

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 1:100 000, 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.

Comment 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.

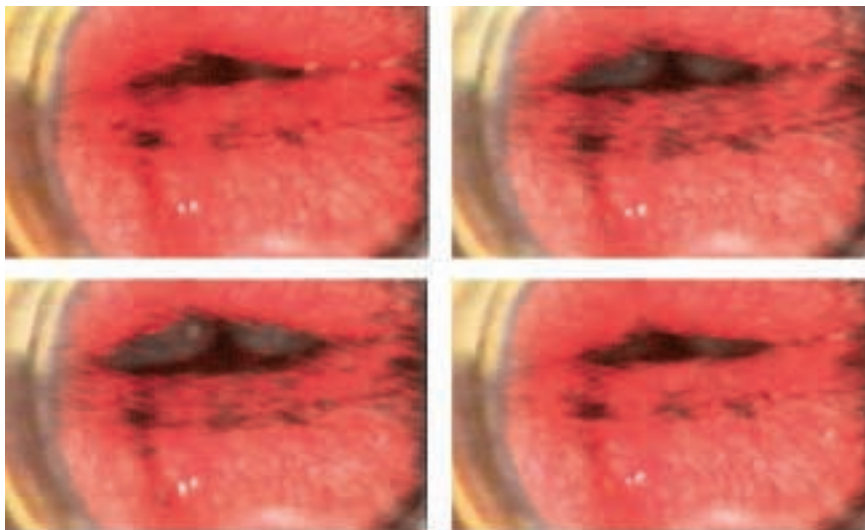
Qu'est-ce qui différencie un son d'un bruit ? En général, les bruits ne sont pas périodiques, et l'on ne peut pas leur associer de hauteur précise. Toutefois, un son n'est jamais strictement périodique : il devrait être d'une durée infinie. Il est en outre souvent possible de trouver une certaine périodicité 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.



Xavier Pelorson, ICP, Crous Grenoble

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.

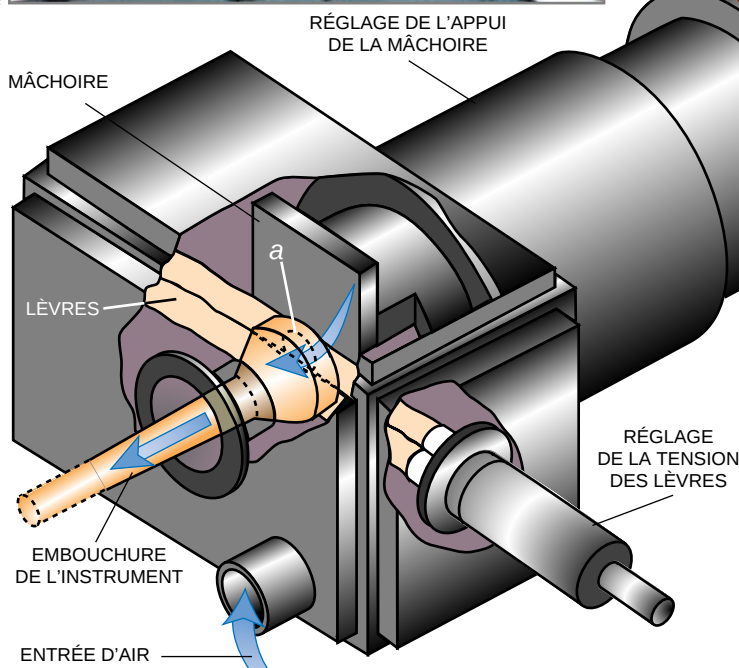
Une variation continue d'inharmonicité provoque un changement de timbre de la note émise : plus l'inharmonicité croît, plus le timbre de la note s'appauvrit. En effet, lorsque les fréquences de résonance ne sont pas parfaitement harmoniques, les harmoniques supérieurs de la note jouée

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.