

Etude comparative de sons simulés et sons réels pour différentes trompettes

Jean-François Petiot¹, Marie Françoise Lucas¹, Joël Gilbert²

¹IRCCyN (UMR CNRS 6597) - 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes Cedex 3, {petiot,lucas}@irccyn.ec-nantes.fr

²LAUM (UMR CNRS 6613), Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9, Joel.Gilbert@univ-lemans.fr

Ce travail s'intéresse à la capacité de simulations sonores par modèles physiques à créer des sons caractéristiques d'un instrument donné. L'objectif de l'étude est de savoir si la simulation est suffisamment précise pour produire des sons dissimilaires pour deux instruments différents, et dans quelles mesures ces dissimilarités sont en accord avec celles générées par un musicien. Pour cela, nous avons considéré trois trompettes différentes, obtenues par modification géométrique de la perce de leur branche d'embouchure. Celles-ci ont été jouées par un musicien sur une note particulière, pour des sons en régime permanent. Nous avons utilisé la technique de l'équilibrage harmonique pour générer des sons en régime permanent sur cette même note. Le paramètre d'entrée de la simulation est l'impédance d'entrée des trompettes (mesurées), les paramètres de contrôle sont les caractéristiques mécaniques du musicien virtuel. Les deux catégories de sons « simulés » et « musicien » ont été caractérisées par leur spectre en régime permanent. A partir des données de l'amplitude des différents harmoniques, nous avons étudié les différences entre les populations de sons simulés par les 3 instruments par analyse factorielle discriminante. Pour des trompettes très différentes du point de vue de leur impédance, on constate que les sons simulés sont clairement différenciés. Pour des trompettes plus similaires, la variabilité due au musicien virtuel est du même ordre que celle due à l'instrument. Ensuite, les similarités entre les sons « simulés » et les sons « musicien » ont été étudiées. Pour la même trompette, on constate que les sons « simulés » et les sons « musicien » sont évidemment très différents. Mais il existe des similarités remarquables dans les différences entre les 3 instruments. Que l'instrument soit joué ou simulé, il apparaît donc possible de définir une signature acoustique propre à l'instrument.

1 Introduction

Le développement de modèles physiques caractérisant les instruments de musique est particulièrement intéressant pour comprendre la façon dont ils sont conçus et pour proposer d'éventuelles modifications de conception permettant d'aller dans le sens souhaité par le musicien [1]. Dans ce cadre, les simulations sonores par modèles physiques constituent une voie intéressante pour comprendre et améliorer le fonctionnement d'instruments de musique [2].

Afin d'étudier des différences subtiles entre le timbre de sons de trompette, nous avons développé une branche d'embouchure spéciale qui possède une géométrie interne paramétrée [3]. En utilisant la même trompette et cette branche paramétrée, plusieurs centaines d'instruments ayant un comportement acoustique finement variable peuvent être réalisés. Dans un précédent article [4], nous avons montré l'intérêt de pouvoir modifier finement la géométrie de la perce pour créer des différences fines et contrôlée entre des instruments. Pour des sons joués avec la bouche artificielle et des notes à dynamique variable (*crescendo*), nous avons montré que l'évolution du centre de gravité spectral des notes est caractéristique de la branche d'embouchure utilisée. Dans un autre article [5], nous avons montré que les simulations sonores par équilibrage harmonique, basées sur la mesure d'impédance, étaient capables de générer des sons caractéristiques d'une branche d'embouchure, et que les paramètres de contrôle de la simulation (le musicien « virtuel ») avaient une influence conforme à la physique et réaliste sur les sons générés.

Dans le présent article, nous proposons d'étudier dans quelles mesures les sons simulés pour 3 branches différentes sont en accord avec ceux joués par un musicien. Nous avons utilisé 3 branches paramétrées et généré des sons avec un musicien et par simulation.

Le chapitre 2 présente les dispositifs expérimentaux utilisés, ainsi que les méthodes utilisées pour la simulation par équilibrage harmonique et l'enregistrement des sons réels. Le chapitre 3 présente les résultats et discussions concernant la comparaison des sons simulés et joués par un musicien.

2 Matériel et méthode

2.1 Branche d'embouchure paramétrée

Afin de créer une famille de trompettes dont le comportement en situation de jeu est très différent, nous avons conçu une branche d'embouchure (partie approximativement conique, située entre l'embouchure et la coulisse d'accord) de géométrie variable [3]. Elle est composée de 4 pièces interchangeables, de forme intérieure tronc-conique, dont les rayons d'entrée et de sortie sont de dimension variable (figure 1).



