

## Physique



### L'ESSENTIEL

La qualité sonore des trompettes et autres cuivres tient surtout à leur perce, la forme de la colonne d'air qui se trouve dans l'instrument. On pourrait obtenir des sons similaires avec des tubes... en bois.

✓ Les physiciens peuvent aider à concevoir la perce à l'aide d'algorithmes d'optimisation, de simulations numériques, et de descripteurs sensoriels établis avec des musiciens.

**M**iles Davis, Chet Baker, Wynton Marsalis... Tous les grands trompettistes vibrent avec leur musique. Sous l'effet de la puissance sonore, ils sentent sous leurs doigts les vibrations de leur instrument. À tel point, parfois, que le public « vibre » avec eux. De même, dans le registre classique, tous les auditeurs passionnés d'*Aida*, l'opéra de Verdi, connaissent et ressentent le son « cuivré » des trompettes célébrant le triomphe des troupes égyptiennes. Verdi avait vu juste, car les Égyptiens, probables inventeurs de la trompette voilà 3 000 ans si l'on en croit la découverte de plusieurs exemplaires de cet instrument dans la tombe de Toutankhamon (1345-1327 avant notre ère), faisaient un usage guerrier de cet instrument, sans doute en raison de sa puissance sonore. Comme les Grecs, les Romains et les Celtes, qui aimaient défiler aux sons du salpinx, de la buccina et du carnyx.

Cet usage militaire s'est transformé au fil des siècles. Monteverdi et Bach ont

su introduire les cuivres avec brio dans leur musique. Aujourd'hui, la majorité des instruments à vent de type cuivre sont constitués de laiton, un alliage de cuivre et de zinc. Les plus courants dans les orchestres sont, outre la trompette, le trombone à coulisse, le cor, le tuba, l'euphonium et le saxhorn. Contrairement aux instruments à vent de type bois, ils présentent seulement deux ouvertures, l'embouchure, la pièce métallique sur laquelle le musicien pose ses lèvres, et le pavillon, qui émet le son vers l'extérieur. Certains cuivres plus anciens, comme le serpent, le cornet à bouquin et l'ophicléide, ont également des trous latéraux.

Au premier abord, on peut penser que le matériau est la cause principale de leurs qualités sonores. Or les recherches en acoustique ont montré, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, qu'il ne joue qu'un rôle secondaire sur le son produit. En adaptant une embouchure de trombone sur un tuyau de plastique de plusieurs mètres, un instrumentiste

# le son et la forme

Joël Gilbert, Jean-François Petiot et Murray Campbell

**Une meilleure connaissance du fonctionnement intime des instruments, mais aussi des préférences des musiciens, donne un souffle nouveau à l'art de concevoir trompettes et autres cuivres.**

expérimenté obtient un son « cuivré » semblable à celui d'un instrument !

En réalité, un cuivre se définit, non par son matériau, mais par la façon dont le son est émis : la colonne d'air à l'intérieur de l'instrument – la perce – est mise en résonance par la vibration des lèvres du musicien. Aussi classe-t-on parmi les cuivres des instruments non métalliques, telle la conque marine, ou réalisés en bois, comme le cornet à bouquin et le serpent. Le laiton utilisé généralement dans les cuivres possède cependant des qualités intéressantes : il est notamment très ductile, donc relativement facile à mettre en forme. Lisse et non poreux, il permet d'obtenir une surface d'excellente qualité.

La perce se définit mathématiquement comme l'évolution du rayon intérieur de l'instrument en fonction de la ligne moyenne allant de l'embouchure au pavillon. Elle a une très grande influence sur le comportement de l'instrument. Indépendamment des qualités esthétiques de l'instrument, le fabricant de cuivres – le

facteur – doit donc surtout ajuster la perce en fonction du résultat musical désiré. Comment y parvient-il ? Les physiciens acousticiens peuvent-ils l'y aider en optimisant les paramètres qui influent sur les qualités sonores ? Intègrent-ils alors les caractères plus subjectifs qui influent sur les choix des musiciens ? Après avoir résumé les caractéristiques de la perce, nous examinerons les méthodes et les recherches grâce auxquelles les acousticiens contribuent à la déterminer, et son rôle essentiel dans la production des sons cuivrés – la cuivrabilité, qualité spécifique des cuivres. Enfin, nous reviendrons sur la contribution des parois de l'instrument au rayonnement sonore.

