

Schémas numériques non-linéaires dans les instruments à vent

Mots-clé : acoustique, musique, EDP non-linéaires, éléments finis, schémas numériques préservant l'énergie

Contact : alexis.thibault@inria.fr, juliette.chabassier@inria.fr

Motivation

L'acoustique musicale est un domaine d'étude qui s'intéresse à la modélisation et à la mesure des instruments de musique et de la voix. Ses applications sont variées : aide à la facture instrumentale, pédagogie de la musique, préservation du patrimoine, hybridation d'instruments acoustiques-numériques, ou création artistique, entre autres.

La fabrication d'instruments de musique permettant de jouer juste et avec facilité est traditionnellement un processus itératif qui consiste en la fabrication de prototypes successifs, nécessitant beaucoup de temps et de ressources. La modélisation des phénomènes en jeu, associée à la grande puissance de calcul aujourd'hui disponible rend possible d'étudier numériquement le comportement acoustique d'un instrument avant de le fabriquer, ouvrant de vastes possibilités de prototypage virtuel.

Modèles d'instruments

L'équipe Inria MAKUTU développe la librairie Python `openwind` (`openwind.inria.fr`) qui vise à mettre à disposition des facteurs d'instruments et des chercheurs les modèles de l'état de l'art en acoustique des instruments à vent. Cette librairie permet la simulation d'instruments de forme complexe, soit en régime établi (sinusoïdal), soit par intégration en temps. Les instruments sont construits de manière modulaire, en reliant entre eux les modèles de propagation acoustique, de trous latéraux, de rayonnement et d'embouchure issus de la littérature. Une attention particulière est portée aux méthodes numériques utilisées, afin d'assurer que l'erreur due à la discrétisation en espace et/ou en temps soit minimale. La discrétisation en espace est effectuée à l'aide d'éléments finis d'ordre élevé. Les schémas numériques utilisés vérifient exactement un bilan d'énergie numérique, permettant le couplage entre sous-systèmes tout en assurant la stabilité de la simulation.

Une caractéristique bien comprise des instruments à vent est la réponse linéaire d'un tuyau à une excitation sinusoïdale : une part importante de la littérature d'acoustique musicale porte sur la modélisation et la mesure de l'impédance d'entrée de tuyaux, et sur le lien entre cette quantité et le son émis.

De nombreuses non-linéarités sont cependant présentes dans les systèmes réels, à commencer par l'élément excitateur situé au niveau de l'embouchure de l'instrumentiste. Qu'il s'agisse d'une anche simple (clarinette, saxophone) ou double (hautbois, basson), d'une paire de lèvres (cuivres), ou d'un jet hydrodynamique (flûtes), le couplage de cet élément avec le résonateur de l'instrument donne lieu à des comportements complexes. Pour des paramètres bien choisis, le point d'équilibre statique devient instable, et on observe l'apparition d'oscillations d'amplitude finie : un son est produit, qui peut être plus ou moins musical.

La propagation des ondes acoustiques devient elle aussi non-linéaire à fortes amplitudes. La vitesse du son est plus élevée dans les régions de forte pression que dans les régions de faible pression, ce qui modifie la forme des ondes. Dans les cas extrêmes, ce phénomène peut même conduire à l'apparition d'ondes de choc (cela s'observe par exemple le cas de trombones joués *fortissimo* qui "cuivrent" alors). D'autres non-linéarités peuvent apparaître, comme par exemple des phénomènes de dissipation non-linéaire à la sortie des trous latéraux.

Du point de vue mathématique et numérique, la modélisation et la simulation de ces non-linéarités pose des difficultés théoriques et pratiques. L'existence de solutions devient plus difficile à assurer, et leur régularité est généralement dégradée. Un travail est nécessaire pour adapter les schémas numériques, qui deviennent plus lourds et peuvent perdre certaines bonnes propriétés. Cependant des travaux récents suggèrent que l'utilisation de schémas de type "Scalar Auxiliary Variable" (SAV) pourrait résoudre certains de ces problèmes. Pour l'instant la plupart des modèles implémentés dans OpenWIND sont linéaires, et ce sont les seuls utilisables dans les calculs en régime sinusoïdal.

Enfin, le formalisme des systèmes Hamiltoniens à ports d'interaction permet de systématiser l'étude du comportement énergétique de systèmes complexes tels que les instruments à vent. Ces méthodes sont fréquemment appliquées à la modélisation et à la simulation de systèmes multi-physiques, et sont particulièrement adaptées lorsqu'on s'intéresse à la préservation d'un bilan d'énergie. Il pourrait donc être utile de s'en servir pour éclairer les modèles utilisés.

Sujet de stage

Une première étape consistera à se familiariser avec les équations utilisées en acoustique musicale, et avec les schémas préservant l'énergie mis en œuvre en Python3 dans OpenWIND pour les résoudre.

La modélisation de l'acoustique non-linéaire sera ensuite considérée. Le but sera d'implémenter un schéma numérique préservant l'énergie, et pouvant être couplé aux autres parties de l'instrument. Cela pourra passer par sa formulation sous forme de système Hamiltonien à ports, et par l'étude de schémas de quadratisation du Hamiltonien tels que SAV. Les résultats seront ajoutés à OpenWIND, permettant la synthèse sonore d'instruments qui "cuivent".

On pourra éventuellement s'intéresser à d'autres phénomènes non-linéaires, tels que ceux présents aux trous latéraux ou au niveau de l'embouchure.

Profil recherché

- Étudiant.e en master 2 (université ou école d'ingénieur.e.s)
- Bonnes connaissances en analyse numérique, calcul scientifique, modélisation, acoustique, psycho-acoustique, acoustique musicale, programmation python.

Les candidatures seront examinées jusqu'au 31 janvier 2022.