Figure 1 : constitution de la branche d'embouchure paramétrée

Une branche donnée est repérée par 4 lettres, chaque lettre repérant une pièce particulière. Trois branches ont été considérées pour cette étude, repérées AAAE, CHMQ et DKOS. Pour forcer volontairement le trait et créer des différences importantes entre les instruments, la branche AAAE est une branche principalement cylindrique, conduisant à un instrument de faible qualité (défauts de justesse) mais néanmoins jouable. La branche CHMQ est une copie de la géométrie intérieure d'une branche existante, enfin la branche DKOS comporte de faibles variations par rapport à la CHMQ (nous avons vérifié qu'en aveugle, les musiciens ne sont pas capables de discriminer la CHMQ de la DKOS). Les dimensions des rayons intérieurs des différentes branches sont données dans la table 1.

	Pièce 1		Pièce 2		Pièce 3		Pièce 4	
	r_1	R_2	r_2	r_3	r_3	r_4	r_4	r_5
AAAE	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	5.825
DKOS	4.64	5.45	5.45	5.5	5.5	6	6	5.825
CHMQ	4.64	5	5	5.5	5.5	5.7	5.7	5.825

Table 1 : dimensions (en mm) des différentes branches

Ces branches ont été montées sur la même trompette (*Bach*, pavillon 43, modèle *Vernon*) en utilisant toujours la même embouchure (*Yamaha* 15B4). L'impédance d'entrée Z de ces trois instruments a ensuite été mesurée [6]. Cette mesure d'impédance constitue un paramètre d'entrée des simulations.

2.2 Simulations sonores par équilibrage harmonique

La technique de simulation sonore par équilibrage harmonique consiste à calculer une solution périodique $p(t)$ d'un système en considérant un nombre fini N d'harmoniques d'une série de Fourier tronquée (équation 1).

$$p(t) = C_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cdot \cos(2\pi n F_0 t + \varphi_n) \quad (1)$$

Les inconnues du problème sont les amplitudes A_n (C_0 et φ_n) (consulter [7] pour plus de détails.). Le modèle physique est basé sur trois équations (équations 2-3-4) qui mettent en jeu 3 variables périodiques, la hauteur d'ouverture des lèvres $H(t)$, la vitesse à l'entrée de l'instrument $v(t)$, et la pression acoustique $p(t)$ dans l'embouchure.

$$v(t) = b \cdot H(t) \sqrt{\frac{2(P_m - p(t))}{\rho}} \quad (2)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} H(t) + \frac{\omega_L}{Q_L} \frac{d}{dt} H(t) + \omega_L^2 H(t) = \frac{P_m - p(t)}{\mu_L} \quad (3)$$

$$P(j\omega) = Z(j\omega) V(j\omega) \quad (4)$$

Une solution numérique $p(t)$ de ce système d'équation peut être trouvée, en fonction des paramètres de contrôle de la simulation. Trois paramètres de contrôle, représentant le musicien virtuel, sont considérés : P_m , pression dans la bouche ; f_L , fréquence de résonance des lèvres ; $\nu_L = 1/\mu_L$, inverse de la masse surfacique des lèvres.

Afin de créer différents sons avec le même instrument, nous avons généré de manière systématique une population de sons en faisant varier de manière incrémentale les paramètres de contrôle sur une plage de variation réaliste et

en explorant toutes les possibilités. La plage de variation des paramètres de contrôle est donnée dans la table 2. Même si la combinatoire donne un nombre de sons théoriques possibles de $8 \times 40 \times 6 = 1920$ sons, il faut signaler que toutes les configurations ne conduisent pas forcément à la convergence de la méthode.

