

nous avons décalqué sur papier de riz les inscriptions figurant sur les tombes et sur les stèles. Nous voulons les comparer avec les inscriptions des dynasties suivantes.

Dans un premier temps, nous nous préoccupons des sites dont les vestiges sont directement accessibles. Des relevés sont complétés d'un repérage, d'une

description et d'un enregistrement photographique de tous les objets et monuments. Nous prenons notamment des paires de vues stéréographiques des sculptures. Grâce à des points de repère sur l'objet photographié, on peut exploiter les images de manière très fine (voir la figure 5). Les modèles tridimensionnels ensuite engendrés par ordinateur

permettent de déterminer les dimensions exactes des profils ou des reliefs. Nous cherchons aujourd'hui des méthodes automatiques de mise en correspondance des vues stéréoscopiques.

L'établissement de la carte générale des sites funéraires, qui couvrent quelque 15 kilomètres carrés avec leurs dépendances extérieures, est très long. Nous dressons des plans à une échelle comprise entre 1:100 et 1:5 000. Comme le relief naturel était à l'origine du choix des sites, nous notons les structures du paysage, complexe et parfois peu accessible.

Pour la réalisation de plans d'ensemble dressés à une échelle allant du 1:25 000 au 1:1 000 000, ainsi que pour les modèles tridimensionnels du terrain, nous exploitons des images par satellite (voir la figure 6). Quand les prises de vues réalisées par les satellites *Spot* et *Landsat* ne sont pas assez précises pour la réalisation de cartes avec indication de niveau de tous les points de repère, nous les combinons avec les relevés effectués par d'autres procédés.

L'étude archéologique et historique de monuments tels que ces sépultures de la dynastie Tang est d'autant plus urgente que ceux-ci sont progressivement dégradés par les précipitations acidifiées par les rejets industriels. La tâche de conservation devrait être facilitée par l'ouverture de la Chine.



Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz/Alexander Koch

**6. VUE D'ENSEMBLE DE L'ENCEINTE INTÉRIEURE** du domaine du Qiaoling. La photographie prise par satellite permet de reconnaître le massif montagneux auquel s'adosse le mausolée. La ligne rouge indique le tracé du mur d'enceinte ; l'entrée du tombeau à mi-pente de la montagne, les tours d'angle, les portes percées dans la muraille et le chemin de l'âme Sud sont également indiqués.



Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz/Alexander Koch

**7. ON N'A PAS ENCORE FOUILLÉ** les tombeaux des empereurs Tang, mais on pense qu'ils ressemblent aux tombes secondaires qui les accompagnaient et où reposaient la famille et les proches de l'empereur. Sur cette coupe d'un de ces tombeaux, on voit la rampe d'accès, venant du Sud, avec des puits d'aération, et le couloir horizontal qui conduisait à une antichambre, puis à la chambre mortuaire.

Alexander KOCH travaille depuis 1993 au Musée central romain-germanique de Mayence.

Alexander KOCH, *Untersuchungen zu tang-zeitlichen Kaisermausoleen in der Provinz Shaanxi (VR China)*, in *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz*, vol. 41, pp. 575-602, 1994.

Dietrich ANKNER, Gong QIMING et Uwe HERZ, *Chinesisch-deutsches Restaurieren in Xi'an*, in *Arbeitsblätter für Restauratoren*, vol. 28, n° 1, 1995.

Alexander KOCH, *Kaisergrabanlagen der Tang-Dynastie (618-907 n. Chr.) in der Provinz Shaanxi, VR China. Ein chinesisch-deutsches Forschungsvorhaben*, in *Archäologisches Nachrichtenblatt*, vol. 1, n° 2, pp. 205-210, 1996.

Jacques GERNET, *Die chinesische Welt*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main, 1987.

Roger GOEPPER, *Das alte China. Geschichte und Kultur des Reiches der Mitte*, Bertelsmann Verlag, Munich, 1988.

# Des instruments à vent harmoniques

JEAN-PIERRE DALMONT • JOËL GILBERT • JEAN KERGOMARD

*Les physiciens complètent le savoir-faire des facteurs d'instruments en étudiant la production du son dans les instruments à vent.*

**C**omment un musicien juge-t-il de la qualité d'un instrument à vent ? Divers éléments interviennent, y compris le passé de l'instrument, son utilisation éventuelle par un grand musicien, son aspect, voire son prix. Le maniement des clés, des pistons ou de la coulisse de l'instrument doit aussi être aisé pour chaque note. Toutefois, les qualités principales qui guident le jugement des instrumentistes à vent sont de nature acoustique : la justesse, le timbre et son homogénéité, et la facilité d'émission.

