

L'acoustique du violoncelle

Si l'on est en mesure d'expliquer leur fonctionnement, on est encore loin de pouvoir caractériser et comparer en termes scientifiques la différence de qualité entre deux violoncelles.

COMMENT EST CRÉÉ LE SON DU VIOLONCELLE ?

Le mouvement rectiligne de l'archet met en vibration la corde. Celle-ci étant un émetteur sonore peu efficace, il est nécessaire de lui adjoindre une structure résonante, appelée corps ou caisse, dont la surface est beaucoup plus grande. Pour cela, une partie de l'énergie vibratoire de la corde est transmise à ce corps par l'intermédiaire du chevalet. La vibration de ce dernier engendre des ondes sonores, celles que l'on entend.

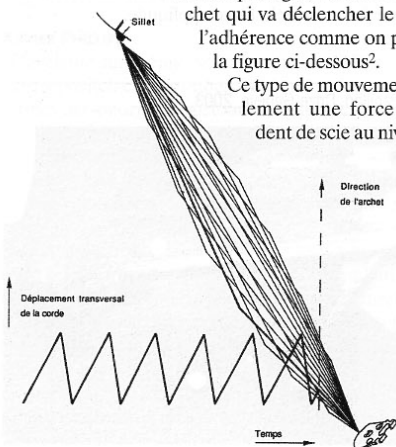
COMMENT VIBRE LA CORDE FROTTÉE PAR UN ARCHET ?

Le frottement rectiligne de l'archet sur la corde engendre une alternance de phases d'adhérence et de glissement. Lorsque la corde adhère, elle va, à la vitesse de l'archet, dans la même direction transverse. Lorsqu'elle glisse, elle se déplace dans la direction opposée à l'archet, ralentissant avant d'être à nouveau saisie. Le processus de va-et-vient de la corde sous l'archet donne naissance à un mouvement en forme de dent de scie¹, qui se répète à l'inverse de la fréquence de résonance de la corde (220 fois par seconde pour la corde de La, par exemple).

Si l'on regarde à l'œil nu la corde vibrer, sa forme globale est celle d'un fuseau qui représente l'enveloppe des différents états successifs de la corde que l'œil n'arrive pas à distinguer. En chacun des points de la corde, nous observons l'alternance adhérence/glissé, ce qui donne naissance à chaque instant à deux portions de droites séparées par un coin. En se déplaçant sur la corde, ce coin forme l'enveloppe de la vibration. On peut visualiser le coin en photographiant avec un flash ou en "ralentissant" le mouvement au moyen d'un éclairage stroboscopique.

C'est le passage du coin au niveau de l'archet qui va déclencher le glissement ou l'adhérence comme on peut le voir sur la figure ci-dessous².

Ce type de mouvement génère également une force en forme de dent de scie au niveau du cheva-



let qui sera transmise à la structure sonore. Le spectre de cette forme, superposition de plusieurs sinusoides, est très riche en harmoniques.

PEUT-ON OBTENIR UN MOUVEMENT ADHÉRENCE/GLISSÉ AVEC N'IMPORTE QUELLE PRESSION D'ARCHET ?

Bien entendu, cette alternance adhérence/glissé nécessite une force minimale afin de faire naître ce mouvement. Les instrumentistes utilisent l'expression "rentrer dans la corde" et le terme "pression" à la place de force. Lorsque cette dernière est trop grande, la note devient fautive et peut donner lieu à une sonorité éraillée. Entre ces deux limites, le violoncelliste dispose d'une plage utile musicalement qui variera selon la position de l'archet. A proximité du chevalet (*sul ponticello*), cette plage est assez limitée et les niveaux des deux forces extrêmes sont importants; au niveau de la touche (*sul tasto*), c'est le contraire.

QUELLES SONT LES CARACTÉRISTIQUES DE L'ARCHET QUI SONT À L'ORIGINE DE CE MOUVEMENT ?

