

même à la signature sonore naturelle d'un instrument. C'est le cas du «cuivrage» pour les trombones et trompettes: la brillance (renforcement des hautes fréquences par rapport aux basses) provient de telles distorsions.

Maintenant, rêvez un peu et supposez que, grâce à la modélisation physique et aux techniques mathématiques, votre trompette au profil optimisé ou votre stradivarius virtuels sont là. À vous de jouer? Pas si simple...

En effet, le modèle physique ne fait que reproduire virtuellement la production du son lorsque les lèvres vibrent au passage de l'air

soufflé dans la trompette ou lorsque la corde oscille sous l'action du frottement de l'archet. C'est déjà beaucoup, mais pas suffisant pour en faire un instrument virtuel!

Pour transformer un programme informatique qui simule la physique de la production du son en instrument de musique, il faut lui adjoindre une interface homme-machine adaptée. Par ce biais, l'utilisateur peut modifier les valeurs de certains paramètres des équations du modèle physique (souffler plus fort, tendre ses lèvres, modifier la vitesse de l'archet ou son appui sur la corde...). C'est le

## UN ESCARGOT POUR S'ACCORDER

**U**ne vibration sonore se compose d'oscillations

d'amplitudes et de fréquences différentes, dont l'ensemble forme le «spectre du son». Les analyseurs de spectres sonores standards affichent des courbes d'amplitude, correspondant au volume du son, en fonction de la fréquence.

L'application «The Snail – IrcamLab» repose sur la combinaison de deux éléments: un nouveau procédé d'analyse du spectre du son, et une représentation de ce spectre sous une forme en spirale (d'où le nom *snail*, c'est-à-dire escargot) adaptée à une échelle musicale.

Le procédé apporte une précision fréquentielle assez fine pour travailler sur l'accordage ou le microaccordage. La représentation cartographique les composantes du son sous une forme assez intuitive. L'axe des fréquences, enroulé en spirale, va des graves (au centre) vers l'aigu (à l'extérieur), de sorte qu'un tour correspond à une octave (soit le doublement d'une fréquence). Ainsi,

toutes les composantes fréquentielles en relation d'octave (c'est-à-dire partageant le même nom de note) sont alignées sur un rayon de l'escargot et partagent le même angle.

Graphiquement, les composantes actives du spectre sont reportées sur ce squelette en spirale de sorte qu'un stimulus auditif se traduit par un stimulus visuel en cohérence avec l'échelle perceptive.

Si l'on repère sur la spirale l'angle associé à une fréquence de référence (un *la* à 440 hertz par exemple) et que l'on divise un tour complet en douze angles égaux, on conçoit une grille correspondant à la gamme tempérée, où les douze notes sont séparées par un demi-ton (voir la figure).

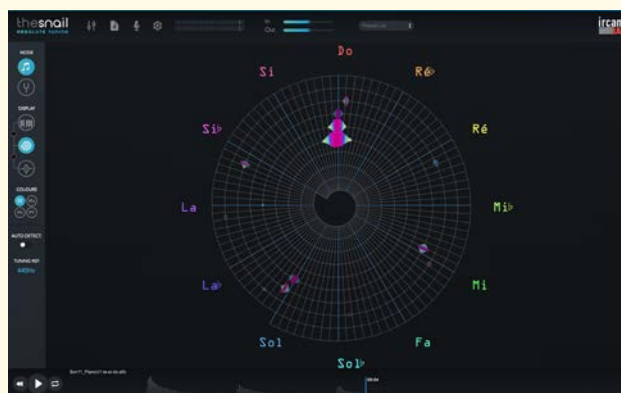
D'autres choix de marquage permettent d'exploiter d'autres dièses et d'autres tempéraments. La figure montre l'analyse par Snail du *do* central (noté *do* 3) d'un piano droit (le point en cyan indique le diapason, ici, 440 Hz). On constate qu'une note est composée de plusieurs vibrations simultanées. La composante la plus forte est