Reprenons notre trompette. Son registre courant – les notes couvertes du grave à l'aigu – s'étend sur deux octaves et demie, du *fa dièse grave* au *do* au-dessus de la portée. En faisant varier la conformation de ses lèvres, son « masque », et son souffle dans l'embouchure, le musicien expérimenté obtient, pour un même



UNE TROMPETTE CELTE, le carnyx.

## LES AUTEURS



Joël GILBERT est directeur de recherche CNRS au Laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine (LAUM UMR CNRS 6613), au Mans. Jean-François PETIOT est professeur à l'École centrale de Nantes et à l'Institut de recherche en communications et cybernétique de Nantes (IRCCyN - UMR CNRS 6597). Murray CAMPBELL est professeur d'acoustique musicale à l'École de physique de l'Université d'Édimbourg, en Écosse.

## L'optimisation de la perce par algorithmes génétiques

Les algorithmes d'optimisation sont des procédures mathématiques ou numériques qui permettent de trouver le ou les minimums d'une fonction. Parmi eux, les algorithmes génétiques reposent sur deux postulats de la théorie darwinienne de l'évolution : premièrement, dans chaque environnement, seules les espèces les mieux adaptées perdurent ; deuxièmement, au sein de chaque espèce, le renouvellement des populations est essentiellement dû aux « meilleurs » individus de l'espèce, c'est-à-dire aux individus les mieux adaptés au milieu.

Chaque variable d'optimisation (le rayon de la perce a une position donnée du tube) est tout d'abord intégrée dans un vecteur  $x$  dit vecteur d'optimisation. Dans un premier temps, il faut coder ce vecteur pour pouvoir le manipuler numériquement. Ce codage permet de constituer le « chromosome », composé de

« genes ». Un codage binaire des rayons de la perce est un exemple de chromosome possible.

Ensuite, on travaille avec des populations de solutions candidates à produire itérativement de nouvelles populations à l'aide de trois principes d'évolution : le croisement (les solutions sont croisées entre elles et donnent à leur « enfant » une partie de leur patrimoine génétique), la mutation (certains genes peuvent être modifiés) et la sélection (on choisit par exemple de ne retenir que les « meilleures » solutions au sens du critère souhaité pour l'itération suivante). Des milliers d'itérations sont réalisées par ordinateur pour produire finalement un ensemble de « bonnes » solutions au problème. Une telle méthode donne des perces optimisées parmi lesquelles on retrouve les solutions déjà connues, mais aussi des perces inédites.

### Cuivrabilité et classification

Outre son importance musicale, la « cuivrabilité » est devenue un critère original de classification des cuivres. En collaboration avec le musée d'Edimbourg, nous avons proposé de l'utiliser pour repertorier les cuivres des collections. Pour caractériser ce paramètre, les organologues (les spécialistes de l'étude des instruments de musique) utilisent une grandeur calculée selon une formule mathématique intégrant les dimensions de la perce et la valeur de la fréquence fondamentale jouable par l'instrument. Cette grandeur, issue de considérations d'acoustique non linéaire, est facile à estimer dès lors que la perce de l'instrument est connue. Ainsi, la grandeur en question a été évaluée pour des centaines de cuivres. Par ailleurs, il est possible de suivre l'évolution de cette grandeur pour un instrument donné au cours des siècles, de comparer des cuivres d'une même famille ou un type d'instrument provenant de différents pays. Bref, de donner un nouvel outil d'analyse aux spécialistes de l'histoire des cuivres et de leur facture.

doigte sur les trois pistons de l'instrument, des notes nommées partiels. Elles sont proches d'une série harmonique, c'est-à-dire proches d'une suite de fréquences multiples d'une fréquence fondamentale.

La colonne d'air intérieure est excitée et mise en résonance par les vibrations des lèvres du musicien, une succession rapide d'ouvertures et de fermetures de la bouche. La maîtrise de cette technique, le *buzz* (le bourdonnement), nécessite des années de pratique. Lorsque le musicien y parvient, la pression variable que son *buzz* exerce dans l'embouchure excite la colonne d'air dans l'instrument, celle-ci se met à vibrer, puis retroagit sur les lèvres, qui excitent à nouveau la colonne d'air, jusqu'à l'obtention d'un son stable. En configurant son masque, le musicien produit l'un des partiels correspondant à un doigté particulier. Les physiciens associent d'ailleurs souvent les cuivres et les instruments à anche (clarinette, saxophone, hautbois, basson, etc.), car le *buzz* a le même rôle que la vibration de l'anche : moduler le souffle du musicien, et produire un son par « effet valve ».

