

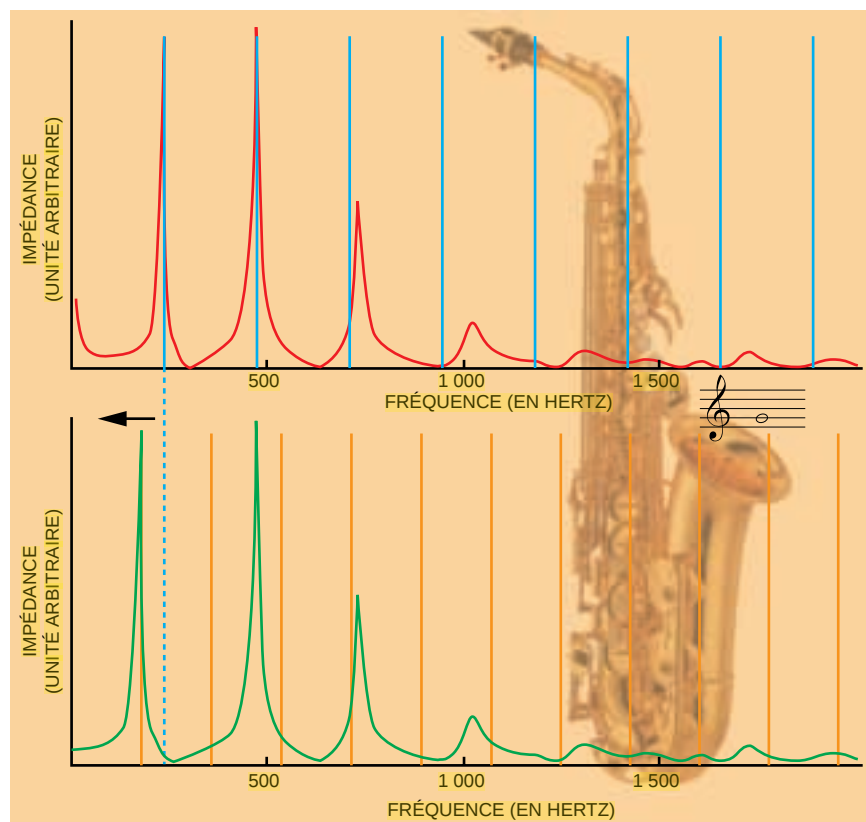
cation locale de la perce de l'instrument. Cela est réalisé sur certaines clarinettes dont la partie supérieure (le barillet) n'est pas cylindrique, comme le reste de l'instrument, mais légèrement conique. Nous avons observé avec différents modèles de clarinettes joués par une bouche artificielle, que la forme exacte du barillet a des conséquences directes sur le timbre de l'instrument. Des inhomogénéités de timbre et des différences de hauteur apparaissent pour des notes différentes de la gamme chromatique, ce qui permet de distinguer sans ambiguïté les instruments.

Enfin, même pour un cylindre parfait, l'harmonicité exacte ne peut être obtenue : elle est perturbée par les frottements visqueux de l'air au voisinage des parois, qui dissipent l'énergie sous forme de chaleur, réduisent l'impédance acoustique pour les fréquences de résonance et décalent légèrement celles-ci. La vitesse du son dépend alors de la fréquence. Les conséquences de ce phénomène sont indépendantes du diamètre du tuyau et jamais négligeables ! En effet, lorsque le diamètre du cylindre augmente, les pertes d'énergie diminuent, et les fréquences de résonance se rapprochent des harmoniques, mais les pics de la courbe d'impédance se resserrent autour des fréquences de résonance : l'impédance reste faible à la fréquence de l'harmonique. En cela un tuyau diffère d'une corde, qui peut être très harmonique (celle de la guitare ou du clavecin en particulier).

Des instruments discontinus

Les instruments à vent peuvent-ils avoir d'autres formes ? En partant des formes connues que sont les cylindres et les cônes, mais en nous autorisant des variations brusques de section, nous avons découvert une infinité d'intermédiaires possibles, formés de tronçons de cônes de longueurs égales mis bout à bout, les dimensions du premier déterminant celles des autres. Ces résonateurs sont *a priori* jouables avec une embouchure de flûte.

