



Entre Eole et d'Alembert, recherches sur les instruments à vent

Benoît Fabre

► To cite this version:

Benoît Fabre. Entre Eole et d'Alembert, recherches sur les instruments à vent. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. <hal-03444644>

HAL Id: hal-03444644

<https://hal.science/hal-03444644v1>

Submitted on 23 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Entre Eole et d'Alembert, recherches sur les instruments à vent

B. Fabre^a

a. LAM (Lutheries–Acoustique–Musique), UPMC Université Paris 06, UMR 7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, 75005 Paris, France; email: benoit.fabre@upmc.fr

Résumé :

L'oscillation acoustique dans les instruments à vent est produite par le couplage entre une instabilité d'origine hydrodynamique et une ou plusieurs résonances acoustiques ou mécaniques. Alors que la réponse acoustique des instruments à vent, étudiée dans le cadre de l'acoustique linéaire, est de mieux en mieux connue et modélisée, les phénomènes hydrodynamiques qui pilotent l'oscillation restent mal connus. Au mieux, ces derniers sont raisonnablement décrits, pour une plage restreinte de paramètres de contrôle, par des caricatures plus ou moins grossières d'écoulement. L'étude linéaire du résonateur apporte cependant des résultats utiles pour la facture instrumentale, essentiellement en termes de prédiction des fréquences de jeu, alors que la prédiction des amplitudes d'oscillation suppose une étude délicate des mécanismes non-linéaires qui conditionnent cette amplitude. Dans l'espoir de mieux comprendre certaines finesses de la facture instrumentale ou des techniques de jeu, les recherches futures devront apporter une meilleure connaissance des aspects hydrodynamiques et des couplages aéroacoustiques.

Abstract :

The oscillation in wind instruments results from the coupling between a hydrodynamic source and an acoustic resonance. Linear acoustics has been extensively used to analyse the acoustical response of the instruments. The hydrodynamical phenomena controlling the oscillation are not so deeply understood. Caricatures of the flow are often used, and may provide a convincing modeling for restricted ranges of control parameters. However, the linear analysis of the instruments proves to be useful for instrument making, mostly in terms of the variations in playing frequencies associated with bore geometry adjustments. The oscillating amplitudes are more difficult to predict since they are depending on the non-linear mechanisms. A better understanding of fine adjustments by makers and playing techniques will rely on a more accurate description of hydrodynamical aspects as well as aeroacoustic couplings.

Mots clefs : instrument de musique, écoulement, instabilité, acoustique non-linéaire, instruments à vent.

L'étude de la qualité des instruments de musique, y compris de leur jouabilité par un instrumentiste "souffleur", a fait l'objet de nombreux travaux dans les dernières décennies. Traditionnellement, l'analyse du fonctionnement des instruments repose sur la séparation entre excitateur et résonateur, couvrant d'un côté des aspects hydrodynamiques et aéroacoustiques et, de l'autre, des aspects d'acoustique linéaire. Les outils de l'acoustique linéaire permettent de prévoir la réponse acoustique du résonateur des instruments en fonction de sa géométrie, offrant un outil de prédiction des fréquences de jeu qui constitue une aide appréciable aux yeux des facteurs d'instruments [2, 3, 4].

Mécanismes d'excitation

Du point de vue hydrodynamique, les systèmes excitateurs se répartissent en deux catégories [5] : les instruments excités par des valves (anches simple, doubles, libres...) et ceux excités par un jet (flûtes et tuyaux d'orgue). L'oscillation dans les premiers repose sur une modulation de l'ouverture de la valve, qui se traduit par une modulation du débit d'air entrant dans le résonateur. Ceci constitue donc une source monopolaire, correspondant à la modulation du débit d'air. La modulation de l'ouverture, contrôlée par la conjonction des forces de pression hydrodynamiques et/ou acoustiques sur le système solide déformable reste difficile à modéliser, notamment dans le cas des anches constituées de tissus biologique telles les lèvres des instrumentistes de la famille des cuivres ou encore les plis vocaux des chanteurs. Les anches simples en roseau comme celles des clarinettes et saxophones, ou encore les anches libres des harmonicas et accordéons présentent un comportement vibratoire moins complexe à modéliser et constituent les systèmes excitateurs dont la modélisation est la plus avancée à l'heure actuelle [5, 2].

Les flûtes et tuyaux d'orgue oscillent sous l'effet de l'instabilité du jet d'air, qui se synchronise avec le champ acoustique en régime stationnaire d'oscillation. La production d'énergie acoustique par l'interaction de cet écoulement instationnaire avec le biseau de l'instrument reste difficile à bien modéliser, probablement en lien avec les différentes allures d'écoulement que l'on peut observer selon le nombre de Reynolds et le nombre de Strouhal du jet [2]. Notons cependant que, pour une gamme limitée de conditions de contrôle, les modèles actuels permettent de rendre compte raisonnablement des comportements observés en régime stationnaire sur une flûte à bec ou un tuyau d'orgue [1].