Les cuivres fonctionnent donc grâce au couplage entre les lèvres du musicien, le système excitateur, et la colonne d'air contenue dans l'instrument, le résonateur, qui propage et amplifie l'onde sonore émise. La première caractéristique du résonateur est son impédance d'entrée acoustique. L'amplitude de sa réponse à une excitation donnée, autrement dit, le rapport, à l'entrée de l'instrument, entre la pression acoustique, la variation de pression par rapport à la pression atmosphérique, et le débit acoustique, c'est-à-dire la variation de débit par rapport au débit

moyen. Lorsque l'on mesure l'impédance, on constate que son amplitude est maximale pour plusieurs fréquences particulières, les fréquences de résonance (voir la figure 1). Ces dernières correspondent aux partiels les plus faciles à émettre avec l'instrument.

### Jouer sur la perce

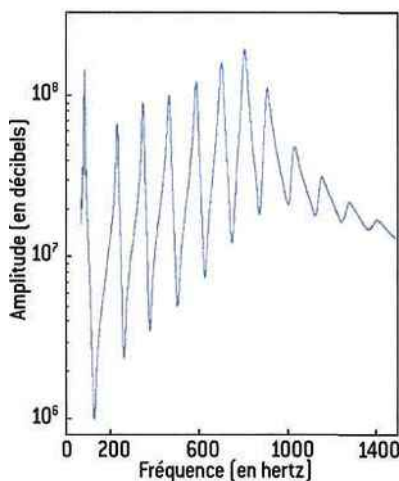
Puisque c'est la perce qui nous intéresse, comment faire pour la concevoir au mieux ? On peut d'abord considérer qu'elle doit être telle que les différentes fréquences de résonance soient très proches d'une série harmonique. Les facteurs de cuivres résolvent ce problème empiriquement grâce à des ajustements progressifs et à leur savoir-faire. Ils déterminent la forme intérieure qui minimise globalement l'« inharmonicité » des fréquences de résonance de l'instrument, mais aussi en tenant compte des qualités de timbre et d'émission. La perce est ainsi le résultat de compromis réalisés par le facteur entre plusieurs objectifs techniques, esthétiques et musicaux.

Réaliser une perce afin de fabriquer un cuivre demande bien sûr des compétences sur le travail des métaux. La mise en forme d'un pavillon nécessite en effet des dizaines d'opérations, telles que découpage, martelage, recuit, repoussage, etc. Celle des tubes est effectuée généralement par étirage du tube sur un mandrin, puis cintrage. Les dimensions de la perce sont ajustées au moyen du ou des mandrins sur lesquels le métal est étiré ou repoussé.

Aujourd'hui, les acousticiens peuvent contribuer à la conception de la perce en proposant des modèles mathématiques

prédicatifs et des simulations informatiques. Ces méthodes permettent d'optimiser divers paramètres physiques pour obtenir la réponse souhaitée. Ainsi, si les variables d'optimisation de la perce sont les rayons du résonateur à certaines positions, on peut modéliser ce dernier comme une suite de cônes et de cylindres ayant chacun un rayon particulier. Dès lors que l'on connaît les valeurs souhaitées des fréquences de résonance, la conception de la perce revient à rechercher les valeurs des rayons des différentes sections du tube qui minimisent l'écart des fréquences de résonance de l'instrument avec celles souhaitées. L'une des méthodes d'optimisation utilise ce que l'on appelle les algorithmes génétiques (voir l'encadré page ci-contre).

Bien sûr, l'approche par optimisation du critère « harmonicité » n'est pas sans défauts. D'abord, il existe huit doigtés possibles pour obtenir le registre de deux octaves et demie d'une trompette. Il est difficile d'obtenir une série de résonances harmoniques pour tous ces doigtés. En effet, le nombre de variables dimensionnelles sur lesquelles le facteur peut agir



**1. LA CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE** essentielle de la colonne d'air, ou résonateur, qui propage le son dans un cuivre est l'impédance d'entrée acoustique : le rapport entre la pression acoustique à l'embouchure et le débit acoustique. Mesurée sur une trompette, elle apparaît maximale pour certaines fréquences, les fréquences de résonance, qui correspondent aux « partiels » de l'instrument, c'est-à-dire aux notes les plus faciles à émettre.

