

➤ même valeur de la pression constituent des courbes, nommées isobares comme sur une carte météorologique (voir la figure page 70).

Les isobares dessinent en général des lignes courbes, ce qui traduit le fait que la pression dépend à la fois de la coordonnée radiale r et de la coordonnée axiale z . L'idée de notre modélisation unidimensionnelle revient en quelque sorte à construire un miroir déformant qui redresse les isobares, pour les transformer en lignes droites perpendiculaires à l'axe. Dans cette nouvelle image, la pression devient indépendante de la coordonnée radiale, ce qui réduit la dimension effective du problème à un et simplifie beaucoup les calculs.

L'outil mathématique qui effectue cette transformation est un changement de coordonnées dynamique: on passe des coordonnées z et r à deux autres coordonnées a et b grâce à des fonctions appropriées f et g , qui dépendent du temps t (et de la perce de l'instrument). On réécrit ensuite l'équation des ondes en termes de coordonnées a et b , de façon que la pression y apparaisse comme une fonction de la nouvelle coordonnée a uniquement, et non de b .

La géométrie du résonateur n'est pas le seul aspect à prendre en compte dans la synthèse sonore. Un autre est l'amortissement. Si l'archet ou le souffle du musicien s'arrête, le son finit par s'éteindre: un instrument de musique est un système amorti, où l'énergie perdue par l'instrument est essentiellement le son émis lui-même. Or les émissions acoustiques des tubes, barres, plaques sont connues, et on sait les prendre en compte avec une bonne approximation dans les simulations du fonctionnement d'un instrument.

Cependant, d'autres types d'amortissements intrinsèques au résonateur ont un effet important sur le son. Reprenons le cas des tubes. La colonne d'air en vibration dans le tube crée un frottement sur ses parois et échange de la chaleur avec elles. Ces phénomènes viscothermiques dépendent de la texture de la surface du tube, du type de matériau et de son aptitude à conduire la chaleur. De plus, leur effet sur les ondes sonores dépend de la fréquence de celles-ci.

Si la modélisation n'intègre pas bien cet amortissement, le son produit par l'instrument virtuel semble, à l'oreille, synthétique. Or la prise en compte du bon amortissement peut se révéler parfois délicate sur le plan mathématique, avec par exemple une opération étonnante telle qu'une dérivation temporelle fractionnaire (de même que les puissances non entières généralisent les mises au carré ou au cube, dériver une demi-fois généralise la dérivée qui donne la vitesse à partir de la position, ou l'accélération à partir de la vitesse).

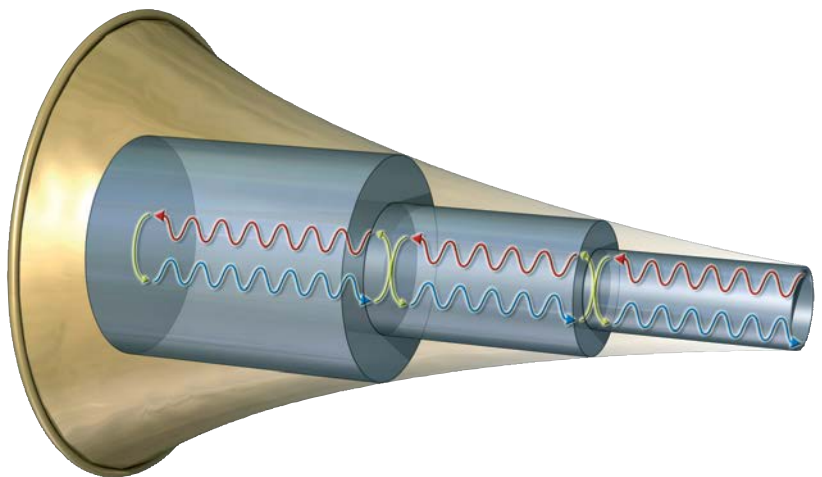
Pour les résonateurs à cordes, barres ou plaques, les amortissements peuvent avoir des

complexités similaires, selon les matériaux. On devrait pouvoir leur adapter les méthodes mathématiques utilisées pour le cas des instruments à vent, ce à quoi nous nous attelons.

Comme on l'a vu, la géométrie du résonateur et les phénomènes d'amortissement viscothermiques sont deux points clés pour élaborer un instrument virtuel à rendu réaliste. Un troisième est que, dans un instrument de musique, les ondes d'amplitude élevée sont souvent distordues par des effets non linéaires.

DES DISTORSIONS NON LINÉAIRES

Voyons comment sur l'exemple de la guitare. Pour accorder votre guitare, vous réglez la tension des cordes grâce aux mécaniques: plus la tension est élevée, plus la célérité de propagation des ondes (et donc la hauteur du son!) l'est aussi. Or pendant que la corde vibre, sa longueur varie par élasticité, ce qui modifie la tension et, partant, la vitesse de propagation des ondes. Il s'ensuit une distorsion



des ondes, effet d'autant plus marqué que l'on pince fortement la corde.

Autre exemple: pour accorder votre trompette, vous réglez la longueur du tube à l'aide d'une petite coulisse... mais seulement après avoir joué un peu pour chauffer l'instrument. Car plus l'air est chaud, plus la célérité du son y est grande et la note est haute. Or une surpression d'une onde sonore chauffe l'air où elle se propage, ce qui augmente aussi la célérité. Ainsi, comme pour la corde de guitare que l'on pince plus fortement, souffler plus fort dans la trompette distord l'onde sonore produite.

En résumé, modestes à faible amplitude, ces effets non linéaires peuvent devenir significatifs aux nuances *fortissimo* et participent

Pour modéliser un instrument à vent en forme de tube de perce (ou profil) variable, on peut en première approximation l'assimiler à un ensemble de trois tubes droits. À chaque jonction entre tubes, une partie des ondes acoustiques est réfléchie (en bleu) dans le même tube et une autre transmise (en rouge) au tronçon voisin. Le modèle correspondant, après optimisation, est nommé structure de Kelly-Lochbaum.

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

Une 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).