

# La clarinette cuivre-t-elle ?

## Pertinence de la prise en compte des phénomènes de propagation non-linéaire pour la modélisation de la clarinette

Joël Gilbert, Lanig Libouban,  
Jean-Pierre Dalmont  
Laboratoire d'Acoustique de  
l'Université du Maine  
UMR CNRS 6613  
Avenue Olivier Messiaen  
72085 Le Mans CEDEX 9,  
E-mail : joel.gilbert@univ-lemans.fr

### Résumé

L'objectif de l'étude est d'étudier la pertinence ou non de la prise en compte des effets de propagation non-linéaire dans la modélisation physique de la clarinette. Si des effets spectaculaires liés à la propagation non-linéaire se manifestent lorsque les cuivres sont joués à fort niveau (cas des « sons cuivrés »), il n'en est rien, a priori, pour les instruments à anche. Néanmoins il n'est pas pour autant exclu que, dans certaines conditions, des effets significatifs puissent être observés. Dans un premier temps, des expériences ont été réalisées à l'aide d'une bouche artificielle et d'une clarinette simplifiée. Dans certains cas de figure, les effets de propagation non-linéaires sont suffisamment significatifs pour être pris en considération. Ces résultats ont cependant été obtenus pour des configurations peu réalistes. C'est pourquoi dans un second temps des mesures ont été effectuées sur une vraie clarinette jouée par un musicien. Si les niveaux sonores en entrée de tube n'atteignent pas ceux obtenus avec la bouche artificielle, des effets de propagation non-linéaires significatifs ont toutefois pu être observés.

**L**a physique des instruments de musique à vent repose en grande partie sur la modélisation du champ acoustique intérieur à l'instrument considéré comme guide d'onde [1]. L'hypothèse de la propagation acoustique guidée linéaire est justifiée dans la plupart des cas de figure rencontrés en situation de jeu musical. Un contre-exemple spectaculaire maintenant bien connu [2] est le cas des sons cuivrés obtenus par les trompettistes et autres trombonistes jouant à une nuance *fortissimo*. Ces sons, si caractéristiques, ne peuvent être obtenus avec des instruments à anche. Une étude préliminaire [3] n'a pas montré d'effets non-linéaires significatifs. Néanmoins un nombre relativement réduit de situations avait été investigué dans cette étude. L'objectif du présent travail est d'apporter de nouveaux éléments de réponse à cette question en explorant de nouvelles configurations.

Les premières expériences reposent sur l'utilisation d'une bouche artificielle et d'une clarinette simplifiée jouée à des nuances anormalement élevées (chapitre 2). Après avoir mis en évidence des effets de propagation non-linéaire, les résultats expérimentaux sont discutés plus en détail par comparaison avec les résultats de simulation au chapitre 3. Par ailleurs quelques sons joués par un clarinettiste sont également analysés, et des effets de propagation mis en évidence.

### Résultats expérimentaux préliminaires

#### Dispositif expérimental

Une clarinette simplifiée, les corps du haut et du bas étant remplacés par un tube parfaitement cylindrique, est jouée par une bouche artificielle (voir figure 1) ou par un clarinettiste, l'ensemble étant installé en chambre sourde. La surpression statique  $P_{\text{bouche}}$  dans la bouche est mesurée via un capteur piézo-électrique. La pression acoustique est mesurée en différents points à l'intérieur de l'instrument, et à l'extérieur. Nous ne retiendrons ici que la pression acoustique  $P_{\text{bec}}$  mesurée dans le bec à l'aide d'un microphone

de type piézo-résistif de faible sensibilité ( $12 \cdot 10^{-5}$  V/Pa), et la pression acoustique rayonnée  $P_{\text{ray}}$  mesurée dans l'axe de l'instrument à une distance d'un mètre du pavillon, avec un microphone de mesure capacitif.