Paramètres de contrôle			Paramètres des lèvres		
définition	notation	valeur	définition	notation	valeur
Pression dans la bouche	P_m (Pa)	8000 à 22000 (pas de 2000)	Largeur des lèvres	b (mm)	10
Fréquence de résonance des lèvres	$f_L = \omega_L / 2\pi$ (Hz)	400 à 439 (pas de 1Hz)	Hauteur au repos	H_0 (mm)	0.05
Inverse de la masse surfacique	$\nu_L = 1/\mu_L$ ($m^2 kg^{-1}$)	-0.5 à -3 (pas de -0,5)	Facteur de qualité	Q_L	5

Table 2 : paramètres utilisés dans les simulations

Cette exploration systématique de l'espace des paramètres de contrôle conduit, pour chaque instrument, à une famille de sons caractérisés par leur fréquence de jeu F_0 et les amplitudes A_i des N harmoniques (C_0 et les phases φ_n n'ont pas été considérés dans cette étude). Pour les trois trompettes, la note simulée a été le régime 4 de l'instrument (note Bb3 – fréquence théorique 466 Hz). Etant donnée la plage de fréquence de la mesure d'impédance, seuls 6 harmoniques ($N=6$) ont été considérés pour la simulation

Il faut noter que le son simulé correspond au son à l'intérieur de l'embouchure. Dans le but de le comparer au son réel, il est nécessaire d'obtenir la pression acoustique externe au niveau du pavillon. Nous avons pour cela considéré la fonction de transformation du spectre, conformément aux travaux de Benade [8]. Le résonateur est vu dans ce cas comme un filtre passe haut, l'enveloppe du filtre correspondant à la fonction de transfert de l'instrument. Nous avons considéré un filtre correspondant à une trompette « théorique », et appliqué ce même filtre aux trois instruments. Formellement ceci est bien sûr une approximation, car il aurait fallu prendre les fonctions de transfert propres à chaque instrument. Mais il est très probable que les différences occasionnées sur les sons externes soient négligeables. Pour chaque instrument, la famille de sons « externes » a donc été calculée en multipliant directement les amplitudes par les coefficients du filtre. Chaque instrument est ainsi représenté par un tableau comportant en ligne les différents sons, et 7 colonnes (F_0 : fréquence de jeu et les 6 amplitudes notées a_i des harmoniques du son externe).

2.2 Enregistrement des sons réels et analyse des signaux

Pour les 3 branches d'embouchure, nous avons enregistré la même note que pour les simulations (Bb3) avec un même musicien. Tous les enregistrements (échantillonnage 44100Hz, 16bits) ont été effectués dans la même pièce avec un microphone Shure SM58. Le microphone était placé dans l'axe du pavillon (distance = 10cm) et connecté à un préamplificateur puis une carte son Digigram Vx Pocket V2. La position de la coulisse d'accord était la même pour tous les enregistrements. Afin de limiter le plus possible la variabilité inhérente au musicien, il lui était demandé de jouer la note le plus spontanément possible, sans tenter de corriger notablement

la hauteur ou le timbre des notes. La durée de chaque son était d'environ 3 secondes. Deux séries de sons ont été enregistrées :

- Série 1 : série à dynamique constante. 10 répétitions de la même note tenue, avec une dynamique *forte*
- Série 2 : série à dynamique croissante. 20 répétitions de la même note, en augmentant progressivement au fil de la série la dynamique de la nuance *ppp* à *fff*.

Chaque son a été ensuite traité pour extraire des descripteurs des signaux. Les sons ont tous été fenêtrés pour supprimer les transitoires d'attaque et d'extinction, la partie restante a été supposée harmonique et stationnaire. Sur chaque fenêtre (représentant une partie de la note), nous avons estimé la fréquence de jeu (fréquence fondamentale) et les amplitudes notées am_i des 20 premiers harmoniques par détection synchrone.

Enfin, pour tous les sons, le centre de gravité spectral CGS a été calculé ($N=6$ pour les sons simulés, $N=20$ pour les sons « musicien ») (équation 5) :

$$CGS = \sum_{k=1}^N k.a_k / \sum_{k=1}^N a_k \quad (5)$$

3 Résultats et discussion

3.1 Séries à dynamique constante

10 répétitions de la même note ont été effectuées par le musicien à une dynamique *forte*, pour chaque instrument. Ces sons sont repérés DKOS-m, CHMQ-m et AAAE-m.

Pour pouvoir comparer ces sons avec les simulations, nous avons effectué une sélection des sons simulés en ne considérant qu'une même valeur de la pression P_m ($P_m = 16\,000$ Pa), 4 valeurs de f_L (400 ; 404 ; 408 ; 412Hz) et 3 valeurs de ν_L (-3 ; -2.5 ; -2). Pour chaque instrument, 11 sons simulés correspondent à ces critères. Les sons simulés sont repérés DKOS-s, CHMQ-s et AAAE-s. Les figures 2 et 3 représentent les boxplots (boîte à moustache) visualisant la distribution de la fréquence de jeu pour les 3 instruments, pour les simulations et le musicien respectivement.