Au cours de l'histoire, les facteurs d'instruments ont acquis un savoir-faire pour répondre à ces attentes. Les physiciens peuvent comprendre les lois physiques sous-jacentes à l'art des facteurs et leur proposer de nouveaux outils : la caractérisation objective des qualités d'un instrument et la simulation numérique fondée sur la résolution des équations de l'acoustique permettent d'identifier des paramètres qui déterminent la justesse, la sonorité ou la facilité d'émission.

Si l'on admet que la hauteur perçue d'une note correspond à la fréquence fondamentale du son, ce qui est en général assez bien vérifié pour les instruments à vent, on estime la justesse en mesurant cette fréquence fondamentale. Pour une configuration donnée de l'instrument, la fréquence fondamentale est principalement imposée par ses caractéristiques acoustiques, mais pas uniquement : le musicien peut, en changeant la position et la tension de ses lèvres, faire varier la hauteur de la note jusqu'à un demi-ton. Plus généralement, chaque musicien apprend à compenser les défauts de son instrument. Le résultat musical est

donc plus révélateur de son talent que de la qualité de son instrument. S'il est donc relativement facile d'affirmer qu'un musicien joue juste ou faux avec un instrument donné, il est beaucoup plus difficile de savoir si l'instrument qu'il joue est juste ou non : il est tout aussi possible de jouer juste sur un instrument faux que de jouer faux sur un instrument juste.

Pour nous affranchir de cette difficulté, nous avons substitué à l'instrumentiste un système mécanique, une «bouche artificielle». Dans ce système, qui permet un fonctionnement réaliste de l'instrument, la mise en vibration de l'air est contrôlée par quelques paramètres seulement : la pression d'alimentation, la position et la pression d'appui des lèvres. Un autre dispositif expérimental permet de mesurer, à chaque fréquence, l'impédance acoustique de l'instrument proprement dit, c'est à dire l'amplitude de sa réponse acoustique à une excitation donnée. Les fréquences de résonance, qui correspondent aux notes jouables avec cet instrument, sont les fréquences des différents maximums de l'impédance.

Nous avons vérifié expérimentalement, puis par le calcul et la simulation, que, pour un instrument présentant plusieurs fréquences de résonance bien marquées, l'harmonicité de celles-ci (le fait qu'elles soient toutes des multiples entiers de la fréquence fondamentale) est la condition principale de la qualité acoustique. Si l'harmonicité est bonne, le jeu de l'instrumentiste est facile et le timbre de l'instrument est riche ; si l'harmonicité est faible, l'instrument reste jouable, mais de sonorité médiocre ; si elle est importante, l'émission de notes stables peut être impossible.

L'étude scientifique des instruments de musique ouvre aussi des champs d'exploration aux créateurs, facteurs et musiciens. Pour les bois, la perce de l'instrument (la forme de son tuyau) détermine à la fois sa justesse propre et ses autres caractéristiques acoustiques. Le cône et le cylindre ont été empiriquement sélectionnés par les facteurs comme formes de base de ces instruments. En nous fondant sur le critère d'harmonicité, nous avons découvert une famille plus générale d'instruments potentiels, dont nous avons vérifié qu'ils sont jouables.

## Son et harmonicité

Un son est une vibration de l'air perçue par l'oreille, sensible aux variations rapides de pression sur le tympan. Ces variations, si elles sont périodiques, sont interprétées par notre cerveau comme des «hauteurs», des notes. Cette notion subjective de hauteur est reliée à la notion objective de fréquence : à une hauteur donnée on associe une fréquence. Ainsi la note *la* jouée par le hautboïste pour accorder l'orchestre correspond à une fréquence de 440 hertz.

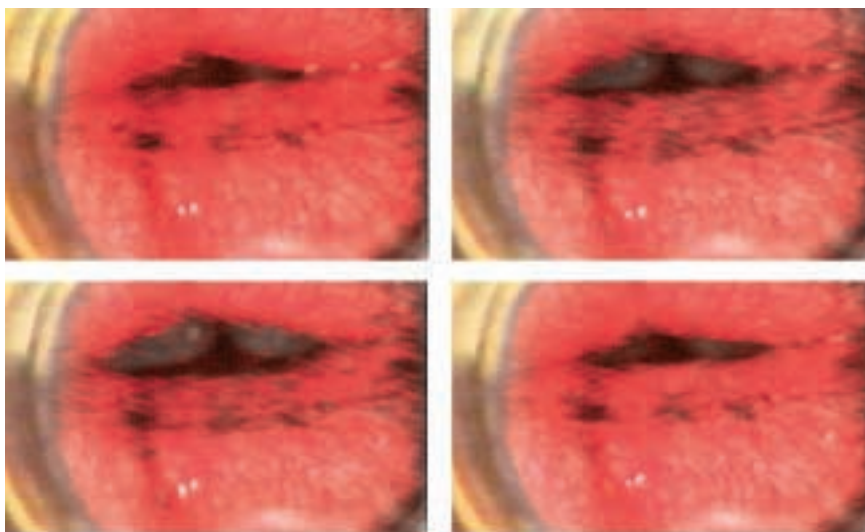
Qu'est-ce qui différencie un son d'un bruit ? En général, les bruits ne sont pas périodiques, et l'on ne peut pas leur associer de hauteur précise. Toutefois, un son n'est jamais strictement périodique : il devrait être d'une durée infinie. Il est en outre souvent possible de trouver une certaine périodicité dans un bruit. Une opération mathématique, nommée «transformation de Fourier», isole dans les variations temporelles de pression les fréquences émises. Un son périodique est caractérisé par un spectre de Fourier