On peut engendrer le mouvement alternatif adhérence/glissé en frottant simplement la corde avec une baguette de bois dont une des faces a été enduite de colophane pour favoriser la friction. L'archet offre assurément plus de possibilités musicales à l'instrumentiste. Dans sa forme actuelle, il minimise les variations de pression utiles pour le jeu, ce qui rend les articulations et les attaques puissantes plus faciles à réaliser. De plus, de par sa structure microscopique, le crin de cheval retient la colophane et permet d'accroître la force de friction, bien mieux qu'une simple baguette. La qualité des archets est liée à la fois à la faculté de contrôler le jeu et à la marge de variation du son émis offertes au violoncelliste.

Les propriétés de jeu dépendent essentiellement des caractéristiques statiques de l'archet comme sa masse, son centre de gravité, sa rigidité en flexion le long de la baguette, sa rigidité en torsion, etc., alors que les propriétés sonores sont rattachées aux caractéristiques dynamiques de l'ensemble mèche-baguette. Ces deux propriétés varient sensiblement selon la tension de la mèche.

LA TRANSMISSION DE LA VIBRATION À LA STRUCTURE SONORE : LE RÔLE DU CHEVALET

Les quatre cordes sont tendues sur le corps et passent sur le chevalet. Ce dernier repose sur la table supérieure, dénommée table, qui, associée à la table inférieure ou fond, forme le corps. Ces deux tables sont reliées par une petite barre, l'âme, et par les éclisses latérales, dont le rôle acoustique est moins important. Si l'apparence du corps est symétrique, les deux éléments cachés que sont l'âme et la barre³, rendent son comportement vibratoire asymétrique, ce qui est indispensable pour un bon

le violoncelle

fonctionnement, principalement dans les basses fréquences.

La cavité aérienne créée par le volume intérieur du corps est mise en communication avec l'air extérieur par les deux ouïes en forme de f. Ces ouïes ont deux fonctions principales: l'une, sur le plan mécanique, est de séparer la partie centrale de la table de ses côtés, lui donnant ainsi la possibilité de pivoter en réponse aux forces exercées par les pieds du chevalet; l'autre, sur le plan acoustique, fixe la résonance de la cavité par la surface totale de l'ouverture. Avec l'aide du chevalet, de la barre et de l'âme, l'ensemble table, fond et cavité forme une structure sonore complexe, mais qui, avec une taille raisonnable, couple efficacement les cordes à l'air environnant.

CORDES HARMONIQUES OU PAS ?

Une corde idéale et donc parfaitement harmonique est une corde fine, flexible, homogène, sans pertes internes lorsqu'elle est montée sur des supports rigides. Ceci est loin d'être le cas pour les cordes du violoncelle et les fréquences ne sont donc pas tout à fait en relation harmonique. Le mode cinq, par exemple, aura une fréquence légèrement différente à cinq fois la fréquence du premier mode. Cependant, cet écart reste faible pour le violoncelle, comparé à celui que l'on trouve pour le piano.

Pour la corde frottée, l'inharmonicité a deux effets: une légère modification de la fréquence de jeu par rapport à celle que l'on obtiendrait en pinçant la corde; et, plus important, l'allongement du transitoire d'attaque, c'est-à-dire du temps de démarrage de la vibration.

Le taux des pertes dans la corde diffère selon les fréquences. Si l'on pince la corde, on s'apercevra, en visualisant l'évolution du son au cours du temps, que certaines composantes s'éteignent plus vite que d'autres. La difficulté pour le violoncelliste sera donc de choisir des cordes qui, une fois montées, présenteront un compromis entre une qualité sonore (les composantes du son ne s'éteignent pas immédiatement) et une bonne articulation (le son ne se prolongeant pas trop).

Si le mouvement principal de la corde se fait dans la direction transversale, le frottement de la mèche déclenche également la rotation de la surface de la corde. La fréquence de ce mouvement est bien plus élevée que celle du mouvement principal auquel il se superpose. Le diamètre et la facture de la corde affectent beaucoup ce mouvement particulier et, indirectement, le mouvement global. Ces différences sont bien perçues par les violoncellistes.

LA STRUCTURE SONORE :

COMMENT AGIT-ELLE SUR LA SONORITÉ DE L'INSTRUMENT ?