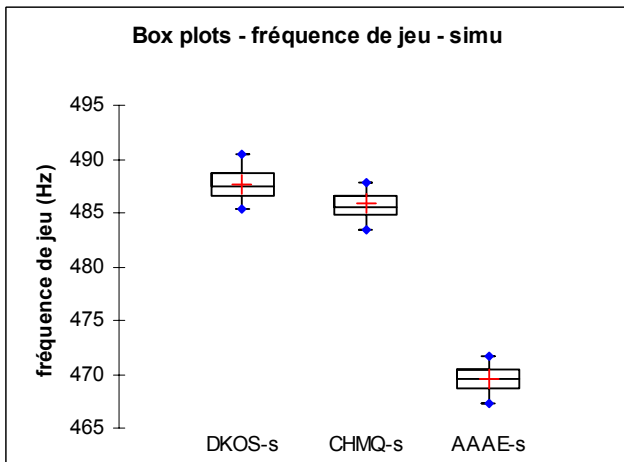


Figure 2 : distribution des fréquences de jeu pour les sons simulés

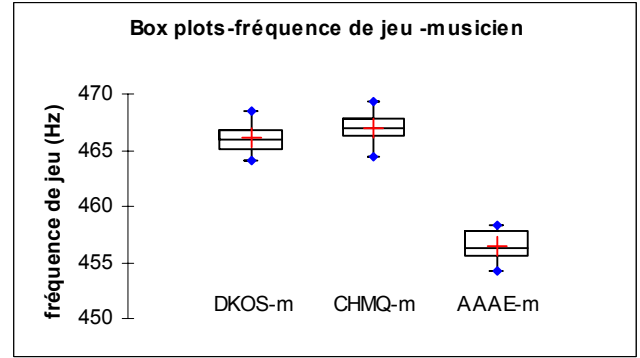


Figure 3 : distribution des fréquences de jeu pour les sons « musicien »

Pour les deux familles, un test de différence des moyennes montre que la fréquence de jeu de la trompette AAAE est significativement plus faible que celle de CHMQ et DKOS ($p\text{-value} < 5\%$), et que la fréquence de jeu de la trompette DKOS n'est pas significativement différente de celle de CHMQ. Ceci indique clairement un accord entre les simulations et les sons réels en ce qui concerne les fréquences de jeu.

Les figures 4 et 5 représentent les boxplots du CGS pour les 3 instruments, pour les simulations et le musicien respectivement.

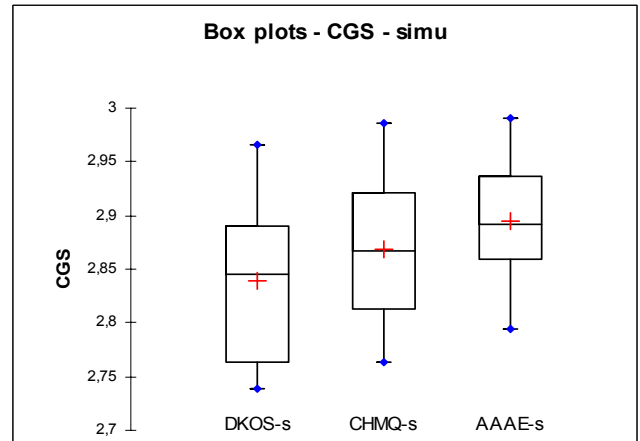


Figure 4 : distribution des CGS pour les sons simulés

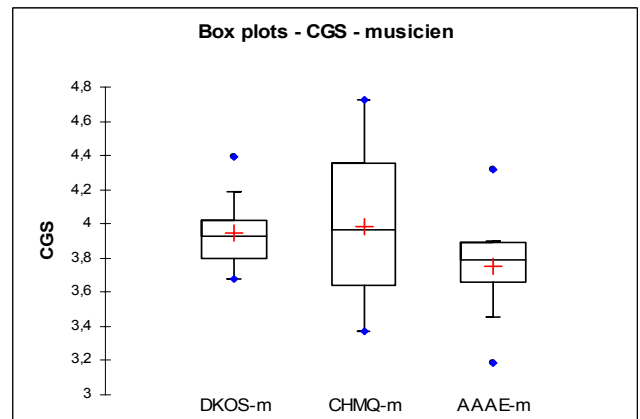


Figure 5 : distribution des CGS pour les sons « musicien »

Pour les deux familles, un test de différence des moyennes montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs moyennes du CGS pour tout couple

d'instrument : la variabilité apportée par le musicien, qu'il soit virtuel ou réel, est bien supérieure à la variabilité entre les instruments pour le CGS. En conclusion, le CGS n'est pas un critère discriminant pour caractériser le timbre des instruments.