la fondamentale (le *do* 3 correspond à la tache la plus étendue, en rose). Puis après un tour de spire (dans le sens des aiguilles d'une montre, vers l'extérieur), vient l'harmonique 2 (le *do* 4), puis 3 (*sol* 4), puis 4 (*do* 5), puis 5 (*mi* 5, décalé par rapport à la ligne), puis 6 (*sol* 5, non aligné avec le *sol* 4), puis 7 (*si* bémol 5), puis 8 (*do* 6), puis 9 (*ré* 6, plus haut)... Le défaut d'alignement entre les composantes des notes (*do*, *mi*, *sol*...) exprime précisément l'inharmonicité: on ne parle plus dans ce cas d'harmonique, mais de partiel. La déviation des

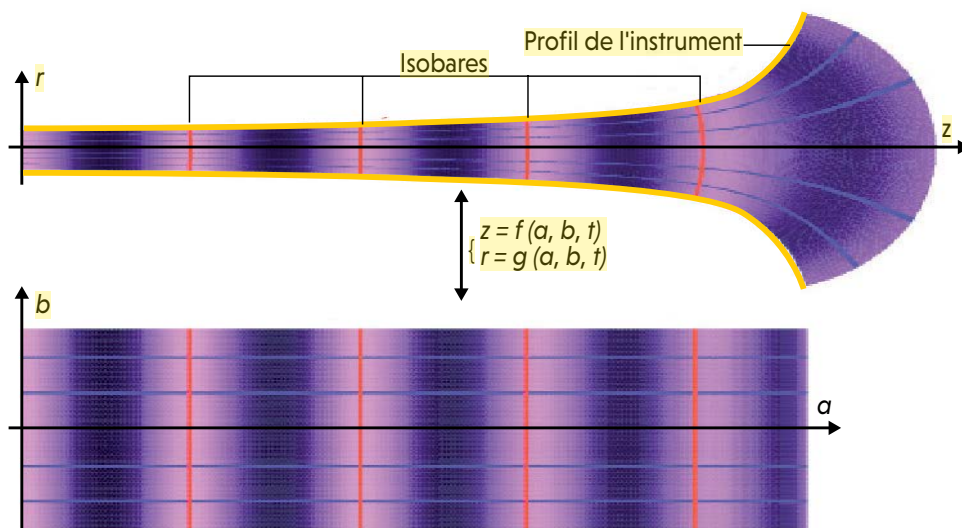
composantes par rapport aux traits de repère (ici, tracés pour le tempérament égal) exprime les déviations aux références de ce tempérament.

L'ensemble offre en fin de compte un outil précis pour le musicien ou une personne travaillant dans le son. De plus, cet outil est utilisable dès le plus jeune âge, par exemple, pour affiner le contrôle de la hauteur de la voix avec des consignes simples telles que «chanter en essayant d'aligner ses propres points lumineux sur une note de la grille».

**THOMAS HÉLIE ET  
CHARLES PICASSO**  
Laboratoire STMS  
(Ircam-CNRS-SU)



L'analyse par Snail du *do* central (*do* 3) d'un piano droit (le point en cyan indique le diapason, ici, 440 Hz).



Les ondes acoustiques qui se propagent dans un tube symétrique autour de son axe Oz représentent un problème à deux dimensions, où les coordonnées pertinentes sont  $z$  et  $r$  (distance à l'axe). Les isobares sont ici des courbes. En effectuant un changement de coordonnées dynamique de  $(z, r)$  en  $(a, b)$ , à l'aide de fonctions appropriées  $f$  et  $g$  qui dépendent du temps et du profil du tube, on peut redresser les isobares. Autrement dit, les isobares deviennent des droites perpendiculaires à l'axe de la coordonnée  $a$ , ce qui signifie que la pression est indépendante de la coordonnée  $b$ . La dimension du problème se réduit à un, ce qui simplifie les calculs.

