérience est répétée pour 4 positions de lèvre différentes (position du support de lèvre

de 2.125 à 1.250 mm par pas de 0.125 mm). La pression dans la cuve est mesurée.

On désigne par "diagramme de bifurcation" un bloc de données comprenant les pressions des 4 seuils de bifurcation (émergence et extinction lors du crescendo et du decrescendo), les fréquences de jeu ainsi que 1 période par signal (rééchantillonnée sur 60 points temporels) de chacun des 4 capteurs mesurés (2 capteurs de pression et 2 capteurs optiques), ceci pour 80 pressions d'alimentation régulièrement réparties entre les 4 seuils. Etant donné le volume important des données (40 anches \times 4 embouchures \times 9682 mesures), l'analyse PCA est effectuée en 2 étapes : on comprime tout d'abord sur la base des 160 expériences réalisées, puis sur la base des 40 anches concernées. Cette manière de procéder permet une analyse plus fine des signaux sans dépendre de descripteurs spectraux, comme le Centre de Gravité Spectral (CGS), par exemple, qui peut être calculé *a posteriori*.

3.4 Evaluation musicale subjective

Une évaluation musicale subjective a été réalisée à l'aveugle en fonction de 4 descripteurs autorisant des comparaisons absolues entre anches à l'intérieur du panel. Ces descripteurs visent notamment l'aptitude de l'anche à satisfaire certaines exigences, et non des propriétés abstraites, usuellement assez mal définies. Chaque test a été répété 4 fois pour les 4 descripteurs suivants :

1. *ForceSubj* : On note la force subjective de l'anche de 1.5 à 4, à l'aveugle, sans connaître sa force nominale (annoncée par le fabricant), mais sachant qu'elle est comprise entre 2 et 3.5.
2. *Poulenc* : On évalue l'aptitude de l'anche à jouer les premières lignes de la sonate de Poulenc, qui requiert un fortissimo particulièrement brusque et agressif.
3. *Schubert* : On évalue l'aptitude de l'anche à jouer les premières lignes du "Hirt auf dem Felsen" de Schubert, qui requiert une sonorité à l'émission souple et expressive.
4. *Intonation* : On joue le sol4 (tous les trous ouverts) quelques secondes, avec une sonorité pleine et ronde. Lorsque le son est jugé «optimal», on ouvre les yeux et on note la première valeur lue sur l'accordeur

Un 5ème descripteur (objectif) a été adjoint : *ForceNom* : la force nominale de l'anche annoncée par le fabricant.

3.4.1 Evaluation de la reproductibilité

A l'intérieur de chaque descripteur, une analyse CCA montre que les corrélations canoniques moyennes sont très significatives, pour une statistique basée sur les rangs. Ces corrélations valent respectivement : 0.82, 0.54, 0.53 et 0.67. Une valeur supérieure à 0.28 est suffisante pour affirmer un lien statistiquement significatif entre les 4 répétitions de l'évaluation de chaque descripteur, au seuil de 0.1%.

3.5 Synthèse par modèle physique

L'instrument joué par la bouche artificielle a été simulé par synthèse par modèle physique, à l'aide des techniques

de guide-ondes qui sont détaillés dans [2]. Si la géométrie du tube cylindrique ne pose aucun problème à déterminer, ce n'est pas le cas de celle du bec. En effet, dans la chambre du bec, l'hypothèse d'ondes planes (ou quasi-sphériques) n'est plus valide, alors que cette hypothèse est probablement valide à l'intérieur de la perce du bec qui est conique. On fait l'hypothèse que la chambre du bec peut se modéliser par un cône ayant un diamètre de sortie égal à celui d'entrée de la perce du bec et on simule quelques diamètres d'entrée différents (8, 10, 13, 15.5 et 20 mm), en conservant le volume intérieur du bec constant (11.2 cm³, conformément aux mesures volumétriques). Les résultats obtenus pour le diamètre de 10 mm ont été jugés les plus conformes aux mesures.