Afin de savoir si une séparation des instruments est possible, nous avons utilisé l'analyse factorielle discriminante (AFD) pour trouver le plan factoriel qui sépare au mieux les trois classes DKOS, CHMQ et AAAE. Le principe de l'analyse factorielle discriminante est de trouver les combinaisons linéaires des variables initiales qui séparent au mieux les classes, selon un critère de rapport de variance. Avec trois classes, 2 axes discriminants sont ainsi définis. Les figures 6 et 7 représentent les deux axes discriminants pour les sons simulés, en considérant comme variables descriptives des sons les amplitudes a_i sur les 6 harmoniques. La fréquence de jeu a en effet été retirée volontairement des variables descriptives, car nous avons vu précédemment qu'elle permet aisément la discrimination. On aurait retrouvé en la conservant un premier axe lié à la fréquence, ce qui ne présente pas d'intérêt.

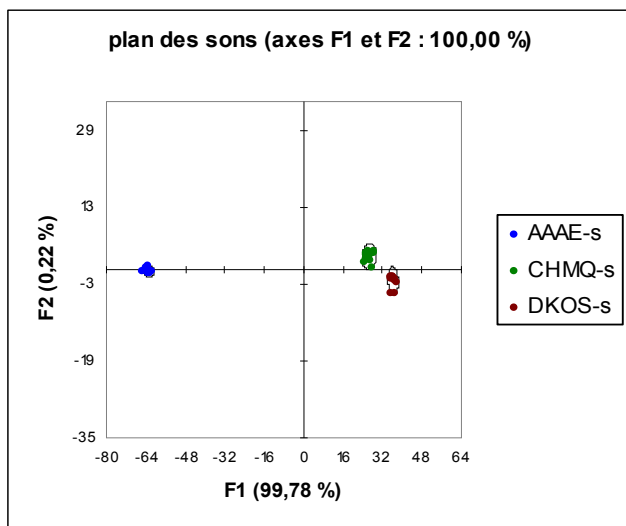


Figure 6 : plan factoriel de l'AFD (sons) - simulations

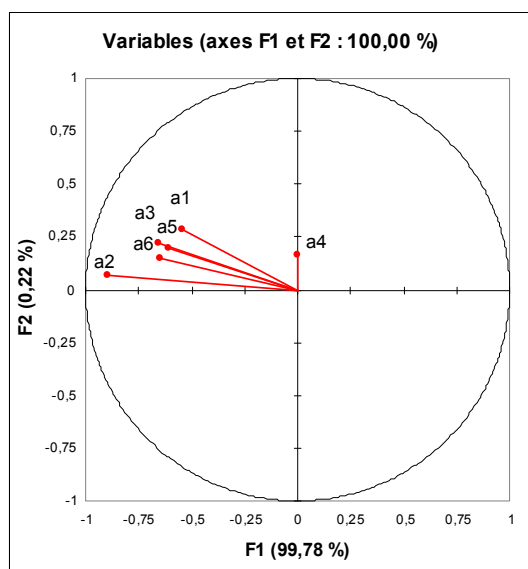


Figure 7 : plan factoriel de l'AFD (variables) - simulations

On constate que l'AFD sépare aisément les 3 classes de sons, le premier axe réalisant la quasi totalité de la séparation (99.78% d'inertie). Les résultats en validation croisée (procédure « leave one out ») des fonctions de classement sont excellents, atteignant 100% de bien classés. L'information importante à ce niveau est qu'il existe donc bien un trait caractéristique de chaque classe d'instrument, qui repose sur les 6 variables utilisées, c'est à dire les amplitudes a_i sur les 6 harmoniques. On constate que la trompette AAAE, très différente des autres selon l'impédance d'entrée, l'est également du point de vue des sons simulés. Les simulations rendent bien compte des différences de l'impédance.

L'AFD réalisée montre qu'il existe une séparation nette entre AAAE et les deux autres classes ; CHMQ et DKOS présentent un recouvrement partiel. Une validation croisée effectuée sur l'ensemble donne 83.33% de bien classés. Les figures 8 et 9 représentent les deux axes discriminants pour les sons musiciens, en ne considérant que les amplitudes am_i sur les 6 premières harmoniques comme variables descriptives de sons.