Guy Le Querrec/Magnum

**1. L'INSTRUMENTISTE EXPÉRIMENTÉ** varie sa manière de jouer selon le résultat musical qu'il recherche. Il a appris à commander automatiquement et instantanément son instrument et la façon dont il l'embouche (tension des lèvres, pression d'air dans la bouche, appui de ses lèvres sur l'embouchure...). Il compense ainsi les

éventuels défauts des instruments. Pour caractériser objectivement ceux-ci et les comparer, nous avons mis au point une «bouche artificielle», système mécanique qui reproduit quelques paramètres de commande importants du musicien. Elle permet d'emboucher les instruments de façon reproductible.



**2. LES LÈVRES DU TROMBONISTE s'écartent et se referment alternativement (de gauche à droite et de haut en bas). Elles transmettent cette oscillation à l'air soufflé dans l'instrument. Lorsque la fréquence correspond à une fréquence de résonance de l'instrument, un régime permanent s'établit : la réaction acoustique de l'instrument sur les lèvres favorise l'oscillation de ces dernières, et la note est facile à émettre.**

harmonique, c'est-à-dire dont l'amplitude n'est non nulle qu'autour de fréquences multiples de la fréquence fondamentale, les harmoniques. Au contraire, dans le spectre des fréquences d'un bruit, toutes les fréquences sont présentes.

Dans la musique tonale occidentale, la combinaison des sons est régie par les lois de l'harmonie, grammaire musicale sur l'art d'associer les sons. Le point de départ du système est que l'on peut marier les sons... qui vont bien ensemble, c'est-à-dire dont la combinaison a un spectre harmonique. Ainsi, si l'on combine deux sons purs de fréquence 110 hertz et 220 hertz, le son résultant est de fréquence 110 hertz et son spectre est harmonique, donc agréable à l'oreille (il s'agit d'un *la* et de son octave). C'est ce que l'on fait depuis des siècles lorsque l'on fait sonner ensemble plusieurs tuyaux d'orgue, de son presque pur, dont les fréquences sont dans un rapport harmonique. Plus récemment, dans les premiers synthétiseurs à «synthèse additive», le son d'un instrument était reconstitué par la superposition de signaux sinusoïdaux dont les fréquences correspondaient aux harmoniques de la note fondamentale (les amplitudes relatives dépendant du timbre recherché).

Plus généralement, selon la théorie de la consonance de Helmholtz, deux notes se combinent agréablement si leurs fréquences sont dans un rapport numérique simple. On construit ainsi la série des intervalles musicaux,

du plus consonant au moins consonant : octave (fréquences dans un rapport 2/1), quinte (3/2), quarte (4/3), tierce majeure (5/4), tierce mineure (6/5). C'est à partir de ces intervalles qu'est définie la gamme dite naturelle (voir l'encadré page 82).

## Excitation et résonance

Dans un instrument à vent, le son est produit par la modulation temporelle du débit de l'air insufflé continûment par l'instrumentiste. Cette modulation est commandée par une oscillation mécanique auto-entretenu qui fait varier les dimensions de l'ouverture à l'entrée de l'instrument (oscillation de l'anche contre la table du bec de clarinette, oscillation des lèvres du tromboniste) ou par l'oscillation d'un jet de part et d'autre d'un biseau pour la flûte.

Lorsqu'un clarinettiste souffle faiblement dans son instrument, l'anche se déforme pour atteindre une nouvelle position d'équilibre, définie par ses caractéristiques mécaniques et par la différence de pression entre la cavité buccale et l'intérieur du bec : le débit sortant est constant et la clarinette n'émet aucun son. Si l'instrumentiste souffle plus fort, la différence de pression augmente et la réaction acoustique du tuyau sonore empêche l'anche de trouver une position d'équilibre. En mode de fonctionnement «normal», l'anche oscille périodiquement : sa fréquence fondamentale coïncide avec l'une des fréquences de résonance

du tuyau sonore. La hauteur de la note jouée (la fréquence fondamentale de l'oscillation) est donc contrôlée par l'instrument.