C'est la vibration de l'ensemble de la structure sonore et du chevalet qui détermine la sonorité de l'instrument. En effet, transformé par les résonances de la structure sonore et du chevalet, le signal qui arrive à nos oreilles n'a plus la forme d'une dent de scie. Ces résonances ne sont pas uniformément distribuées sur l'ensemble des fréquences du violoncelle; de plus, elles ne sont pas en relation harmonique, du fait de la forme complexe de l'instrument.

Si l'on compare plusieurs instruments, on remarque que si la forme globale des résonances de la structure est identique d'un instrument à un autre, la position et l'amplitude de ces résonances ne le sont pas. Outre que les dimensions de ces instruments peuvent être légèrement inégales, les variations imprévisibles des propriétés des bois utilisés sont souvent à l'origine de ces différences. En effet, deux pièces adjacentes, découpées dans le même morceau de bois, présentent des propriétés qui ne sont pas constantes et doivent être travaillées, rabotées et grattées par le luthier de manière spécifique. On devine la difficulté pour le luthier de dupliquer un violoncelle.

Cependant, en manipulant la distribution de masse et de raideur, le luthier peut agir considérablement sur les modes. Des simulations sur des plaques de formes plus simples que celles du violoncelle montrent nettement qu'une faible variation locale d'épaisseur peut transformer de manière importante la fréquence, l'amortissement et la forme des modes. Tout au long de cette phase, le luthier évalue avec ses mains la rigidité des tables et, en frappant sur ces tables, compare les sons obtenus.

AUTRES POINTS

Dans la dernière partie de cet article, nous allons aborder brièvement plusieurs points dont certains seraient à inclure dans une modélisation plus complète du fonctionnement du violoncelle:

– *Modes longitudinaux de la corde*

Si la corde n'est pas frottée perpendiculairement, une vibration longitudinale peut se superposer à la vibration transversale et à celle de rotation. Sa fréquence, très aiguë, se traduit par un son déplaisant et perçant. Les débutants sont coutumiers de ce son que l'on peut faire surgir également en frottant la corde avec un chiffon pour la nettoyer.

– *Influence de la largeur de la mèche*: la possibilité d'incliner l'archet est utilisée dans le jeu pour réaliser plus facilement des attaques ou pour faire varier la force appliquée.

– *Propriétés de la colophane* : elle présente une propriété intéressante de variation de la friction liée à l'accroissement de température lors de la phase de glissement.

– *Bruit engendré par le frottement de l'archet* : ce bruit ne se propage pas bien et sa perception est plus forte pour l'instrumentiste que pour l'auditeur. Cependant, une prise de son proche peut le mettre en relief.

– *Existe-t-il d'autres types de régime d'oscillation* de la corde frottée que le mouvement d'Helmholtz ?

Il peut coexister plusieurs coins sur la corde qui vont engendrer d'autres types de régimes d'oscillation. Le violoncelliste en utilise au total quatre ou cinq dans un but musical bien précis.

– *Les notes défectueuses ou notes qui roulent* : le violoncelle est plus sujet à ces notes défectueuses que le violon, car son chevalet est plus haut et modifie le couplage par son rôle de levier.

– *Influence des paramètres de jeu sur la sonorité*.

La particularité du mécanisme adhérence/glissé fait que la forme des vibrations de la corde sous l'archet est toujours la même à quelques exceptions près (voir paragraphes précédents). Tous les violoncellistes savent qu'il existe un ensemble utile de sonorités obtenues en faisant varier la position de l'archet sur la corde.

Si, contrairement à la vitesse, la pression joue très peu sur l'amplitude de la vibration et donc sur l'intensité du son émis, elle permet cependant de modifier la sonorité. Ainsi, en exerçant une force plus faible lorsque l'archet est proche de la touche (*sul tasto*), on arrondit la forme du signal en dent de scie, ce qui appauvrit son contenu en fréquences aiguës. À l'inverse, en augmentant la force, ce qui peut se faire également en se rapprochant du chevalet, on rend le coin plus aiguë, ce qui enrichit cette fois le signal en composantes aiguës. Cet appauvrissement ou cet enrichissement du spectre correspondent à une façon indirecte de changer l'intensité du son émis.

