

➤ évoluant continûment en saxophone au cours du temps, ou même un conduit vocal de dragon ou de dinosaure pour le son au cinéma... De même, on sait aujourd'hui concevoir virtuellement des matériaux évoluant du métal au bois pendant la vibration!

Les travaux pionniers du savant allemand Hermann von Helmholtz, à la fin du XIX^e siècle, et de nombreux autres, en partie rassemblés par les Américains Neville Fletcher et Thomas Rossing à la fin du XX^e siècle, ont permis de comprendre le fonctionnement élémentaire des instruments de musique. En n'en retenant que les éléments clés, plusieurs équipes dans le monde ont proposé dès la fin des années 1980 des premières synthèses sonores en temps réel, c'est-à-dire des synthétiseurs, des instruments électroniques, qui calculent suffisamment vite pour que l'opérateur humain ne perçoive aucun délai entre son action (appuyer sur la touche du clavier) et le résultat sonore.

Depuis, les travaux s'attachent à améliorer les modèles pour augmenter le réalisme sonore tout en préservant le traitement en temps réel. Un autre défi pour le réalisme reste le contrôle de l'instrument virtuel: même avec une excellente modélisation de l'instrument, le premier son que l'on produit en jouant sur un instrument virtuel est souvent... un canard! Il s'agit de construire les «réflexes coordonnés» acquis par le musicien expert et qui lui permettent de bien jouer. Avant toute tentative de synthèse par modèle physique, il faut étudier et comprendre le fonctionnement d'un instrument de musique.

Depuis Helmholtz, on sait que ce fonctionnement repose sur une boucle de rétroaction où un excitateur (anche, archet, lèvres, plectre, jet d'air...) se couple à un résonateur (tuyau, corde, membrane...). Ce faisant, le résonateur cède un peu d'énergie sous la forme d'un rayonnement acoustique, perçu par nos oreilles. Dans le cas des instruments entretenus – c'est-à-dire capables d'auto-osciller spontanément à partir d'une excitation statique telle qu'un souffle constant, par opposition aux instruments pincés ou frappés –, l'émission d'une note résulte d'un couplage entre l'excitateur et le résonateur, et requiert en permanence des ajustements très fins de la part du musicien.

Pour la synthèse sonore en temps réel, on doit réduire au maximum la complexité du modèle de l'instrument afin d'avoir des temps de calcul courts. Mais le modèle simplifié doit aussi pouvoir expliquer une grande partie du fonctionnement d'un instrument. Une telle «formulation minimale» peut intégrer des descriptions sommaires de l'excitateur et du résonateur, mais, pour expliquer et reproduire le phénomène d'auto-oscillation, elle ne peut faire l'impasse sur la nature non linéaire de

l'excitateur et de son couplage avec le résonateur (voir l'encadré page ci-contre). L'expression «non linéaire» signifie que la réponse (ou «sortie») du système n'est pas proportionnelle à l'action (ou «entrée») qu'on lui applique.

Il a été montré que ces modèles simples et peu coûteux à simuler incorporent assez la physique de l'instrument pour produire des comportements comparables à ceux de l'instrument réel: le son synthétisé est déjà caractéristique de telle ou telle classe d'instruments. Cependant, il faut raffiner les modèles pour réussir à leurrer l'oreille quant à la nature synthétique du son. Comment le faire de façon compatible avec une synthèse en temps réel, c'est-à-dire en n'allongeant pas trop les temps de calcul?

DES TUBES OU DES CYLINDRES?

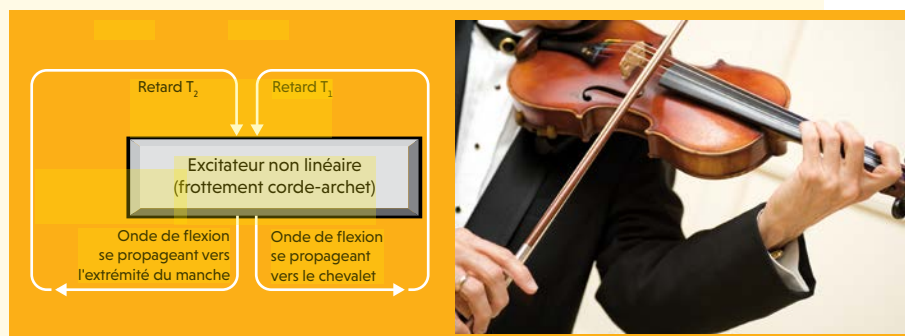
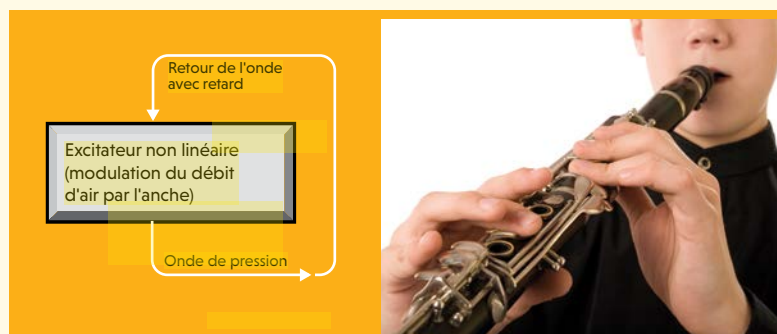
L'une des approches est de modéliser de façon simplifiée la forme géométrique du résonateur. Les résonateurs d'instruments, qu'ils soient mécaniques (cordes, plaques, etc.) ou acoustiques (tubes) sont le lieu où se propagent des ondes. Simuler précisément cette propagation dans une géométrie tridimensionnelle se révèle souvent trop coûteux en calculs. Prenons le cas d'un résonateur d'un instrument tel qu'une trompette, qui a la forme d'un tube à section variable – on parle de la «perce» de l'instrument. Comment le représenter de façon simplifiée? La première idée pour la synthèse sonore était d'approcher cette perce par un profil en marches d'escalier, comme si l'on raccordait des tubes droits (voir la figure page 68).

Dans ce cadre, quand une onde acoustique plane, c'est-à-dire dont les fronts sont plans et perpendiculaires à l'axe du tube, se propage le long du tube et arrive à une discontinuité de section, elle subit une réflexion partielle

**Virtuellement,
on conçoit aujourd'hui
des matériaux évoluant
du métal au bois**

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