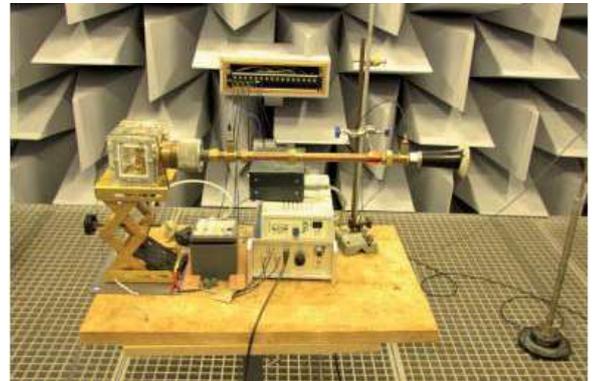


Fig. 1 : Photographie du dispositif expérimental en chambre sourde

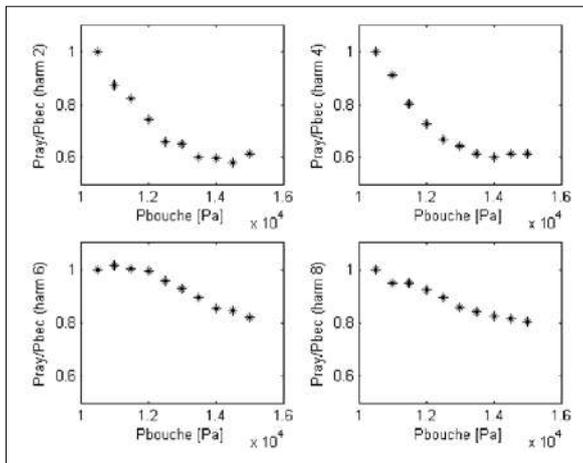
L'instrument est joué à très fort niveau sonore, et seul des régimes permanents périodiques sont étudiés. L'analyse des signaux est faite dans le domaine fréquentiel, où les amplitudes complexes des harmoniques sont estimées par détection synchrone.

#### Fonctions de transfert et comportement non-linéaire

Une façon classique d'appréhender le comportement linéaire (ou non) d'un système physique est d'observer la constance (ou non) de fonctions de transfert lorsque la source est d'amplitude variable [4].

Une première série de 10 mesures est discutée ci-après. Elle correspond à l'instrument joué « embouchure relâchée » sur son premier régime (lèvre inférieure appuyée sans pression sur l'anche ; 143 Hz) avec une pression d'alimentation variant de 105 à 150 hPa par pas de 5 hPa.

Les fonctions de transfert en amplitude de la pression rayonnée  $P_{ray}$  sur la pression dans le bec  $P_{bec}$  ont été évaluées. Ces fonctions de transfert ne sont pas indépendantes de la pression dans la bouche, et cela est particulièrement significatif sur les fonctions de transfert associées aux premiers harmoniques pairs (voir figure 2). Ainsi une variation de l'ordre de 20 à 40 % est observée. La très faible variation (0,3 %) de la fréquence de jeu sur la plage de pression d'alimentation étudiée permet d'expliquer partiellement (typiquement de l'ordre de 10 %) mais pas totalement la variation observée sur les fonctions de transfert. Nous en déduisons qu'il faut plutôt voir là la conséquence du phénomène de propagation non-linéaire.



**Fig. 2 : Fonctions de transfert  $P_{ray}/P_{bec}$  en fonction de la pression dans la bouche  $P_{bouche}$  en Pa.**  
 Résultats pour les harmoniques pairs 2, 4, 6 et 8 (de gauche à droite et de bas en haut sur la figure). Les fonctions de transfert sont normalisées par leur valeur au premier échantillon ( $P_{bouche} = 10500$  Pa)

### Pertinence de la prise en compte de la propagation non-linéaire

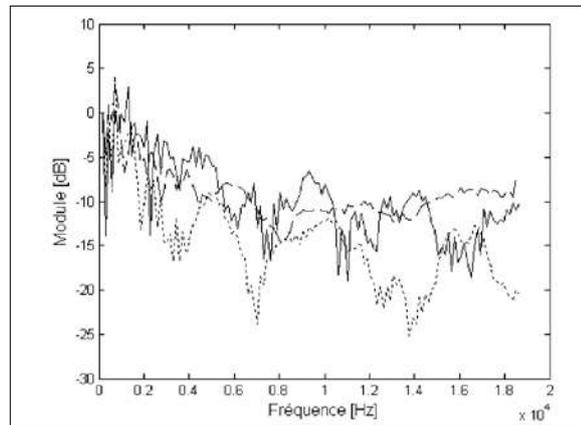
#### Principe de l'analyse

À partir d'un outil de simulation basé sur une approche spectrale, il est possible d'estimer la contribution relative du phénomène de propagation non-linéaire dans le son rayonné (voir les références [5, 6] pour le principe détaillé de la méthode s'appuyant sur des équations de Burgers généralisées). Il suffit pour cela d'effectuer deux fois la simulation, avec et sans prise en compte des termes de propagation non-linéaire, puis de comparer les résultats  $P_{NL}$  et  $P_{LIN}$  à la pression rayonnée mesurée  $P_{ray}$ . Si les résultats des deux simulations sont identiques, alors on pourra conclure qu'il n'y a pas d'effet de propagation non-linéaire. Dans le cas contraire, la propagation non-linéaire opère de façon significative à l'intérieur du guide d'onde, et cet effet devra être pris en compte dans une modélisation réaliste du champ sonore rayonné par l'instrument.