- > point clé qui permet au musicien d'interagir avec le modèle physique et d'en jouer comme un instrument virtuel.

Quelle forme peut prendre l'interface homme-machine? Il en existe une multitude, allant des plus simples aux plus élaborées. Les claviers de commande (qui ressemblent à un clavier de piano) sont parmi les plus anciennes et les plus répandues, mais certainement pas les plus adaptées pour transmettre des gestes comme l'évolution d'une pression dans la bouche ou le frottement d'un archet.

Pour les instruments à vent, une alternative a été proposée avec des contrôleurs de souffle, dispositifs qui peuvent évoquer visuellement un instrument à vent mais qui ne produisent pas de son. En revanche des paramètres sont mesurés (par exemple la pression d'air avec laquelle on souffle, le doigté choisi) et envoyés au modèle physique. Ces dernières années, avec l'avènement des smartphones et tablettes, l'écran est également devenu une interface homme-machine pour le pilotage des modèles physiques.

Par exemple, votre doigt frottant l'écran peut devenir un archet qui joue du violon virtuel: la corde que vous frottez à l'écran, la vitesse de déplacement du doigt et son écrasement sont autant d'informations transmises en temps réel au modèle physique simulé sur le téléphone ou la tablette, qui peut alors atteindre le statut d'instrument virtuel complet.

Depuis les premiers synthétiseurs, les pianistes ont eu la chance de pouvoir tirer parti de leur maîtrise du jeu sur clavier. Des pianos hybrides ont même été conçus où, au mode de jeu traditionnel – les marteaux, actionnés par les touches du clavier, frappent des

cordes – s'ajoute un mode hybride, où les marteaux frappent des capteurs qui envoient à un synthétiseur les caractéristiques de la frappe (instant et vitesse du choc). Ainsi, plus de problèmes de voisinage, le jeu au piano peut se faire en silence, un casque sur les oreilles!

## DES CLARINETTES HYBRIDES ?

Pour les instruments à anche comme la clarinette et le saxophone, le projet de recherche INVENTHEA (un partenariat CEA List, le Laboratoire de mécanique et d'acoustique du CNRS et le fabricant Buffet Crampon) cherche aujourd'hui à proposer des instruments hybrides à anche.

Dans le même esprit que pour le piano, l'idée est de pouvoir rendre facilement l'instrument muet, tout en mesurant de manière non intrusive ce que fait l'instrumentiste (souffle, doigté, pincement de l'anche) pour envoyer ces informations à un modèle physique qui assurera la production du son. Les calculs du son pourront être faits par le téléphone dans la poche du musicien. Le son sera alors, selon les envies et le contexte, amplifié ou écouté au casque. Et ce n'est plus de la science-fiction d'imaginer que, demain, un saxophoniste pilotera depuis son saxophone un modèle physique de clarinette, de trompette, ou de violon!

Les progrès permettent aujourd'hui de proposer certaines optimisations aux facteurs d'instruments. Quant aux instrumentistes et aux chanteurs, des nouveaux outils (voir l'encadré page précédente) leur offrent à présent des moyens de visualiser en temps réel le son produit, et qui sont adaptés par exemple au travail de l'écoute, la justesse, l'intonation en solo ou en groupe. ■

## BIBLIOGRAPHIE

T. HÉLIE ET A. AGULLO, *Le Snail-Absolute Tuning: visualiser les sons et accorder des instruments de manière précise et intuitive*, Presse CNRS, 2016. <http://bit.ly/2l3IbB8>

A. CHAIGNE ET J. KERGOMARD, *Acoustique des instruments de musique*, 2<sup>e</sup> édition, Belin, 2013.

Le projet INVENTHEA, 2015. <http://bit.ly/2l2oone>

E. RECK MIRANDA ET M. WANDERLEY, *New Digital Musical Instruments: Control And Interaction Beyond the Keyboard*, A-R Editions, 2006.