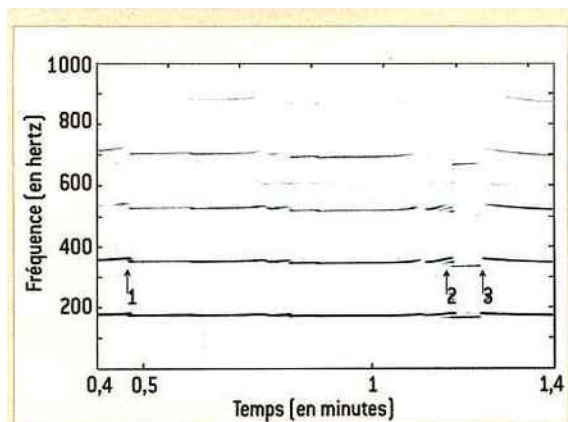
pour corriger la justesse est limité par la forme de l'instrument ; par exemple, la majeure partie de la perce de certains cuivres est cylindrique. Le facteur parviendra difficilement à ajuster tous les doigtés avec le même jeu de variables. Il est contraint de faire des compromis, qui exigent généralement le « sacrifice » de l'un des doigtés ; sur la trompette, ce sont les notes *do dièse* et *ré grave* de la première octave qui restent toujours trop hautes par rapport à la fréquence « juste » ; le musicien peut compenser cette imperfection à l'aide d'une petite coulisse actionnable avec l'auriculaire. Le facteur peut aussi utiliser des formes évolutives, ni cylindriques ni coniques, pour « harmoniser » l'instrument. C'est le rôle principal du pavillon et de la branche d'embouchure.

De plus, les modèles physiques traduisent le comportement acoustique de l'instrument, mais ils simplifient la réalité ; certains phénomènes secondaires ne sont pas encore pris en compte : effet des soudures et de l'état de la surface interne, influence de l'enroulement du résonateur, vibrations des parois, etc. Autre

**QUAND LES SONS DEVIENNENT « PATHOLOGIQUES »**

**D**ayton Miller, un acousticien américain, a publié en 1909 un article pionnier étudiant l'influence du matériau des instruments à vent sur la qualité sonore. Pour cela, il comparait des tuyaux d'orgue à embouchure de flûte d'épaisseurs et de matériaux différents (bois, zinc). Dans l'une de ses expériences, Miller remplissait progressivement d'eau l'espace compris entre la double coque d'un tuyau d'orgue en zinc caréné. Il observait une série de comportements atypiques au cours du remplissage, notamment des sons qui « roulent », c'est-à-dire non tenus et instables au cours du temps. Ayant récemment reproduit l'expérience, nous avons mis en évidence des effets similaires aisément audibles, et reliés aux vibrations des parois : notes qui « roulent », mais aussi changements de hauteur de note, etc.

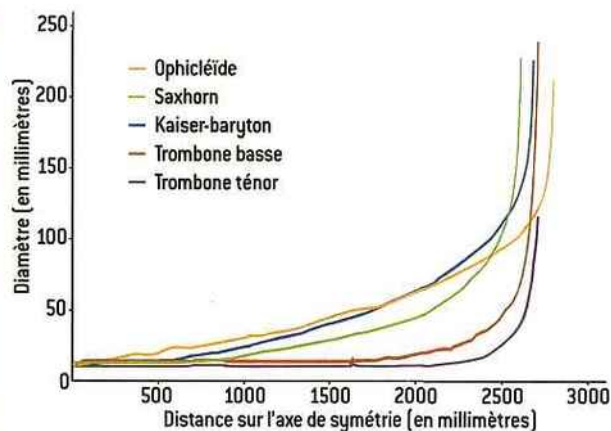
Ces effets sonores ont été analysés et nous les avons modélisés. Notre interprétation est la suivante : la colonne d'air de l'instrument peut être très perturbée, au point de modifier les sons émis, lorsqu'il y a coïncidence, c'est-à-dire égalité des fréquences de résonance, entre une résonance acoustique (celle de la colonne d'air) et une résonance mécanique (celle des parois). Dans le tuyau d'orgue, cette coïncidence ne se produit que pour une certaine hauteur d'eau, correspondant à des fréquences particulières de résonance mécanique. Or ce couplage est favorisé par une « brisure de symétrie » du résonateur (le changement de ses caractéristiques physiques), due par exemple à une ovalisation d'un tube originellement cylindrique. Dans ces situations « pathologiques », les perturbations du son ne sont pas la conséquence des ondes émises vers l'extérieur par les vibrations des parois, mais une conséquence indirecte de ces dernières : la colonne d'air de l'instrument est perturbée par les ondes émises vers l'intérieur par les parois, elles-mêmes mises en vibration par la colonne d'air.