#### Clarinette et bouche artificielle

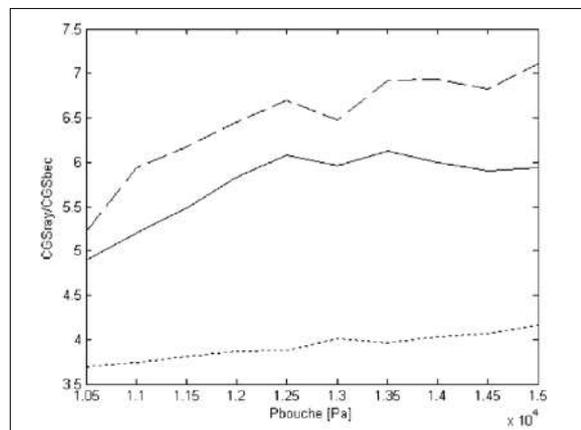
Le cas de figure présenté ci-après concerne une des situations présentées page précédente. Il s'agit de la situation correspondant au niveau sonore le plus élevé de la série, note correspondant à la pression d'alimentation de 150 hPa. Rappelons que l'instrument est joué «embouchure relâchée» sur son premier régime (143 Hz).

Les résultats des simulations linéaire  $P_{LIN}$  et non-linéaire  $P_{NL}$  correspondant à ce cas de figure sont comparés à la pression rayonnée mesurée (voir figure 3). Si on observe les enveloppes spectrales, un écart significatif apparaît entre les deux simulations. L'écart est déjà observable à basses fréquences lorsque l'approximation ondes planes est encore valide. Ceci confirme l'hypothèse évoquée en fin de section précédente : les effets de la propagation non-linéaire ne peuvent être négligés ici.



**Fig. 3 : Enveloppe spectrale de la pression rayonnée en fonction de la fréquence en Hz (bouche artificielle).**  
 Les trois cas de figure : (---), pression rayonnée estimée par simulation linéaire  $P_{LIN}$ , (....) pression rayonnée estimée par simulation non-linéaire  $P_{NL}$ , (—) pression rayonnée mesurée  $P_{ray}$ .

Les spectres mesuré et simulé sous l'hypothèse de propagation non-linéaire, exhibent des différences non négligeables. Ceci illustre les limites du modèle physique simplifié, voire simpliste, en arrière-plan des simulations [5, 6]. Néanmoins ces différences sont plus faibles que les différences entre les deux spectres simulés. Cette affirmation est confirmée si nous observons les centres de gravité spectraux, CGS, correspondants (voir figure 4) : la simulation du CGS avec prise en compte de la propagation non-linéaire illustre assez bien l'évolution, en fonction de  $P_{bouche}$ , du CGS associé à la pression rayonnée  $P_{ray}$  mesurée. La simulation linéaire n'offre pas une telle adéquation avec la mesure.



**Fig. 4 : Rapport des CGS de la pression rayonnée et de la pression mesurée dans le bec ( $P_{bec}$ ), en fonction de la surpression dans la bouche ( $P_{bouche}$ ).**  
 Les trois cas de figure : (---), pression rayonnée estimée par simulation linéaire  $P_{LIN}$ , (....) pression rayonnée estimée par simulation non-linéaire  $P_{NL}$ , (—) pression rayonnée mesurée  $P_{ray}$ .

## Clarinete et clarinettiste

Les résultats présentés ci-dessus correspondent à des situations expérimentales de laboratoire pouvant apparaître comme assez éloignées de la réalité musicale (clarinette simplifiée jouée par une bouche artificielle avec des pressions d'alimentation très élevées, et une embouchure très relâchée). Il est en effet difficile d'imaginer un musicien produisant une surpression dans sa bouche de 150 hPa ! La question de savoir si des effets significatifs peuvent être observés en situation de jeu réel reste donc posée.

Pour ces mesures, le musicien a pour consigne de jouer *fortissimo* en observant l'écran d'un oscilloscope affichant le signal de pression rayonnée. Il lui est demandé d'optimiser son « embouchure » afin de s'approcher, dans la mesure du possible, d'une allure en peigne de Dirac. Après plusieurs essais, le musicien se concentre sur des notes correspondant au second régime de l'instrument, et plus particulièrement au « doigté du Si » (tous les trous latéraux sont bouchés) correspondant à une fréquence de jeu de 444 Hz.

Nous choisissons de nous concentrer sur un des enregistrements effectués propice à la mise en évidence d'effets de propagation non-linéaire. Suivant la méthode d'analyse décrite au chapitre précédent, le spectre de la pression rayonnée mesurée est comparé aux résultats des simulations linéaire et non-linéaire (voir figure 5). Si on observe les enveloppes spectrales, un écart significatif apparaît entre les deux simulations : comparé au modèle linéaire, le modèle non-linéaire fait apparaître une augmentation globale sur toute la bande fréquentielle considérée. Ici aussi, les effets de la propagation non-linéaire sont donc significatifs.