Seule une partie de ces résonateurs est utilisable avec une anche : ceux pour lesquels les troncs de cônes sont des cylindres. La section du $n^{\text{ième}}$ cylindre est alors égale à celle du premier multipliée par la somme des n premiers entiers (soit $n(n+1)/2$). Aux changements de section, les diverses réflexions se compensent et permettent une pro-

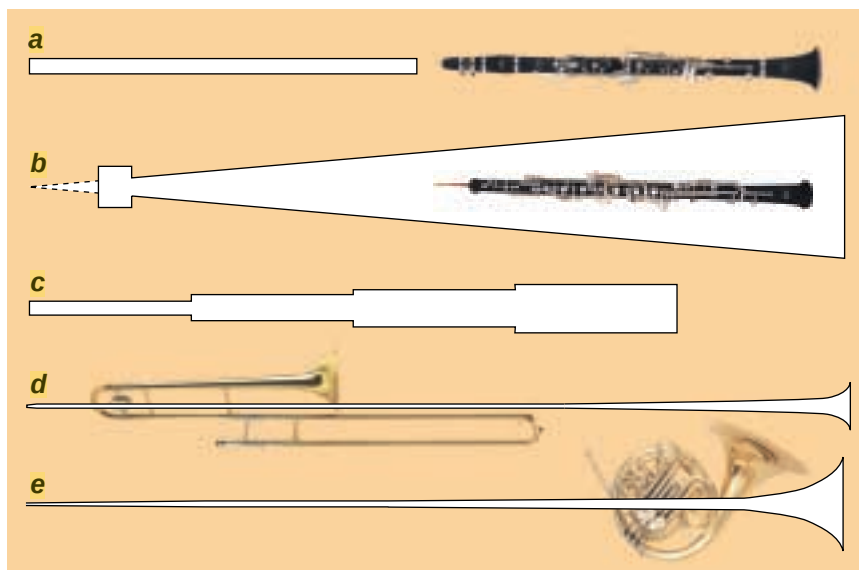


4. LES FRÉQUENCES DE RÉSONANCE d'un saxophone alto jouant la note *sol* grave sont celles où l'impédance acoustique (*en haut, en rouge*) est maximale. Alors que les fréquences harmoniques (*traits bleus*) de la note fondamentale en sont des multiples exacts, les fréquences de résonance sont légèrement décalées. L'harmonicité des résonances d'un tuyau sonore n'est pas un phénomène naturel, mais résulte de nombreux ajustement et compromis réalisés par le facteur d'instruments. Lorsque l'on détériore l'harmonicité du saxophone en ajoutant un tube de longueur variable sur son bocal, la première fréquence de résonance diminue (*courbe verte, en bas*) : les deuxième et troisième résonances s'écartent de plus en plus des harmoniques de la note fondamentale (*en orange*). Le timbre s'appauvrit, l'émission de la note est de plus en plus difficile, puis le régime d'oscillation bifurque vers une combinaison des oscillations aux deux premières fréquences de résonance.

pagation similaire à celle d'une onde progressive. Le résultat sonore est comparable à celui obtenu avec un saxophone. Quand le nombre de cylindres tend vers l'infini, on obtient un cône complet. Quand ce nombre est égal à un, on a un cylindre. Par ailleurs, si le résonateur est constitué de N cylindres, les fréquences de résonance multiples de $N+1$ sont absentes. Dans le cas particulier du cylindre, les résonances paires sont bien absentes, comme on l'observe sur la clarinette.

Le cas des cuivres est légèrement différent. La fréquence de jeu, bien que directement liée aux fréquences de résonance de l'instrument, est beaucoup plus fortement contrôlée par la façon dont l'instrumentiste embouche celui-ci. L'exigence de fréquences de résonance harmoniques est moins stricte. En conséquence, la forme des résonateurs dans le cas des cuivres est plus diverse que dans le cas des instruments à anches.

De manière générale, outre l'embouchure, les cuivres sont décomposables en trois parties : une partie cylindrique, une partie conique et le pavillon. Dans le trombone, la partie cylindrique est de loin la plus importante, alors que, dans le cor de chasse, elle est quasi inexistante. Pourtant, dans tous les cas, quelle que soit la proportion entre les deux parties, le résultat est acceptable. Cela est d'autant plus étonnant que, pour un même instrument, le rapport entre les deux portions varie par l'allongement ou le raccourcissement de la partie cylindrique lorsque l'on actionne les pistons ou la coulisse. Le paradoxe a été levé, dans les années 1930, par Henri Bouasse : avec une partie cylindrique et une partie conique bien choisies, les troisième, quatrième, cinquième et sixième fréquences de résonance sont harmoniques entre elles à mieux que deux pour cent, la



5. DIFFÉRENTES FORMES de résonateur possèdent des fréquences de résonance harmoniques lorsqu'ils sont fermés à une extrémité (cas de tous les instruments à vent excepté les flûtes). Le cylindre (a, clarinette) et le cône (b, hautbois) sont les seuls utilisés dans la pratique pour les instruments à anche. Pour conserver cette propriété lorsque l'on tronque le cône afin d'y placer une embouchure, celle-ci doit être de volume équivalent à la troncature. Si les facteurs acceptaient de recourir à des discontinuités de section, ils pourraient fabriquer des instruments de forme intermédiaire, en enchaînant des cylindres de même longueur (c). Pour les cuivres, (d, trombone et e, cor), le musicien contrôle mieux la note émise : l'utilisation d'assemblages de cônes et de cylindres, dans des longueurs de rapport variable est alors possible.

seconde résonance étant trop basse de six pour cent (un demi-ton). Dans les instruments réels, les fréquences de résonance, excepté la première, trop basse, sont effectivement dans une série harmonique, la seconde étant en général aussi trop basse, mais dans une moindre mesure.