Le guide-onde simulé comporte 3 segments. Le premier segment est compris entre l'anche et le capteur de pression situé dans la perce du bec. Le 2ème segment simule la perce du bec en aval du capteur, alors que le 3ème segment simule le cylindre. Le modèle non linéaire de rayonnement proposé dans [2] a été retenu. Un modèle d'anche non linéaire a été établi en fonction des mesures réalisées, en faisant une distinction entre la raideur mécanique (mesurée par les capteurs optiques) et la section aéraulique (qui est déterminée par la loi de Bernoulli, en fonction de la position mécanique de l'anche et du débit mesuré). Ce modèle simule le comportement de l'anche en fonction de la différence de pression Δp aux bornes de l'anche en découpant la plage de pression mesurée en une quinzaine de tronçons à l'intérieur desquels on applique le modèle de contact non linéaire décrit dans [6]. Chaque tronçon présente une raideur parabolique convexe et des jonctions de type C^1 . Dans le modèle dynamique, on fait l'hypothèse que toutes les anches ont la même masse et le même amortissement (ces paramètres n'ont pas été mesurés). La 1ère fréquence de résonance dépend donc uniquement de la raideur.

La pression de jeu a été déterminée à l'aide des mesures fournies par le capteur Endevco situé dans la cuve (filtrées passe-bas), de manière à reproduire parfaitement les conditions des mesures avec bouche artificielle et pouvoir comparer à chaque instant les signaux mesurés et simulés.

4 Analyse des données

4.1 Structure des données

Les 3 catégories de données mentionnées dans l'introduction constituent la structure hiérarchique supérieure du corpus de mesures de la population étudiée, dont les individus sont constitués par des anches de clarinette. Les données de ces catégories ne sont pas constitués de mesure brutes, mais de facteurs non corrélés entre eux, obtenus soit par CCA, soit par PCA. A l'intérieur de la catégorie "objective", la plus riche en données, chaque bloc de donnée acquis par un canal différent porte un nom différent permettant de les identifier, de manière à faciliter l'analyse et les discussions.

1. *objective* : Facteurs CCA issus de mesures physiques objectives réalisées sur le panel d'anche à partir de la compression linéaire sur 15 facteurs par PCA de chacun des 6 blocs de données suivants :

- *PhotoNew* : photographies du canal en fonction de l'embouchure pour l'anche neuve

- *PhotoBreakIn* : photographies du canal en fonction de l'embouchure pour l'anche après rodage
- *Aero* : section aéraluque, en fonction de l'embouchure et de Δp
- *OptoL* : déflexion mécanique de l'anche sur le côté gauche lors des mesures aéraluques, en fonction de l'embouchure et de Δp
- *OptoR* : déflexion mécanique de l'anche sur le côté droit lors des mesures aéraluques, en fonction de l'embouchure et de Δp
- *Bifurcation* : diagrammes de bifurcation (y compris signaux temporeux) réalisées à l'aide d'une bouche artificielle sur un crescendo / decrescendo

2. *subjective* : Facteurs PCA issus d'une évaluation musicale subjective du panel d'anche par un musicien
3. *synthesis* : Facteurs PCA issus d'une simulation par modèle physique des diagrammes de bifurcation

4.2 Blocs de données à l'intérieur de la catégorie "objective"

La qualité des données récoltées autorisent théoriquement l'identification individuelle de chaque anche. De plus, il n'y a physiquement aucun doute que les grandeurs mesurées soient fortement liées entre elles. On s'attend dès lors à observer un nombre facteurs indépendants comparable à celui des anches du panel. On constate en effet que les 15 premiers facteurs CCA sont statistiquement significatifs, au seuil de 1%. Pour 13 d'entre eux, ceci est même vrai au seuil de 0.1%.

Notons que pour chaque bloc de données pris individuellement, des corrélations significatives avec les facteurs CCA objectifs sont prouvées pour 8 à 10 facteurs, suivant le bloc considéré. Relevons que PhotoNew permet une prédiction statistiquement significative des 8 premiers facteurs.