– *Rayonnement du violoncelle*.

L'efficacité du rayonnement peut se définir comme la quantité de vibrations de l'air environnant créée par un mouvement donné de la structure sonore. Les parties vibrantes de la structure sonore du violoncelle ne sont pas les mêmes d'une note à une autre. Il en résulte pour le rayonnement une variation angulaire rapide avec la fréquence ; typiquement, des changements très importants d'un demi-ton à un autre. Cette variation a des conséquences sur la perception de l'instrument donnant l'illusion que chaque note vient d'une direction différente.

La tenue particulière de l'instrument par le violoncelliste perturbe le rayonnement. Nous sommes alors en présence d'une sorte d'ombre acoustique, similaire à l'effet produit par le guitariste.

– *Les effets du vibrato* : le mouvement du doigt sur la touche produit une modulation de fréquence de l'ordre de 5 à 10 Hz qui déplace les composantes du son émis sur les résonances de la structure sonore. Il en résulte une modulation de l'amplitude de ces composantes.

– *L'influence de la pique* : elle peut perturber le fonctionnement si elle repose sur une cavité mal adaptée, ce qui arrive parfois sur certaines estrades ou scènes de concert.

– *La qualité des instruments*.

Pour l'instrumentiste, la qualité du violoncelle est, comme celle des archets, liée à la fois à la sonorité et au jeu. Cependant, aucune analyse ne permet de définir le lien entre ce que l'on peut mesurer sur les violoncelles et leurs qualités musicales. On se contentera donc d'énumérer un ensemble de facteurs qui sont pris en compte dans les critères de jugement sur la qualité. Ainsi, le transitoire d'attaque joue un rôle dans le processus d'identification d'un instrument. La facilité de l'instrument à

parler est donc un critère essentiel de qualité.

Autres critères : le niveau sonore, lié à l'efficacité de rayonnement, ou son équivalent subjectif, la force sonore (*loudness* pour les Anglo-Saxons). Le niveau sonore et sa variation angulaire selon la fréquence sont probablement liés à cette notion subjective de projection, mal définie et jusqu'ici peu étudiée par les scientifiques.

La sensibilité au vibrato conditionne la qualité, tout comme la sensibilité aux notes défectueuses, sans parler de la sensibilité à l'humidité... Enfin, il ne faut pas oublier les possibilités de dynamique et de variation de sonorité.

Signalons, enfin, que les instrumentistes s'accordent sur les facteurs qui déterminent la qualité et font bien souvent le même constat sur un instrument : « Cet instrument est peu puissant dans le médium », « Il parle difficilement dans les graves » ou « Ces notes ont tendance à rouler facilement ».

Par contre, dans le jugement qu'ils portent sur la qualité ou lorsqu'ils sont amenés à choisir un instrument, ils n'accordent pas tous la même importance à ces critères. Des goûts et des couleurs on ne dispute point, dit le vieil adage.

René Caussé – Ircam/CNRS, Paris

1. Ce mouvement ou régime d'oscillation de la corde est dit d'Helmholtz, du nom du scientifique allemand qui l'a visualisé pour la première fois au 19^e siècle

2. On trouvera dans l'article de John Schelleng ("La physique de la corde frottée", publié dans *Les Instruments de l'Orchestre*, Ed. Balin, 1985) une description approfondie de ce mécanisme. Une animation issue d'une simulation du mouvement de la corde se trouve à l'adresse suivante : <www.phys.unsw.edu.au/~jw/Bows.html> On pourra s'aider des définitions, des notions et des références données sur le site de la Société française d'acoustique : <www.sfa.asso.fr/fr/gsam/gsam.htm>

3. La barre est un long raidisseur, collé sous la table. Elle joue le même rôle que les raidisseurs de la table d'harmonie du piano et permet de distribuer l'énergie vibratoire transmise par le chevalet sur une surface plus étendue.