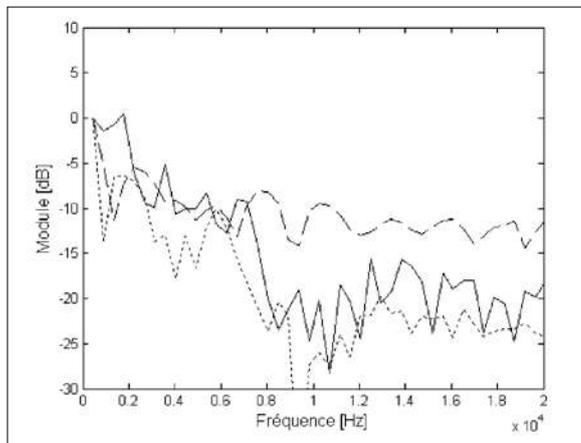


Fig. 5 : Enveloppe spectrale de la pression rayonnée en fonction de la fréquence en Hz (clarinettiste).

Les trois cas de figure : (---), pression rayonnée estimée par simulation linéaire  $P_{LIN}$ , (—) pression rayonnée estimée par simulation non-linéaire  $P_{NL}$ , (—) pression rayonnée mesurée  $P_{ray}$ .

Quelle est la nature de l'optimisation de l'embouchure du musicien ? L'enrichissement spectral en harmoniques de rang élevé est contrôlé par la valeur maximum de la pente du signal d'entrée, ceci est à relier avec la définition de la distance de formation de choc (distance inversement proportionnelle à la pente maximum en question). Pour un niveau sonore donné, le musicien peut ainsi chercher une « embouchure » qui maximise la pente et peut ainsi déclencher des effets de propagation non-linéaire à l'intérieur du guide d'onde. Ceci est possible si la distance de formation

de choc correspondante est ramenée à une valeur de l'ordre de grandeur de la longueur du guide d'onde. Cette stratégie est également utilisée par les joueurs de cuivres [7].

## Conclusion

Des effets de propagation non-linéaire ont été observés dans la clarinette en situation de jeu, ceci dans deux cas de figure :

- « clarinette simplifiée » jouée avec une bouche artificielle à très fort niveau sonore (premier régime, 143 Hz) dans des conditions qui peuvent être qualifiées d'irréalistes ;
- clarinette jouée à fort niveau sonore par un clarinettiste optimisant son embouchure en vue d'obtenir les effets non-linéaires recherchés (second régime, 444 Hz).

Les effets ne sont pas aussi spectaculaires et aussi présents que dans le cas des cuivres, et n'apparaissent que dans des cas « extrêmes ». Néanmoins il est remarquable que le musicien soit capable d'optimiser son embouchure afin de « déclencher » de tels effets et qu'il puisse ainsi enrichir la palette sonore de son instrument dans le jeu *fortissimo*.

Par ailleurs, il est légitime de s'interroger sur l'existence de tels effets sur les autres instruments à anche, comme les saxophones par exemple. Remarquons d'ores et déjà que leur perce conique n'est pas favorable à ce type d'effets.

## Remerciements

Les auteurs remercient vivement Stéphane Dufleit, clarinettiste, et Emmanuel Brasseur pour son aide dans la partie expérimentale. Les travaux présentés dans cette communication ont été réalisés dans le cadre du projet PAFI soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche.

## Références bibliographiques

- [1] Chaigne A., Kergomard J., *Acoustique des instruments de musique*. Paris : Éditions Belin, collection Echelles, ISBN 978-2-7011-3970-8 (2008).
- [2] Hirschberg A., Gilbert J., Msallam R., Wijnands A. P. J. , "Shock waves in trombones", *J. Acoust. Soc. Am.* **99**, 1754–1758 (1996).
- [3] Gilbert J., Dalmont J. P., and Guimezanes T. "Nonlinear propagation in woodwinds," *Proceedings of the Forum Acusticum, Budapest* (2005).
- [4] Beauchamp J., "Analysis of simultaneous mouthpiece and output waveforms", *Audio Engineering Society preprint No. 1626* (1980).
- [5] Menguy L., Gilbert J., "Weakly non-linear gas oscillations in air-filled tubes; solutions and experiments," *Acta Acust.* **86**, 798–810 (2000).
- [6] Gilbert J., Menguy L., Campbell D. M., "A simulation tool for brassiness studies", *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 1854–1857 (2008).
- [7] Norman L., Chick J.P., Campbell D.M., Myers A., Gilbert J., "Player control of 'brassiness' at intermediate dynamic levels in brass instruments," *Acta Acust. A* paraître.