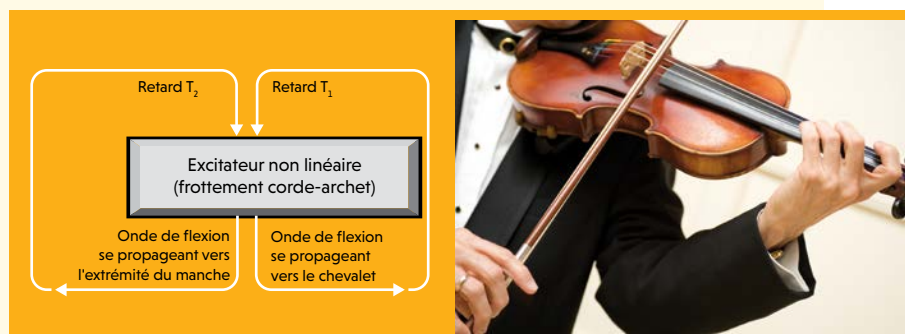
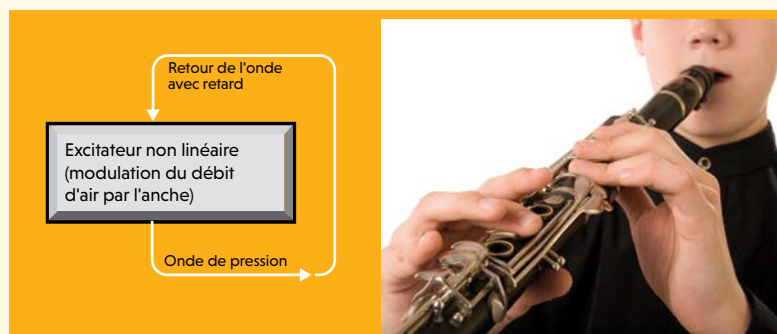


DES MODÈLES MINIMAUX D'INSTRUMENTS

Les simulations les plus simples du fonctionnement d'un instrument de musique intègrent deux ingrédients clés. D'une part, il faut représenter le mécanisme non linéaire d'excitation (modulation du débit d'air par l'anche dans le cas d'une clarinette, frottement entre l'archet et la corde dans le cas d'un violon...) par un système simple d'équations non linéaires, bâti à l'aide de fonctions élémentaires. D'autre part, on doit prendre en compte les retards des ondes, c'est-à-dire les temps mis par les ondes pour effectuer un aller et retour au sein de l'instrument. Ainsi, une onde acoustique qui se propage d'une distance L dans un tube droit, puis se réfléchit, subit un retard $T=2L/c$, imposé par la vitesse du son c . Considérons l'exemple d'une clarinette. Un mouvement d'anche crée une fluctuation de pression qui se propage à la vitesse c le long de l'instrument, jusqu'au premier trou ouvert (situé à une distance L), où elle est réfléchie avec un changement de signe. Cette onde revient donc à l'anche après un retard $T=2L/c$ et y modifie les conditions de pression. En conséquence, l'extrémité de l'anche se déplace, ce qui modifie le débit d'air entrant et crée une nouvelle perturbation de pression. Autre exemple : un violon et son archet. Le frottement entre le crin enduit de colophane et la corde engendre des ondes de flexion



sur chaque partie de la corde. Ces ondes se propagent à une certaine vitesse, l'une vers le chevalet, l'autre vers l'extrémité du manche. Parvenues à l'extrémité, elles y sont réfléchies. Après des temps de parcours différents T_1 et T_2 (sauf si l'archet frotte la corde en son milieu, auquel cas les temps de parcours sont égaux), les deux ondes reviennent à l'archet et interagissent à nouveau avec lui.

instantanée (comme si une partie de l'onde rebondissait sur cette jonction) et se transmet aussi partiellement au tronçon voisin.

En fin de compte, on aboutit à une « structure de guide d'ondes » où, du point de vue mathématique et informatique, n'intervient qu'un petit nombre d'opérations élémentaires : retards de l'onde proportionnels à la longueur du tube, additions, multiplications des amplitudes ondulatoires par des coefficients de réflexion qui dépendent des sections du tube. Ce modèle a été utilisé dès les années 1960 pour simuler le conduit vocal humain ; une fois optimisée, la structure informatique correspondante a été nommée, d'après les deux chercheurs qui l'ont introduite, structure de Kelly-Lochbaum (encore utilisée pendant chacun de nos appels téléphoniques pour la resynthèse de nos voix).

Mais des tubes droits raccordés restent une approximation grossière du profil doux des pavillons et de nombreux instruments. Ainsi,

pour un instrument à perce régulière, la simulation crée des artefacts que l'oreille perçoit. Pour renforcer le réalisme tout en restant compatible avec un traitement en temps réel, nous avons conçu vers 2002 un modèle à une dimension qui respecte mieux la géométrie du tube.

LA GÉOMÉTRIE DE LA PERCE

On part d'un tube à symétrie axiale, avec une perce dont le rayon dépend régulièrement de la coordonnée z mesurée le long de l'axe. Le calcul des sons produits par un tel tube implique de déterminer la pression acoustique régnant en chaque point à l'intérieur du tube, en réponse à une certaine pression appliquée à l'entrée. Ainsi, pour chaque position z le long de l'axe, on s'intéresse à la pression acoustique régnant à la distance r de l'axe. Cette pression obéit à une équation, qui décrit la propagation des ondes acoustiques, et dépend à la fois de la position et du temps. Dans le plan (z, r) et à un instant donné, les points associés à une

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).

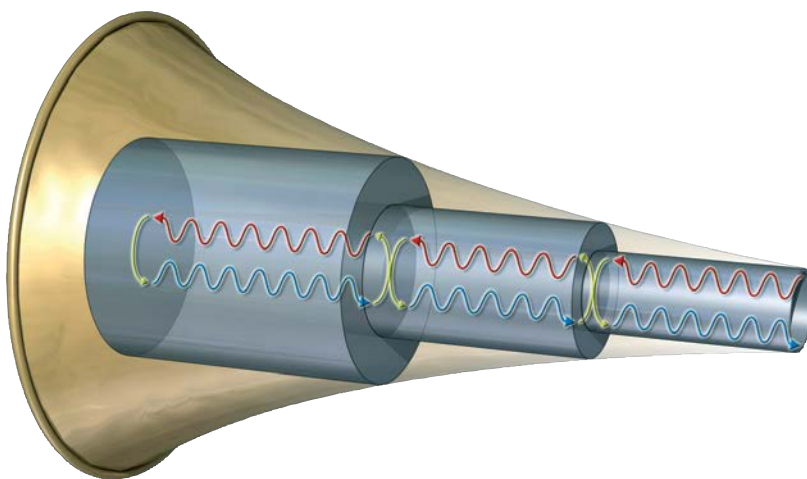
Pour les résonateurs à cordes, barres ou plaques, les amortissements peuvent avoir des

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.