4.3 Confrontation entre les catégories "objective" et "subjective"

Une analyse par CCA nous permet de savoir quels descripteurs musicaux subjectifs ont une liaison avérée avec les mesures physiques objectives réalisées sur les anches. On s'attend à observer un nombre de facteurs indépendants approximativement égal à celui des descripteurs testés (5, en l'occurrence). On constate en effet que les 6 premières corrélations canoniques sont statistiquement significatives au seuil de 5%. Par contre, au seuil de 1%, seules les 4 premières corrélations sont significatives. Les relations entre facteurs objectifs et descripteurs subjectifs sont illustrées en Fig. 1. Son interprétation est discutée en Sec. 5.

4.4 Confrontation entre les catégories "objective" et "synthesis"

L'analyse CCA montre que les 8 premiers facteurs sont significativement corrélés au seuil de 0.1%. Au seuil de 5%, les corrélations sont significatives pour les 10 premiers

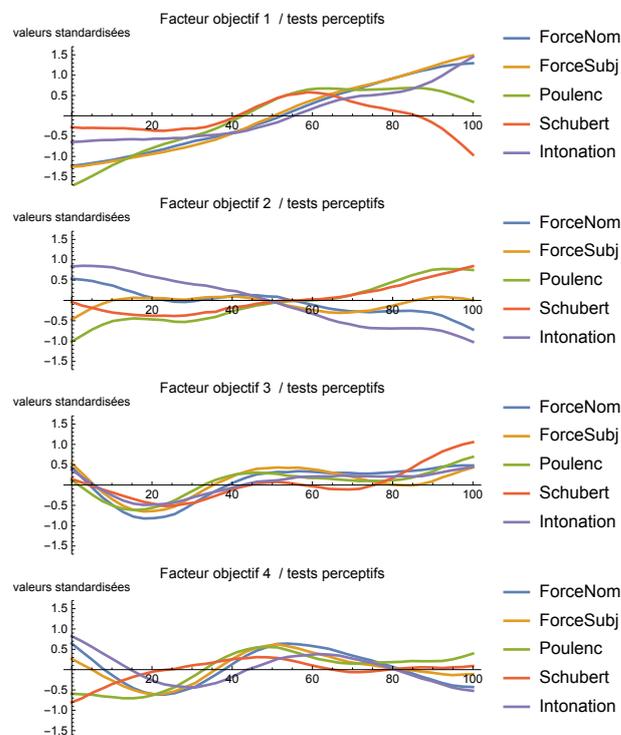


FIGURE 1 – Evolution de la moyenne des descripteurs des tests perceptifs, le long des 4 premiers facteurs objectifs (pour les 4 répétitions du test), anches triées selon le rang obtenu à l'intérieur de chaque facteur, après lissage par filtre gaussien de rayon 8. Le quantile (le long du facteur) est indiqué en abscisse.

facteurs. On rappelle que le seul élément notable qui diffère lors des simulations est le modèle d'anche non linéaire aéraluque et mécanique, qui a été déterminé à partir de mesures statiques. Ce résultat démontre le rôle essentiel joué par le comportement statique de l'anche lors du jeu et que le modèle d'anche proposé reflète de manière adéquate les différences de sonorité en fonction de l'anche. Les différences dans la dynamique des signaux qui ne sont pas correctement reproduites par le modèle semblent être essentiellement localisées au-delà du 10ème facteur. Il convient cependant d'observer que la synthèse exagère souvent les différences entre anches, comparativement aux mesures avec la bouche artificielle. Un ingrédient semble manquer au modèle d'anche : le CGS des signaux d'anches mesurés ne dépend presque pas de l'embouchure, contrairement à la synthèse. Le CGS des signaux de pression est cependant peu affecté par cette différence.

Néanmoins, il demeure que les sons synthétisés sont bien représentatifs des différences mises en évidence pour chaque facteur par la bouche artificielle. Elle permet de développer des exercices qui maximisent les différences de sonorité à l'intérieur de chaque facteur et de constituer en quelque sorte un nuancier permettant au clarinetiste de classer plus finement ses anches, en sachant précisément quelles différences de fonctionnement rechercher.