Dans le cas d'une embouchure de cuivre, les lèvres du musicien remplacent l'anche. L'instrumentiste commande mieux cet excitateur : il force plus facilement la vibration à des fréquences légèrement différentes des fréquences de résonance. Le registre suraigu est un cas extrême : le mouvement vibratoire des lèvres n'est pas asservi au tuyau sonore, mais au contraire il excite ce dernier en oscillations forcées. Le trompettiste ou le tromboniste font osciller leurs lèvres à la fréquence de jeu souhaitée sans l'aide de l'instrument de musique. Cette technique est connue sous le nom de «buzz», («l'abeille» pour le trompettiste, le «bourdon» pour le tromboniste).

Pour une position donnée des clés, des pistons ou de la coulisse (un doigté), un instrument à vent a plusieurs fréquences de résonance, caractéristiques des dimensions et de la perce du tuyau sonore. À chacune de ces fréquences de résonance correspond un régime d'oscillation périodique potentiel, une note potentielle. Pour que l'instrument soit juste, il est nécessaire que ces fréquences de résonance correspondent à des notes de la gamme. L'existence et le nombre de régimes jouables dépend de la forme de l'instrument, de la nature de la source sonore, et de leur couplage mutuel contrôlé par l'instrumentiste. Dans une configuration donnée du tuyau sonore, le musicien sait emboucher le bec ou poser ses lèvres de différentes façons pour jouer jusqu'à dix notes différentes dans le cas des cuivres ou, plus modestement, deux ou trois dans le cas des instruments à anche.

Naturellement, ces instruments peuvent jouer bien plus de deux ou trois notes : on modifie la forme de l'instrument (principalement sa longueur) à l'aide de trous latéraux, de pistons ou d'une coulisse. L'harmonicité des fréquences de résonance simplifie l'utilisation des instruments : une octave sépare le second régime du premier, et le même doigté permet donc de jouer les mêmes notes à des hauteurs différentes. Une exception toutefois pour la clarinette, dont les fréquences de résonance sont des multiples impairs de la fréquence fondamentale, et dont le second régime est plus aigu que le premier d'une octave et une quinte.

## Timbre et émission

En détériorant, de façon contrôlée, l'harmonicité d'un saxophone, nous avons montré les conséquences de l'inharmonicité des fréquences de résonance sur les qualités acoustiques de l'instrument. Un tube fermé de hauteur réglable, placé sur la partie supérieure de l'instrument, permettait de modifier la valeur des différentes fréquences de résonance.

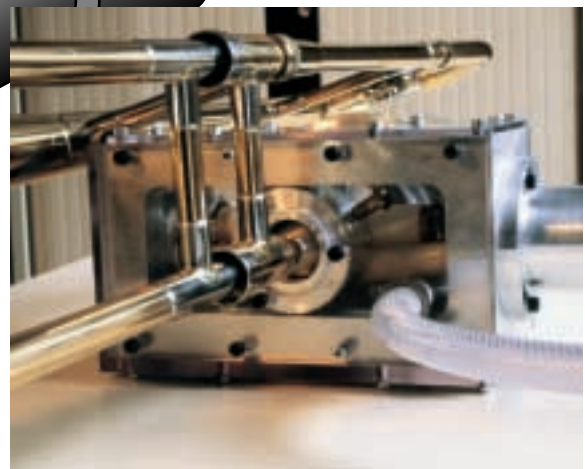
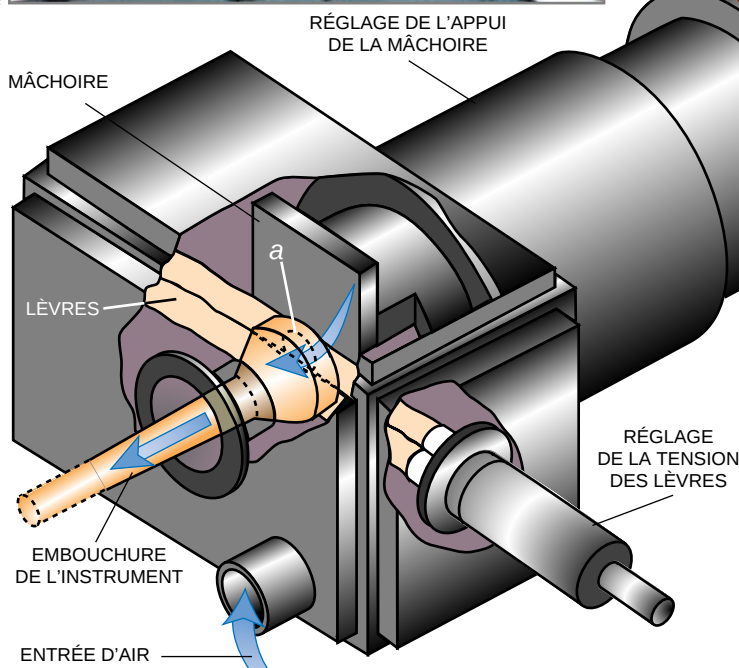
Une variation continue d'inharmonicité provoque un changement de timbre de la note émise : plus l'inharmonicité croît, plus le timbre de la note s'appauvrit. En effet, lorsque les fréquences de résonance ne sont pas parfaitement harmoniques, les harmoniques supérieurs de la note jouée