**CE SPECTROGRAMME** montre les fréquences des sons émis par un tuyau d'orgue en zinc à double coque excité par un flux d'air à mesure que l'espace situé entre ses deux parois est rempli d'eau. À chaque instant, on enregistre la fréquence fondamentale (*en bas*) et quatre fréquences harmoniques, multiples de la fondamentale. Au début [quand l'espace est plein d'eau], le tube vibre sur toute sa hauteur. Quand l'espace est rempli à moitié (au bout d'une minute environ), seule la moitié supérieure du tube vibre. Les trois flèches pointées sur l'harmonique de rang 2 indiquent respectivement une variation de justesse importante (1), une note qui roule (2) et un silence (3). La note qui roule, dont le régime d'oscillation n'est plus périodique, est obtenue pour une certaine hauteur d'eau, donc pour une certaine fréquence de vibration des parois, qui coïncide avec la fréquence de résonance de la colonne d'air du tuyau d'orgue.



**2. UN CUIVRE** est composé d'une succession de sections à perce plus ou moins cylindrique ou conique (*ci-contre, la perce d'un clairon*), dont le facteur peut ajuster les dimensions pour parvenir au son recherché. Or la cuivrabilité des instruments dépend de la perce. Plus elle est cylindrique, plus elle propage le son en favorisant l'amplification des hautes fréquences, un phénomène caractéristique du son cuivré. En traçant le diamètre de la perce en fonction de la distance selon l'axe de symétrie de l'instrument déroulé, les auteurs ont classé ces cinq instruments par ordre de cuivrabilité : le kaiser-baryton, l'ophicléide, le saxhorn, le trombone basse et le trombone ténor (*de gauche à droite*). Le moins « cuivrable » est l'ophicléide (*en orange*), puis viennent le saxhorn, le kaiser-baryton, le trombone basse et le trombone ténor (*en violet, le plus « cuivrable »*).



inconvenient de l'approche par l'harmonicité, elle ne tient pas compte des préférences du musicien. Or la justesse peut dépendre du contexte musical dans lequel il s'exprime, selon ses goûts et sa sensibilité. C'est pourquoi une autre approche de définition de la perce, plus récente, s'appuie sur le musicien pour déterminer les valeurs « cibles » des fréquences de résonance : celles que l'instrumentiste recherche ; ensuite, on établit, à l'aide d'une méthode d'optimisation, la perce qui correspond aux fréquences de résonance proches de ces valeurs. La détermination des valeurs cibles passe par la réalisation d'une évaluation sensorielle d'un ensemble d'instruments, comparable aux tests réalisés par exemple en œnologie. Des travaux originaux ont été menés à cette fin par Émilie Poirson au sein de l'équipe de l'un d'entre nous (Jean-François Petiot), à l'Institut de recherche en communications et cybernétique de Nantes.

Ces mesures sensorielles nécessitent tout d'abord de définir un ensemble d'instruments de qualités différentes qui sont ensuite expertisés par un panel de musiciens essayeurs, préalablement entraînés à l'évaluation sensorielle. L'objectif est d'obtenir une mesure fiable des instruments selon des descripteurs sensoriels : la justesse, la facilité d'émission des sons et d'autres critères artistiques. Ces descripteurs sensoriels peuvent être ensuite reliés aux grandeurs physiques caractéristiques de l'instrument, principalement l'impédance d'entrée, à l'aide de techniques de modélisation et d'analyse de données.

Existe-t-il d'autres voies d'optimisation de la perce des cuivres ? Comme nous l'évoquons à propos de *Aïda*, la richesse sonore des cuivres dépend notamment de leur capacité à émettre un timbre cuivré au

« brillant » caractéristique. Ce timbre dépend lui aussi de la perce. En effet, la propagation de l'onde sonore nécessaire à l'effet cuivré est défavorisée lorsque la perce est conique ou évasée, si bien qu'un bugle, à perce majoritairement conique, sonnara avec beaucoup moins d'éclat qu'une trompette, dont la perce est plus cylindrique, alors qu'il a la même constitution et couvre la même échelle de sons – la même tessiture. Ainsi, les « cuivres doux » tels que les bugles et les saxhorns, instruments typiques des *brass bands*, orchestres composés uniquement de cuivres et de percussions, sont de perce à dominante conique, alors que les « cuivres clairs », comme la trompette et le trombone, ont une perce à dominante cylindrique.