5 Interprétation des résultats

Les résultats sont interprétés sur une base graphique à partir des données brutes collectées. Pour cela, on trie les anches selon le rang obtenu pour chaque facteur CCA et on

examine l'évolution des mesures brutes le long du facteur, après lissage à l'aide d'un filtre gaussien de rayon 8. On représente ces données lissées au moyen de 5 "instantanés" relevés à intervalles réguliers lors de la traversée chaque facteur, après avoir retranché la valeur moyenne. De tels graphes ont été établis pour tous les blocs de données. Pour le bloc *Bifurcation*, les graphes pour les seuils, les fréquences de jeu et le CGS des signaux de pression et optiques ont été analysés et interprétés. Un exemple de graphe pour *PhotoBreakIn* est donné en Fig. 2. L'interprétation tient aussi compte des corrélations inter blocs calculées entre facteurs canoniques (non données ici).

5.1 Description des facteurs objectifs

1. Le facteur 1 est très corrélé avec la force d'anche (nominale ou subjective, qui sont quasiment superposées, voir Fig. 1). *PhotoNew* et *PhotoBreakIn* montrent que le canal se déforme de manière plus concave que la moyenne pour les anches fortes et inversement pour les anches faibles (voir Fig. 2). On relève la contradiction apparente entre la fréquence de jeu (descendante, en parcourant le facteur et très dépendante de l'embouchure) des mesures de bifurcation et l'intonation (ascendante) notée lors des tests perceptifs (voir Fig. 1). La contradiction s'explique par le fait qu'une anche forte doit être jouée avec une embouchure plus serrée, sans quoi le bruit de turbulence est jugé trop important par le clarinettiste, dans le but de produire une sonorité "optimale" et vice-versa pour l'anche faible, qui produirait une sonorité étriquée avec une embouchure normale. Avec la bouche artificielle, par contre, une même position de lèvres induit un canal plus fermé avec une anche faible qu'avec une anche forte.
2. Le facteur 2 est caractérisé par une ouverture au repos (sans pression de lèvres) qui augmente linéairement le long du facteur (voir Fig. 2), alors que l'ouverture avec une embouchure assez serrée suit une tendance inverse. Ceci est interprété comme un enroulement plus prononcé de l'anche au repos sur la table du bec, à l'extrémité "gauche" du facteur. La concavité du canal évolue en sens inverse par rapport au facteur 1. L'intonation, quasi insensible à l'embouchure, baisse linéairement lors de la traversée du facteur (mesures objectives, subjectives (Fig. 1) et simulations sont d'accord sur ce point). Les anches plus ouvertes au repos et plus souples (à l'extrémité "droite" du facteur) sont plus appréciées par le clarinettiste pour jouer Poulenc et Schubert (voir Fig. 1).
3. Le facteur 3 lie les différents blocs de données à la quantité d'air qui peut entrer dans l'instrument (notamment par les côtés de l'anche, voir Fig. 2). Ceci dénote probablement un enroulement progressif avant contact de la pointe de l'anche avec le bec, à "droite" du facteur et un contact plus subit de la pointe avec le bec, avec une raideur d'anche plus linéaire que la moyenne avant contact, à "gauche". Il faudra vérifier si ceci ne serait pas lié à une différence relative de raideur entre la pointe et l'empeigne de l'anche (notamment dans la région dite du coeur), qui fournit une interprétation assez logique aux différences

constatées. Les diagrammes de bifurcation montrent une augmentation progressive et légère de la brillance (CGS des signaux de pression) à embouchure serrée (par rapport à la moyenne) et inversement pour les embouchures relâchées.