ne coïncident pas avec ces fréquences. L'oscillation est toujours possible, mais l'amplitude des harmoniques diminue, car ces fréquences ne sont plus favorisées par le résonateur : le timbre s'appauvrit. Avec le saxophone modifié, nous avons mesuré la diminution de l'amplitude du second harmonique à mesure que l'inharmonicité augmente (voir la figure 4).

Lors d'un chromatisme, enchaînement de toutes les notes demi-ton par demi-ton, sur une clarinette, on remarque ainsi que le timbre de certaines notes est différent de celui des notes voisines. L'exemple le plus marqué est le si bémol de gorge (nommé ainsi pour le distinguer de l'autre doigté permettant d'obtenir un si bémol dans le premier registre), dernière note du

premier registre de la clarinette, dont le timbre est très différent des autres notes de gorge (*sol* et *la*). L'émission de cette note nécessite l'ouverture d'un trou latéral de diamètre beaucoup plus faible que les autres, nommé trou de registre, dont la fonction première est de faciliter l'émission du second registre pour certains doigtés. L'ouverture de ce trou détériore l'harmonicité de l'instrument pour le doigté de *si bémol*.

Le musicien apprend à corriger ces hétérogénéités de timbre, notamment en embouchant différemment son instrument, mais elles sont clairement mises en évidence avec une bouche artificielle. On retrouve ce type de phénomène avec le hautbois, pour lequel les notes les plus aiguës du premier registre ont un timbre plus nasillard,



**3. GASTON LAGAFFE**, partisan du moindre effort, a-t-il précédé les physiciens dans l'emploi d'une « bouche artificielle » ? Dans celle mise au point par les auteurs et Jean-François Petiot, de l'École centrale de Nantes, le masque facial du tromboniste (*en haut, à droite*), est réduit aux lèvres, tubes de latex remplis d'eau placés à l'intérieur de la bouche (*dessin et photographie en bas*), et à une mâchoire qui les presse contre l'embouchure métallique de

l'instrument. Un trou (a) dans la mâchoire laisse passer l'air vers l'instrument à travers les lèvres. Un tel système permet de réaliser des expériences et des mesures inaccessibles avec un musicien : tenue de la même note pendant plusieurs secondes, conservation de paramètres de jeu d'une note à l'autre, mesures de pression et de vitesse à l'intérieur du bec ou de la cavité buccale, suivi du mouvement des lèvres.

conséquence d'une inharmonicité plus importante des fréquences de résonance, caractéristique des cônes tronqués courts.

L'harmonicité des fréquences de résonance est aussi nécessaire pour que l'instrument soit jouable, c'est-à-dire pour qu'un régime d'oscillations périodiques stable s'établisse. Lorsque les fréquences de résonance sont harmoniques, les résonances d'ordre supérieur sont compatibles avec le régime fondamental et elles favorisent son établissement. Par contre, lorsque l'inharmonicité est forte et que la valeur de l'impédance est du même ordre de

grandeur à plusieurs fréquences de résonance, plusieurs régimes périodiques incompatibles (inharmoniques) sont en compétition. Le résultat est une oscillation quasi périodique qui combine les différents régimes et dont le son est perçu comme un roulement. Nous l'avons vérifié avec le saxophone modifié, et simulé sur ordinateur : lorsque l'on dégrade l'harmonicité, le régime fondamental est de plus en plus difficile à émettre, puis bifurque vers une «note qui roule».

Enfin, l'harmonicité des fréquences de résonance est importante pour que la hauteur de la note ne dépende pas

trop de sa puissance. En effet, plus on joue fort, plus les pics d'impédance aux fréquences élevées interviennent dans l'oscillation.

## Des formes harmoniques

Le facteur d'instruments, qui veut fabriquer des instruments dont toutes les notes jouables sont justes, recherche un compromis entre la justesse des différentes notes d'un même registre, obtenues par l'allongement ou le raccourcissement de l'instrument, et l'harmonicité des différents registres pour chaque doigté. La théorie montre que les résonateurs qui remplissent ces conditions sont soit des cylindres, soit des cônes. Dans la pratique, les instruments à vent utilisés pour jouer la musique occidentale sont effectivement des cylindres, telles la flûte traversière et la clarinette, des cônes, tels le hautbois, le basson, le saxophone et certaines flûtes, mais aussi des associations de cylindres et de cônes, tels les cuivres, bien que cette géométrie satisfasse mal le critère d'harmonicité.