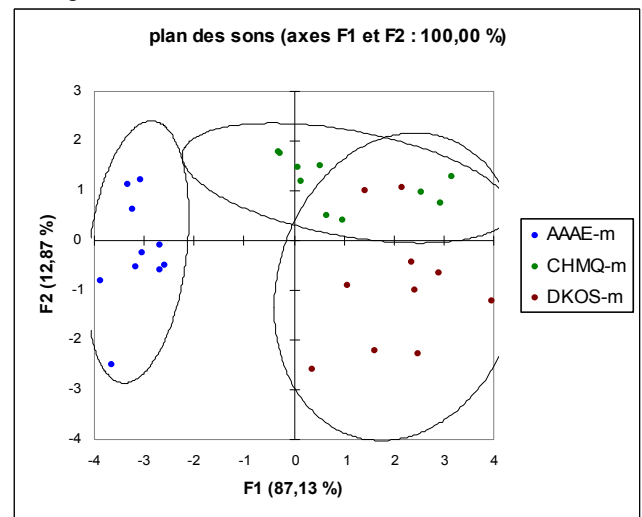


Figure 8 : plan factoriel de l'AFD (sons) - musicien

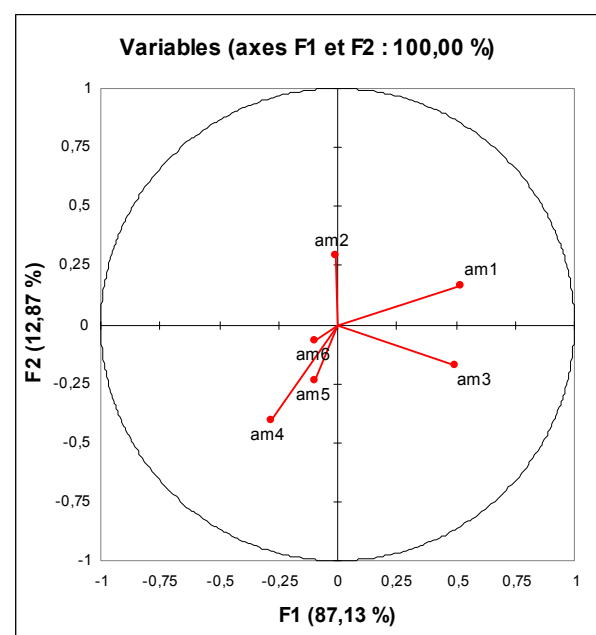


Figure 9 : plan factoriel de l'AFD (variables) - musicien

On constate que le rapport de variance intragroupe/intergroupes est beaucoup plus important pour les sons musicien que pour les simulations. En d'autres termes, l'effet du musicien est plus important pour les sons « musicien » que pour les sons simulés.

Enfin, la comparaison des plans discriminants pour les sons simulés et les sons musiciens montre qu'ils ne sont pas constitués de la même façon : la contribution des variables à la création du premier axe n'est pas la même pour les sons simulés et les sons « musicien ». Cependant, le faible nombre de sons « musicien » considérés ne permet peut-être pas de mettre en évidence les similarités dans une approche « fouille de données ». Il semble nécessaire de considérer un nombre plus important de sons pour établir une caractérisation plus robuste des branches d'embouchure.

En résumé, pour des sons à dynamique fixée, nous avons montré qu'il est possible de discriminer sans erreur des branches d'embouchure très différentes (sons simulés ou musicien), de même que des branches très proches dans le cas de sons simulés, mais pas des branches très proches dans le cas du musicien. Nous allons maintenant étudier si cette discrimination reste possible lorsque la dynamique change.

3.2 Séries à dynamique croissante

Dans ce paragraphe, nous considérons maintenant des sons à différentes dynamiques. Les sons « musiciens » sont ceux de la série 2 : c'est à dire les 20 répétitions de la même note, en augmentant progressivement au fil de la série la dynamique de la nuance *ppp* à *fff*. Une AFD sur les sons « musicien » conduit au résultat représenté figures 10 et 11.