4. Le facteur 4 lie la déformation élastique de l'anche neuve avec une embouchure assez serrée et les déformations plastiques au repos constatées sur les photos de l'anche rodée. Ces déformations présentent des plissements asymétriques assez marqués aux 2 extrémités du facteur et sont plus régulièrement concaves au milieu du facteur (voir Fig. 2). A "droite", la déformation générale est convexe. On constate qu'une anche située à "gauche" du facteur modifie sa brillance en fonction de l'embouche de manière nettement plus sensible qu'à droite.
5. Le facteur 5 révèle une asymétrie de flexion de l'anche (à droite ou à gauche, à chacune des extrémités du facteur et un peu antisymétrique, voir Fig. 2), alors que les anches au centre du facteur sont assez symétriques. L'asymétrie est déjà présente sur l'anche neuve (avec pression de lèvres) et s'imprime de manière plastique sur l'anche rodée. Les signaux optiques gauche et droite confirment l'asymétrie de flexion, en statique comme en dynamique. On constate que les anches asymétriques sont peu appréciées lors des tests perceptifs. On observe que la brillance des anches symétriques est plus importante que celle des anches asymétriques. Ces différences sont particulièrement marquées près du seuil de battement.
6. Le facteur 6 est caractérisé par une asymétrie qui est particulièrement visible dans la dynamique de l'anche, lors du jeu avec la bouche artificielle (différence entre signaux optiques droit et gauche). Ce facteur présente la particularité d'être légèrement corrélé (0.354) avec le descripteur "Schubert" qui évalue la souplesse de jeu. Est-ce dû à une asymétrie de la bouche du clarinettiste? On observe une trajectoire de forme parabolique pour la brillance le long de ce facteur, tant sur les mesures que sur la synthèse. Cette évolution est particulièrement marquée pour les embouchures serrées.

6 Conclusion

Cette étude démontre le rôle essentiel de la statique de l'anche lors du jeu de l'instrument, en relevant la diversité et la complexité des comportements. Les photos du canal réalisées avec une anche neuve en variant l'embouchure ont une valeur prédictive permettant d'envisager un tri des anches à l'usine, à l'aide d'une procédure facilement automatisable. Les fabricants individualisant leurs anches par un numéro pourraient ainsi proposer une catégorisation basée sur le feedback renvoyé par leurs clients.

L'étude perceptive a montré que les 4 descripteurs proposés sont corrélés de manière statistiquement significative avec les 4 premiers facteurs objectifs détectés (soit 2 de plus que ce qui avait pu être prouvé jusqu'ici à partir de tests perceptifs). Ces facteurs correspondent à : 1) la raideur de l'anche, particulièrement dans sa partie médiane, 2) l'ouverture au repos 3) l'évolution de la raideur entre

la pointe et l'empaigne de l'anche et 4) les déformations plastiques de l'anche rodée. Les facteurs 5 et 6 sont liés à des asymétries de l'anche qui n'ont pas été ciblées par des test perceptifs spécifiques. On relèvera que ce lien significatif a été établi en comparant des mesures objectives (essentiellement *statiques*), réalisées sur des anches **sèches**, au *jeu* par un clarinettiste de ces mêmes anches à l'état **humide**. Les caractéristiques mises à jour permettent de saisir pourquoi des descripteurs vagues comme "qualité globale" ou "brillance" sont mal adaptés, notamment parce qu'ils ne tiennent pas compte des multiples influences (antinomiques) qui entrent en compte. Des descripteurs plus raffinés pourront être proposés, grâce notamment l'utilisation de la synthèse sonore et aux indications précises sur les différences de fonctionnement entre anches fournies par les photos du canal. Ces photos fournissent aussi au clarinettiste des renseignements précieux sur les corrections qu'il est possible d'apporter à l'anche par grattage, soit en construisant son propre banc d'essai (comportant un bec, une lèvres artificielle et un appareil de photo), soit en fonction des différences perceptives notées. Le fabricant de béc peut aussi s'inspirer des techniques développés pour optimiser la forme de la table en fonction d'un modèle d'anche particulier.

Remerciements

Les auteurs remercient le naturaliste Jean-Lou Zimmermann pour le prêt de l'objectif macro, Bruno Gazengel pour les discussions fructueuses, ainsi que la haute école Arc ingénierie, à Neuchâtel, Suisse, pour les facilités accordées.

Références

- [1] A. Muñoz Arancón, *New techniques for the characterisation of single reeds in playing conditions*, PhD. thesis Univ. du Maine (2017). Disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/>.
- [2] P.-A Taillard., *Theoretical and experimental study of the role of the reed in clarinet playing*, PhD. thesis Univ. du Maine (2018). Prochainement disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/>.
- [3] B. Gazengel, J.-P. Dalmont & J.-F. Petiot, Link between objective and subjective characterizations of Bb clarinet reeds. *Applied Acoustics*, **166**, 106-155 (2016).
- [4] A. & M. Tenenhaus. Regularized generalized canonical correlation analysis. *Psychometrika*, **76.2**, 257 (2011).
- [5] P.-A. Taillard, J.P. Dalmont, B. Gazengel & A. Muñoz Arancón, Analysis of Nonlinear Characteristics of the Clarinet Exciter Obtained via a New Measurement Method, *congrès ICA, Montréal* (2017).
- [6] V. Chatziioannou & M. van Walstijn. Energy conserving schemes for the simulation of musical instrument contact dynamics. *Journal of Sound and Vibration*, **339**, 262-279 (2015).