De toute façon, les fréquences de résonance des instruments réels ne sont jamais parfaitement harmoniques : tout écart par rapport aux formes théoriques du cylindre ou du cône est une source d'inharmonicité. Ainsi, pour les cônes utilisés avec une anche (hautbois, saxophone et basson), le remplacement de la pointe du cône par l'embouchure est une source d'inharmonicité : les fréquences de résonance ne sont harmoniques que si le cône est complet.

Nous avons confirmé et prolongé, par le calcul puis par la simulation, un résultat obtenu dans les années 1960 par Arthur Benade et Cornelius Nederveen : lorsqu'on fait varier la longueur du bec, on obtient une faible inharmonicité, tout à fait tolérable si le volume de ce bec est égal à celui de la troncature du cône. Un léger resserrement de la perce dans la partie supérieure de l'instrument diminue encore l'inharmonicité. Ce resserrement est effectivement réalisé par les facteurs de hautbois. Malgré cela, lorsque le cône est court relativement à la troncature, l'inharmonicité reste significative : nous avons vu que les dernières notes du premier registre ont un timbre plus pauvre sur ces instruments.

Dans le cas des instruments à trous latéraux, la présence de ces trous, même fermés, détériore l'harmonicité. Ce phénomène est compensé par la modifi-

## Qu'est-ce que jouer juste ?

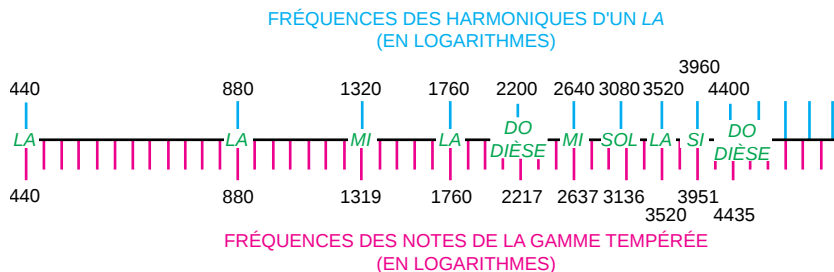
Une note n'est pas juste en elle-même, mais par rapport aux autres. On distingue la justesse harmonique et la justesse mélodique : lorsque plusieurs notes sont jouées simultanément, elles sont harmoniquement justes si leurs fréquences sont dans un rapport rationnel ; deux notes successives sont mélodiquement justes si leur relation correspond à la tonalité (notes de la gamme) dans laquelle ces deux notes interviennent. La justesse harmonique a des fondements physiologiques, tandis que la justesse mélodique est plus culturelle.

La justesse harmonique et la justesse mélodique ne sont pas toujours compatibles. Ainsi la nécessité pour les instruments à clavier de pouvoir jouer dans toutes les tonalités, incompatibles entre elles, implique de réaliser un compromis lors de l'accord : c'est ce que l'on appelle le tempérament. La plupart des intervalles sont alors harmoniquement faux, mais si le tempérament est bien réalisé, l'oreille accepte ce compromis.

Ainsi, pour le tempérament égal, on divise l'octave en douze demi-tons égaux : le rapport de fréquence entre l'octave et la note fondamentale étant 2, le rapport de fréquences

entre deux notes séparées d'un demi-ton est donc  $2^{1/12}$ . Ce tempérament est de qualité médiocre : tous les intervalles excepté l'octave sont faux relativement aux intervalles harmoniques (dont les rapports de fréquence entre les notes sont des quotients de deux entiers). Par exemple, une tierce majeure (deux tons) correspond à un rapport de  $(2^{1/12})^4$  dans la gamme tempérée, soit 1,2599, et de 5/4 dans la gamme harmonique, soit 1,25

Pour les instruments à vent, qui ne sont pas à son fixe, le problème du tempérament n'est pas aussi crucial : les musiciens adaptent la hauteur de la note, dans la mesure du possible, en fonction de son rôle musical. Toutefois, là aussi, un compromis est nécessaire. Pour que la note soit facile à émettre et que le timbre soit riche, l'inharmonicité doit être réduite au minimum : la succession des notes jouées pour un doigté est proche de la gamme naturelle, et viole ainsi le tempérament usuel. À l'inverse, si l'on veut respecter ce dernier, la succession des notes diffère d'une série harmonique, et l'instrument est difficile à jouer. En poussant le raisonnement à l'extrême, on pourrait donc affirmer : jouer juste ou facilement, il faut choisir !



Les fréquences des notes qui forment la gamme tempérée (en rose), sont régulièrement espacées sur une échelle logarithmique : l'octave est divisée en 12 demi-tons égaux. Les harmoniques d'une note (en bleu), ici la, correspondent, jusqu'au dixième, à peu près à des notes de l'échelle régulière, excepté l'harmonique 7 (sol), trop bas de 30 centièmes de demi-ton. L'écart pour la quinte (mi) est de deux centièmes de demi-ton, alors qu'il est de 14 centièmes de demi-ton pour la tierce (do dièse).