## L'origine de la cuivrabilité

Quelles sont les causes physiques de la cuivrabilité ? Jusqu'ici, la description du résonateur relevait de l'acoustique dite linéaire : l'onde de pression ne s'y déforme pas au cours de sa propagation. Or les sons cuivrés obtenus lorsque le musicien joue fort ont une intensité très élevée à l'intérieur de l'instrument (jusqu'à 170 décibels). Leur propagation est alors non linéaire : le maximum de l'onde acoustique se propage plus rapidement que le minimum, et l'onde distordue peut aboutir à une « onde de choc », une variation brutale de la pression acoustique. De la déformation de l'onde, il résulte un enrichissement spectral par les harmoniques de rang élevé, qui se retrouve également dans le son rayonné à l'extérieur de l'instrument – où l'approximation linéaire redevient valide. Ces timbres caractéristiques sont souvent qualifiés de « sons cuivrés » par les instrumentistes, car perçus comme des sons métal-

## BIBLIOGRAPHIE

E. Poirson et al., *Integration of user-perceptions in the design process: application to musical instrument optimisation*, J. Mechanical Design, vol. 129, pp. 1206-1214, 2007.

J. Gilbert et al., *A simulation tool for brassiness studies*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 123, pp. 1854-1857, 2008.

G. Nief et al., *Influence of wall vibrations on the behaviour of a simplified wind instrument*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 124, pp. 1320-1331, 2008.

E. Poirson, *Thèse de doctorat*, 8 déc. 2005, disponible sur <https://hal.ccsd.cnrs.fr>

liques. Toutefois, deux cuivres de perces différentes n'ont pas la même aptitude à la cuivrabilité (voir la figure 2). Qui plus est, le lien direct entre la perce d'un cuivre et ses possibilités de créer des timbres cuivrés peut apparaître réducteur. En effet, un musicien chevronné peut toujours faire sonner son instrument plus ou moins « cuivré » en modifiant subtilement son masque. Et un instrument donné rendra plus ou moins facilement ce timbre selon l'instrumentiste.

## Les vibrations de parois

Que les cuivres soient caractérisés essentiellement par la perce du résonateur ne doit pas faire négliger le choix du matériau. En effet, celui-ci détermine la méthode de fabrication, le poids et l'équilibre, l'aspect et le prix de l'instrument. De plus, la surface interne du cuivre doit être très lisse pour limiter les pertes sonores par frottement contre les parois : un matériau possédant une surface interne rugueuse ou poreuse rend l'instrument plus difficile à jouer, voire injouable. Cette problématique pourrait être liée au vieillissement de l'instrument : on ignore encore s'il correspond à une perte de matériau avec le temps, ou s'il traduit un changement des caractéristiques de l'état de surface interne.

En outre, la question du rôle des vibrations des parois des cuivres et du rayonnement acoustique

qui en découle est un sujet de recherche actuel. Des expériences spectaculaires appliquées à d'autres instruments à vent, des tuyaux d'orgue à embouchure de flûte, ont été décrites voilà un siècle. Dans certaines conditions, que nous qualifions de « pathologiques », le tuyau d'orgue produit des sons particuliers, notamment une « note qui roule », traduisant un régime d'oscillation quasi périodique, à la place d'une note tenue et stable, de régime périodique (voir l'encadré page 55). Or, à l'occasion de la thèse de Guillaume Nief, nous avons pu reproduire ces expériences à l'Université du Maine. Ce travail nous a permis de décrire, de modéliser et ainsi de comprendre la production de ces sons atypiques. Ils proviennent de la perturbation de la colonne d'air à l'intérieur de l'instrument par le rayonnement interne des parois en vibrations. Le cadre théorique que nous avons décrit convient donc aussi pour ces sons pathologiques.

Cependant, une question reste ouverte : le matériau – au niveau du pavillon – joue-t-il un rôle dans l'émission du rayonnement sonore vers l'extérieur ? C'est une observation fréquemment rapportée par les facteurs d'instruments et les musiciens. Peut-être mettra-t-on un jour en évidence des situations expérimentales comparables à celles du tuyau d'orgue, des « pathologies » de cuivres qui produiront sans ambiguïté des effets sonores inédits dus aux vibrations de leurs parois... ■

## 🔗 SUR LE WEB

LAUM  
<http://laum.univ-lemans.fr/>  
IRCCyN  
<http://www.irccyn.ec-nantes.fr/>  
École de physique d'Édimbourg  
<http://www.ph.ed.ac.uk>  
Tout sur la trompette  
<http://la.trompette.free.fr/>  
Edinburgh University Collection  
of Historic Musical Instruments  
<http://www.music.ed.ac.uk/euchmi/>