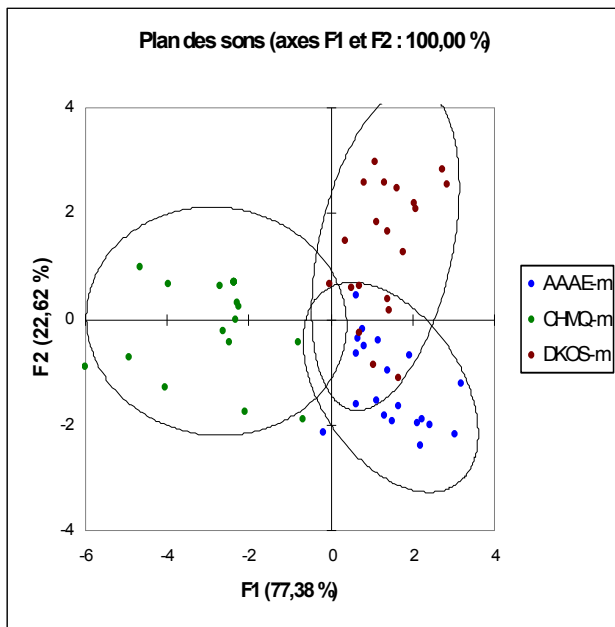


Figure 10 : plan factoriel de l'AFD (sons) – « musicien » – sons à dynamique croissante

On constate que l'AFD sépare assez bien les 3 classes de sons (91,6% de bien classé en validation croisée). Il subsiste donc un « trait » propre à l'instrument (une « voix ») dans la façon d'enrichir le timbre lorsque le musicien joue plus fort.

Pour les sons simulés, une AFD sur la totalité des sons simulés (905 sons – correspondant à toutes les valeurs de

P_m , de f_L et de v_L) conduit aux résultats représentés figures 12 et 13.

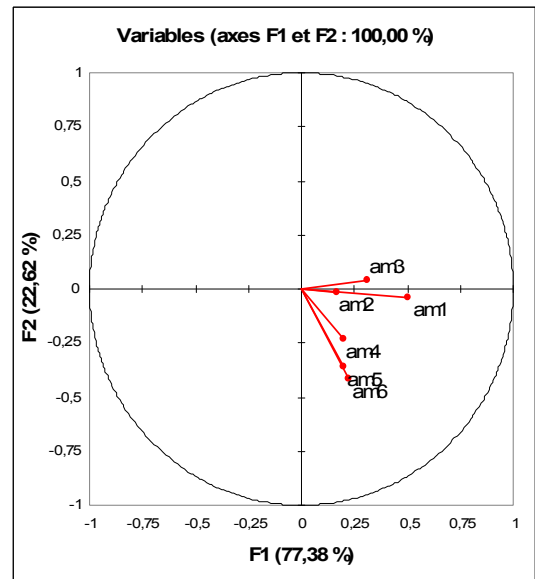


Figure 11 : plan factoriel de l'AFD (variables) – « musicien » – sons à dynamique croissante