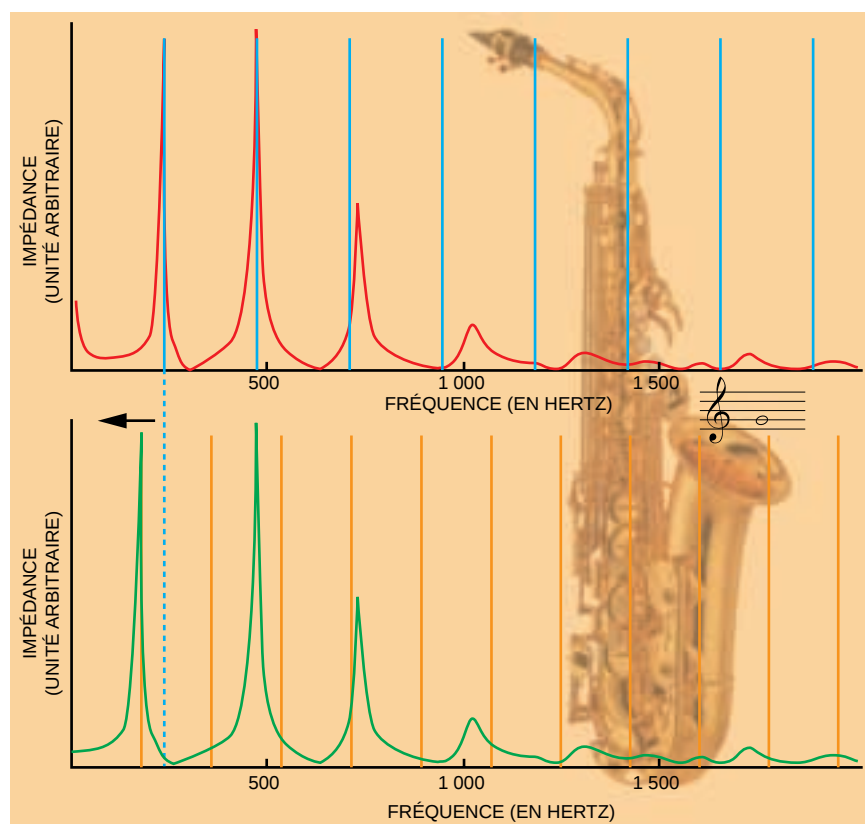
cation locale de la perce de l'instrument. Cela est réalisé sur certaines clarinettes dont la partie supérieure (le barillet) n'est pas cylindrique, comme le reste de l'instrument, mais légèrement conique. Nous avons observé avec différents modèles de clarinettes joués par une bouche artificielle, que 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-

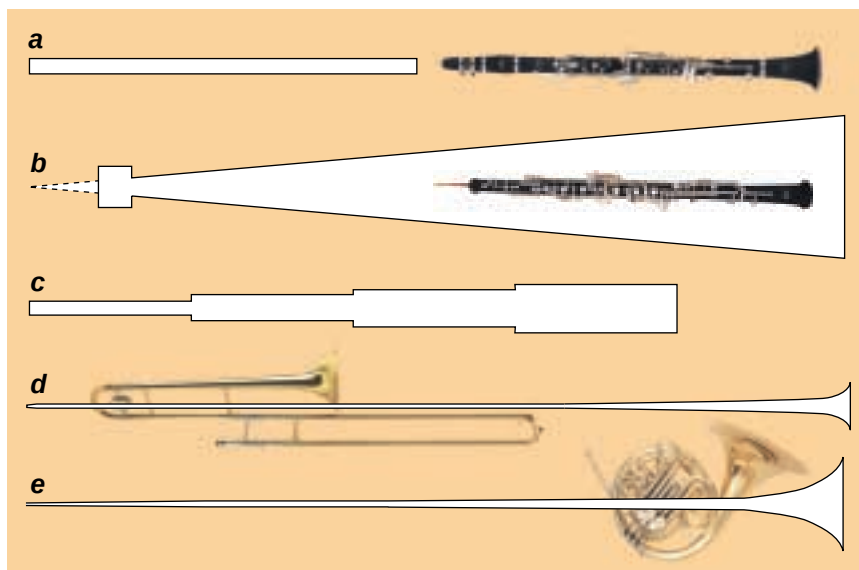


**4. LES FRÉQUENCES DE RÉSONANCE** d'un saxophone alto jouant la note *sol* grave sont celles où l'impédance acoustique (*en haut, en rouge*) est maximale. Alors que les fréquences harmoniques (*traits bleus*) de la note fondamentale en sont des multiples exacts, les fréquences de résonance sont légèrement 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

d'hui couramment utilisé par plusieurs facteurs pour prévoir la place et la dimension des trous. Nous avons aussi, en réalisant des calculs *a priori*, proposé des innovations que les facteurs n'auraient jamais imaginées : des tubes placés près de l'embouchure d'une flûte ou d'une clarinette permettent de jouer des quarts de tons, fréquents en musique contemporaine, sans doubler le nombre de trous.