La prise en compte des non-linéarités est essentielle à la modélisation des instruments à vent, notamment parce qu'elles déterminent l'amplitude d'oscillation, mais aussi le contenu spectral du son produit. Si une partie de ces non-linéarités se trouve intrinsèquement dans le système excitateur, les niveaux acoustiques d'oscillation observés en jeu dans le résonateur des instruments à vent sont tels que d'autres non-linéarités apparaissent. Les non-linéarités en propagation se traduisent par le "cuivrage" du son des ... cuivres, alors que le matériau n'est en rien responsable de cet enrichissement spec-

tral spectaculaire [9]. Dans les bois (flûtes, clarinettes, saxophones, hautbois etc.), les non-linéarités sont induites par des vitesses acoustiques élevées aux abords des ouvertures de la perce sur l'extérieur (trous latéraux ou terminal, trou d'embouchure dans les flûtes). Ces non-linéarités sont donc localisées, ce qui permet d'interpréter certains "détails" de facture, tels que le sous-coupage des trous latéraux qui consiste à travailler la géométrie du raccordement entre trou latéral et perce principal, surtout dans les instruments présentant des trous de petits diamètres par rapport à la perce [2]. De toute évidence, ces aspects échappent totalement à l'analyse de l'acoustique linéaire.

Régimes d'oscillation et contrôle instrumental

Observer un débutant jouer d'un instrument à vent suffit à se convaincre qu'il n'est pas toujours évident de produire le régime d'oscillation désiré ! Canards et autres couacs nous rappellent que le bon ajustement des paramètres de contrôle est délicat. L'étude des différents régimes d'oscillation repose sur des outils de l'analyse des systèmes non-linéaires [1, 11], et permet de mettre en évidence l'influence de certains paramètres de facture instrumentale.... mais aussi les limites des modélisations actuelles des instruments. Ces travaux constituent cependant le lien nécessaire avec les travaux menés sur les paramètres de contrôle [7, 12], incluant notamment le couplage avec d'éventuelles résonances acoustiques du conduit vocal, qui offrent à l'instrumentiste un moyen expressif supplémentaire de contrôle du son, au service de son expression musicale [13, 10, 8].

Quels enjeux ?

Le développement d'instruments virtuels produisant un son au moyen de la résolution temporelle pas à pas des équations des modèles physiques atteste d'une compréhension raisonnable du fonctionnement des instruments à vent. Comprendre de manière plus fine ce qui fait la qualité des instruments, les influences des nombreux détails de la facture de ces instruments, et les contrôles experts des instrumentistes nécessite encore beaucoup de travail ! L'analyse détaillée des systèmes excitateurs représente probablement l'enjeu le plus important, mais reste délicat tant il mêle des aspects acoustiques, hydrodynamiques et aéroacoustiques. La simulation numérique, conjointement avec des expérimentations bien contrôlées, offre un outil intéressant pour affiner notre compréhension des mécanismes en jeu. De manière complémentaire, l'analyse du contrôle instrumental et du travail des facteurs d'instruments constitue une aide décisive pour cerner les points les plus importants à intégrer dans les recherches futures.

References

- [1] Auvray R., Fabre B., *Regime change and oscillation thresholds in recorder-like instruments* J. Acoust. Soc. Am. 131 (2), February 2012

- [2] Chaigne A, Kergomard J. *Acoustique des Instruments de Musique*. Paris: Belin. 2008.
- [3] Coltman J. , *Resonance and sounding frequencies of the flute*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 40, no. 1, pp. 99–107, 1966
- [4] Eveno P., Kieffer B., Gilbert J., Petiot JF., Caussé R., *How far can the resonance frequencies give informations about the playing frequencies? The trumpet example*. Acoustics 2012, Apr 2012, Nantes, France. 2012
- [5] Fabre B., Gilbert J., Hirschberg A., Pelorson X. *Aeroacoustics of musical instruments*. Annu. Rev. Fluid Mech. 2012. 44:1-25
- [6] Fabre B., Hirschberg A. 2000. *Physical modelling of flue instruments: a review of lumped models*. Acustica 86:599–610
- [7] Freour V., Scavone G., Acoustical interaction between vibrating lips, downstream air column, and upstream airways in trombone performance J. Acoust. Soc. Am. 332, Issue 15, 22 July 2013
- [8] Guillemain P., *Some roles of the vocal tract in clarinet breath attacks: Natural sounds analysis and model-based synthesis* J. Acoust. Soc. Am. 121, 2396 (2007)
- [9] Myers A., Pyle R., Gilbert J. Campbell M., Chick J., Logie S., *Effects of nonlinear sound propagation on the characteristic timbres of brass instruments*. J. Acoust. Soc. Am. 131 (1), January 2012.
- [10] Scavone G., Lefebvre A., da Silva A., *Measurement of vocal-tract influence during saxophone performance* J. Acoust. Soc. Am. 123, 2391 (2008)
- [11] Terrien S., Vergez C., Fabre B., Barton D.A.W. *Calculations of the steady-state oscillations of a flute model using the orthogonal collocation method*. Acustica / Acta Acustica, Vol. 100 (4) 690-704 [2014].
- [12] Vauthrin C., Fabre B., Cossette I., *How Does a Flute Player Adapt His Breathing and Playing to Musical Tasks?* Acta Acustica Vol. 101 (2015) 224 – 237
- [13] Wolfe J., Smith J., Tann J., Fletcher N.H. *Acoustic impedance spectra of classical and modern flutes*. Journal of Sound and Vibration Volume 243, Issue 1, 24 May 2001