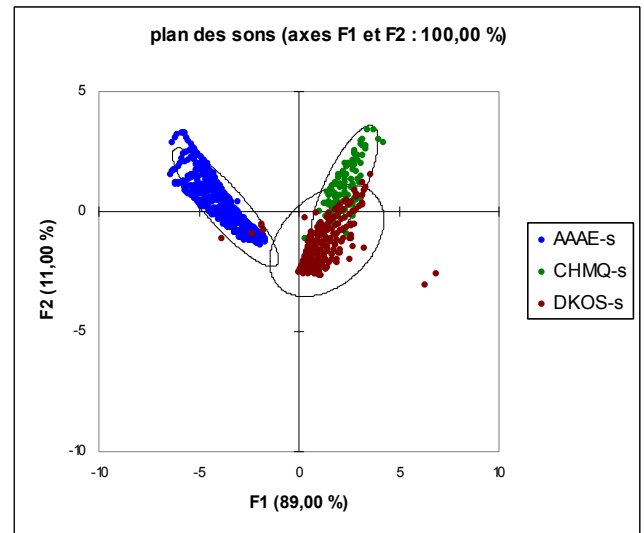


Figure 12 : plan factoriel de l'AFD (sons) – simulations

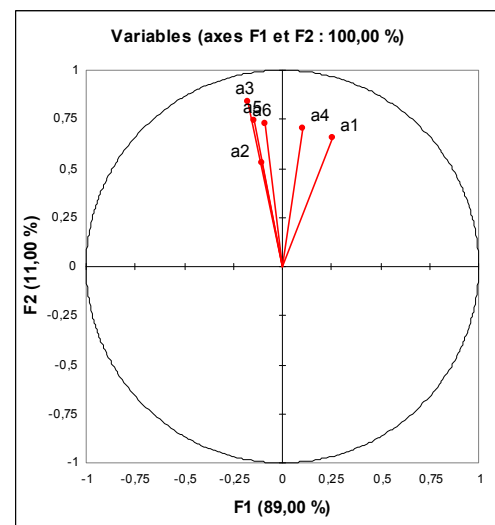


Figure 13 : plan factoriel de l'AFD (variables) – simulations

On constate que l'AFD sépare parfaitement la branche AAAE des deux autres et partiellement CHMQ de DKOS. Il est remarquable que l'on obtienne de ces résultats avec de telles variations du musicien virtuel : cela indique donc clairement que les simulations retranscrivent des traits typiques de chaque branche d'embouchure sur les amplitudes des harmoniques. On constate également un couplage entre l'axe discriminant 1 et l'axe 2, pour chaque catégorie de branche d'embouchure : le nuage de points n'est pas uniformément réparti, une orientation privilégiée est mise en évidence. Cette orientation semble caractéristique de l'évolution de l'enrichissement spectral lorsque l'on joue plus fort, et caractéristique de la branche d'embouchure.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons comparé les sons de trois trompettes différentes (dont deux d'impédances très proches), obtenues en changeant la géométrie de la branche d'embouchure. Les sons ont été générés soit par un musicien, soit par simulation par modèle physique dans le domaine fréquentiel par la technique de l'équilibrage harmonique. Pour des répétitions d'un même son à dynamique *forte* joués par le musicien, nous avons constaté un effet significatif d'une des branches d'embouchure sur la fréquence de jeu, alors que l'effet sur le centre de gravité spectral n'était pas significatif. Nous avons montré que les simulations se comportaient de façon similaire. Ce premier résultat crédite le réalisme du modèle physique utilisé. Nous avons ensuite montré, grâce à l'analyse factorielle discriminante, que les sons de chaque branche étaient séparables dans le cas de branches différentes, qu'elles soient jouées par un musicien ou simulées.

Pour des séries de sons à dynamique croissante, l'analyse factorielle discriminante a donné les mêmes conclusions. Ce second résultat conforte l'existence d'un trait caractéristique propre à chaque branche, constituant sa « signature ».

Il reste maintenant à étudier plus précisément les différences entre les sons, de manière à définir des critères discriminants les branches d'embouchure. Pour cela, l'analyse des formants des signaux stationnaires, ainsi que l'utilisation de moments d'ordre supérieur au CGS pour comparer les signaux pourraient être mis en œuvre.

Remerciements

Les auteurs remercient François Tavard, Sylvain Pascual, Damien Leguin et Gwenaél Toupin pour leur contribution à ce travail. Les mesures d'impédance ont été effectuées à l'Institut Européen des Métiers de la Musique (ITEMM, Le Mans).

Références

- [1] Pratt R.L., Bowsher J.M.. "The objective assessment of trombone quality". *Journal of Sound and Vibration* 65(4), 521-547 (1979).
- [2] Valimaki V., Pakarinen J., Erkurt C. and Karjalainen M.. Discrete-time modeling of musical instruments. *Rep. Prog. Phys.*, 69, 1-78 (2006).
- [3] Poirson E., Petiot J-F., Gilbert J. Integration of user-perceptions in the design process: application to

musical instrument optimisation. *Journal of Mechanical Design*, Vol.129, No.12, December 2007, pp1206-1214.

- [4] Petiot J-F., Poirson E., Gilbert J. « Study of the relations between trumpets' sounds characteristics and the input impedance ». *Proceedings of Forum Acusticum 2005*, August 29 - Sept. 2, 2005, Budapest, Hungary (2005).
- [5] Petiot J-F., Lucas M.F., Gilbert J. Could sound simulations by physical modelling contribute to brass instrument characterisation? *Proceedings of ISMA 2007, International Symposium on Musical Acoustics*, 10-12 September 2007, Barcelona, Spain.
- [6] BIAS5.1. Widholm G, Vienna Institut für Wiener Klangstil. <http://www.bias.at>.
- [7] Gilbert, J., Kergomard, J., Ngoya, E. "Calculation of the steady state oscillations of a clarinet using the harmonic balance technique." *J. Acoust. Soc. Am.* 86, 35-41 (1989).
- [8] Benade A. H. *Fundamentals of musical acoustics*, 2^{de} édition, 1990, Dover Publications.