Les calculs qui ont produit ces résultats ne prennent toutefois en compte que l'instrument seul, sans l'instrumentiste, et leur capacité prédictive ne concerne que la justesse des notes. En simulant les oscillations elles-mêmes, nous commençons à prévoir aussi la «qualité» des notes en termes de timbre et de facilité d'émission.

Au-delà, la compréhension du fonctionnement des instruments conduit vers une nouvelle synthèse musicale : on ne simule plus le son, mais la source du son. Les synthétiseurs sont commandés par des capteurs artificiels, donc par un véritable instrumentiste, ce qui produit des sons musicalement réalistes, c'est-à-dire évoluant avec des causes perçues comme «physiques». Là, ils se rapprochent du musicien, qui peut intervenir finement sur son instrument et réagir immédiatement sur le résultat obtenu. C'est cette interactivité et les micro-variations de justesse, de timbre, de phrasé qui permettent d'exprimer les émotions les plus subtiles.

Jean Pierre DALMONT maître de conférence, Joël GILBERT, chargé de recherche, et Jean KERGOMARD, directeur de recherche, travaillent au Laboratoire d'acoustique (UMR CNRS 6613) de l'Institut d'acoustique et de mécanique de l'Université du Maine, au Mans.

*Les instruments de l'orchestre*, Pour la Science, 1995.

H. BOUASSE, *Instruments à vent*, Librairie Delagrave, Paris, 1986.

N.H. FLETCHER et T.D. ROSSING, *The Physics of Musical Instruments*, Springer Verlag, New York, 1990.

*Mechanics of Musical Instruments*, sous la direction de A. Hirschberg, J. Kergomard et G. Weinreich, CISM Courses and Lectures No.355, International Center for Mechanical Sciences, Springer-Verlag, Vienne-New York, 1996.

C. NEDERVEEN, *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*, Northern Illinois University Press, De Kalb, Illinois, 1997.



Pour la recherche française, l'Amazonie n'est ni une terre inconnue, ni une mode passagère : la coopération scientifique franco-brésilienne s'est déployée en Amazonie depuis le début des années 80, et a obtenu des résultats significatifs, tant pour la connaissance de l'environnement que sur le type de développement - ou de non-développement - qui s'y produit.

Pour contribuer au «programme-pilote de préservation des forêts tropicales du Brésil», la France a choisi de favoriser le renforcement du partenariat ancien et précieux qui s'est progressivement construit entre sa recherche et la recherche brésilienne. Ce livre tire les premiers enseignements de l'effort spécial de coopération qui a été mené dans ce cadre.

code 1532 - 208 pages

Prix : 130F

Voir bon de commande p. 98



# La recherche d'images numériques

DAVID FORSYTH • JITENDRA MALIK • ROBERT WILENSKY

*Les programmes de recherche d'images repéreront les éléments spécifiques d'une personne, d'un lieu ou d'un objet dans les archives photographiques.*

**L**e réseau Internet et les bibliothèques numériques qu'il relie contiennent une profusion d'informations, mais la recherche d'une information précise et, en particulier, la recherche des images restent difficiles. Aujourd'hui, un utilisateur qui cherche une image aussi simple qu'un cheval au bord de l'eau ne trouve

son bonheur que si les images sur ce sujet ont été correctement légendées.

L'expérience acquise dans les principaux centres d'archives montre qu'il est impossible de prévoir toute les demandes. En outre, la réponse à chaque nouvelle question impose une nouvelle recherche complète dans la base de données. Si, ayant trouvé l'image d'un

cheval au bord de l'eau, on demande des images qui comprennent un cheval et de l'herbe, le réexamen de la collection entière est nécessaire.

Les utilisateurs cherchent des images dans des contextes variés et avec des objectifs différents : l'un demandera aux archives d'un musée d'art combien de fois une couleur par-



**1. LA RECHERCHE DE PHOTOGRAPHIES** à l'aide de programmes de recherche d'images est difficile, car le mécanisme de la reconnaissance d'un objet reste mal compris. Pour trouver une photographie de fleurs pourpres dans une base de données, un

utilisateur a utilisé un programme prototype de recherche sur des images et demandé les images contenant de petites taches violacées ; quelques-uns des résultats de cette recherche sont montrés dans la rangée supérieure. Beaucoup d'images trouvées