Cette inharmonicité de la première fréquence de résonance est toutefois compensée par les instrumentistes : les notes du registre le plus grave ne coïncident pas avec des fréquences de résonance du tuyau, mais avec la fondamentale de la série harmonique des résonances d'ordre supérieur. Bouasse avait observé ces régimes d'oscillation particuliers et remarqué qu'en remplaçant l'embouchure de trombone par un bec de saxophone ténor de volume identique, la note la plus grave était une quinte plus grave et correspondait au contraire à la première fréquence de résonance du tuyau.

Ce phénomène se retrouve dans le cas du basson : dans le spectre des notes graves, l'énergie acoustique à la fréquence fondamentale est très faible, ce qui n'empêche pas l'oscillation d'être produite à cette fréquence, par combinaison des harmoniques aigus du spectre où l'énergie est surtout présente.

Mieux encore, un bassoniste suisse, N. Rihs, a récemment obtenu,

en soufflant d'une façon particulière et en modifiant légèrement l'anche, une note fondamentale à l'octave au-dessous de la note la plus grave obtenue normalement pour un doigté donné. La fréquence fondamentale de cette note ne correspond à aucune fréquence de résonance de l'instrument, qui devrait, pour cela, être deux fois plus long.

Ce bassoniste a ainsi retrouvé expérimentalement un résultat théorique obtenu en 1983 par M. McIntyre et J. Woodhouse, de l'Université de Cambridge, et R. Schumacher, de l'Université Carnegie-Mellon. Ils avaient modélisé de façon simplifiée l'instrumentiste et l'instrument, en couplant deux équations dont l'une correspondait à un exciteur (l'instrumentiste et l'embouchure) et l'autre à un oscillateur (le tube sonore). Ils se plaçaient ainsi dans le domaine plus général de la physique des oscillateurs non linéaires. En choisissant bien les valeurs des paramètres (dont les équivalents physiques seraient la pression d'alimentation, la raideur de l'anche et l'ouverture entre l'anche et la table du bec) et les conditions initiales, ils obtenaient, par simulation, une cascade « sous-harmonique », c'est-à-dire des notes de fréquences moitié, quart, de la fréquence fondamentale.

L'inharmonicité créatrice

L'inharmonicité des fréquences de résonance, dont nous avons vu qu'elle est souvent préjudiciable au jeu musical, est néanmoins recherchée dans quelques cas. Ainsi, les positions possibles des lèvres sur l'anche de la clarinette ou du saxophone sont peu nombreuses, et l'émission des régimes d'ordre supérieur ou égal à deux est difficile : sur un instrument baroque, on ne peut pas passer continûment d'une note à son octave, sans attaquer celle-ci. Les instruments à anche « modernes » sont pourvus d'une clé de registre, avec laquelle on découvre un trou de faible diamètre (de l'ordre du millimètre), placé de manière que seule la première résonance soit décalée et que l'impédance acoustique y soit fortement diminuée, sans modification pour la seconde résonance. Cette inharmonicité apportée entre les deux premières fréquences de résonance rend l'émission du premier régime quasi impossible au profit du second, et apporte un confort appréciable à l'instrumentiste.

L'inharmonicité est aussi une source de création musicale. Pour le saxophone ou le hautbois, de perce conique, lorsque le volume du bec est très différent du volume de la troncature du cône, la forte inharmonicité des résonances rend difficile l'émission des notes graves et peut provoquer l'émission de régimes d'oscillation quasi périodiques. Le spectre de fréquences de ces oscillations quasi périodiques est un spectre de raies pour lequel les fréquences sont des combinaisons linéaires des deux premières fréquences de résonance du doigté utilisé. Nous avons obtenu de tels régimes pour de fortes inharmonicités avec le saxophone modifié : la fréquence des roulements est la différence entre la seconde fréquence de résonance et le double de la première. De telles émissions « multiphoniques » sont aussi favorisées par certains doigtés. Ce nouveau mode de jeu polyphonique, que les facteurs d'instruments classiques tentent d'éviter, a ouvert un champ d'investigation pour la musique contemporaine et la musique improvisée.

La compréhension et la modélisation du fonctionnement des instruments de musique à vent sont donc à la fois source d'amélioration pour les instruments et d'évolution pour la musique. La facture instrumentale bénéficie ainsi de nos travaux : le logiciel « Resonans » que nous avons mis au point est aujourd'hui