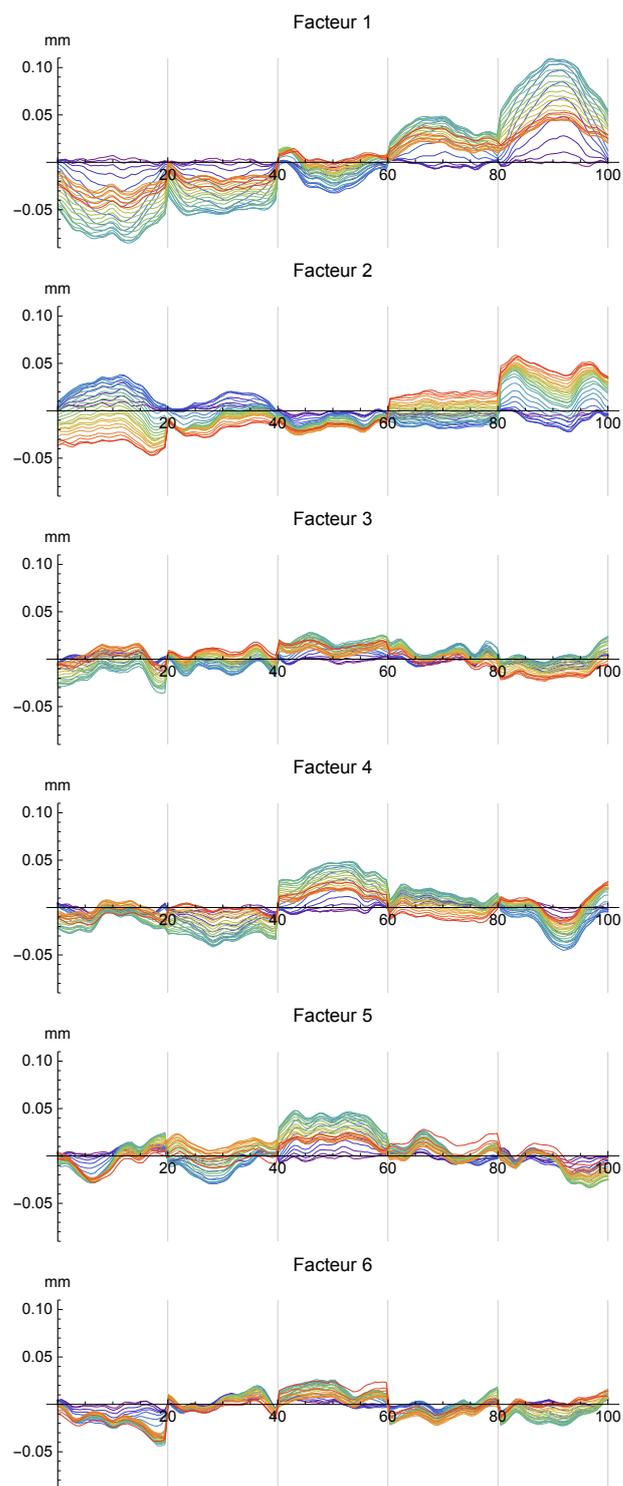


FIGURE 2 – Écart à la moyenne de la hauteur du canal des anches rodées obtenue par photographie en fonction de la position sur la largeur de l'anche (13 mm). Mesures réalisées pour 25 embouchures, chacune associée à une couleur, de l'anche au repos en rouge à une embouchure très serrée en violet. Chaque graphe juxtapose 5 figures correspondant à la moyenne sur un groupe de 9 anches successives (centré respectivement autour des anches 4, 12, 20, 28, 36), les anches étant classées suivant le facteur désigné en haut de chaque graphe