

L'acoustique de la flûte

par Sébastien Balibar

Sébastien Balibar, chargé de recherches au CNRS, travaille actuellement au laboratoire de physique de l'École normale supérieure. Il est musicien amateur.



Roland Kirk, né à Columbus (Ohio) en 1935, était capable de souffler dans trois saxophones à la fois. Il était surtout l'un des grands flûtistes du jazz américain. Aveugle depuis l'âge de deux ans, il enregistra notamment un « We, Free Kings » (Nous, les rois libres) resté célèbre. (Cliché Christian Rose.)

- La flûte traversière, instrument simple en apparence, s'avère d'une grande complexité lorsque les scientifiques veulent comprendre son fonctionnement, sa sonorité, son mode de jeu.
- La nature de la turbulence du jet d'air excitateur, la forme de la tête et la disposition des trous sur l'instrument inventé par Théobald Boehm vers 1850 sont des problèmes que la science moderne vient seulement de résoudre. Elle dénonce, en passant, les erreurs d'appréciation commises couramment sur le rôle du matériau ou des résonances du corps humain dans la qualité du son.
- Après avoir justifié les découvertes empiriques des musiciens, les chercheurs pénètrent dans le monde des luthiers.

Comprendre la flûte, sa sonorité, les détails de sa forme et son mode de jeu. Le sujet, pour le scientifique, ne manque pas d'intérêt mais est difficile, bien que l'instrument, un des plus vieux et apparemment des plus simples que l'on connaisse, fasse partie de notre environnement quotidien: n'avons-nous pas tous, au moins une fois, sorti un son d'un bout de roseau creux ou d'une bouteille vide?

On ne peut pas dire que les scientifiques se désintéressent de la musique, au contraire. Bien sûr, la communication n'est pas simple entre ceux-ci, qui aiment

les raisonnements analytiques et objectifs, et les musiciens, dont les perceptions sont souvent subjectives et globales. Mais c'est précisément, sans doute, parce que les deux mondes de la musique et de la science sont si radicalement antagonistes qu'ils exercent l'un sur l'autre une telle attirance. Et, de fait, l'histoire de la physique est jalonnée d'incursions illustres en musique: Pythagore (ou Archimède?) jeta les bases de l'harmonie et Marin Mersenne, collaborateur de Descartes, celles de la théorie des cordes vibrantes; puis Bernouilli s'attaqua aux lois des tuyaux d'orgues et tout cela n'est

pas étranger au développement de la théorie des équations aux dérivées partielles. Savart a attaché son nom à la mesure des intervalles musicaux et construit un violon trapézoïdal resté célèbre. Non moins célèbres sont les résonateurs de Helmholtz et la « Théorie du son » de Lord Rayleigh.

Les préoccupations scientifiques des musiciens sont plus rares, mais parfois très nettes. Ainsi Théobald Boehm, inventeur de la flûte moderne, s'était construit un prototype démontable en seize morceaux pour mieux pouvoir ajuster la dimension et la place de chaque trou, par

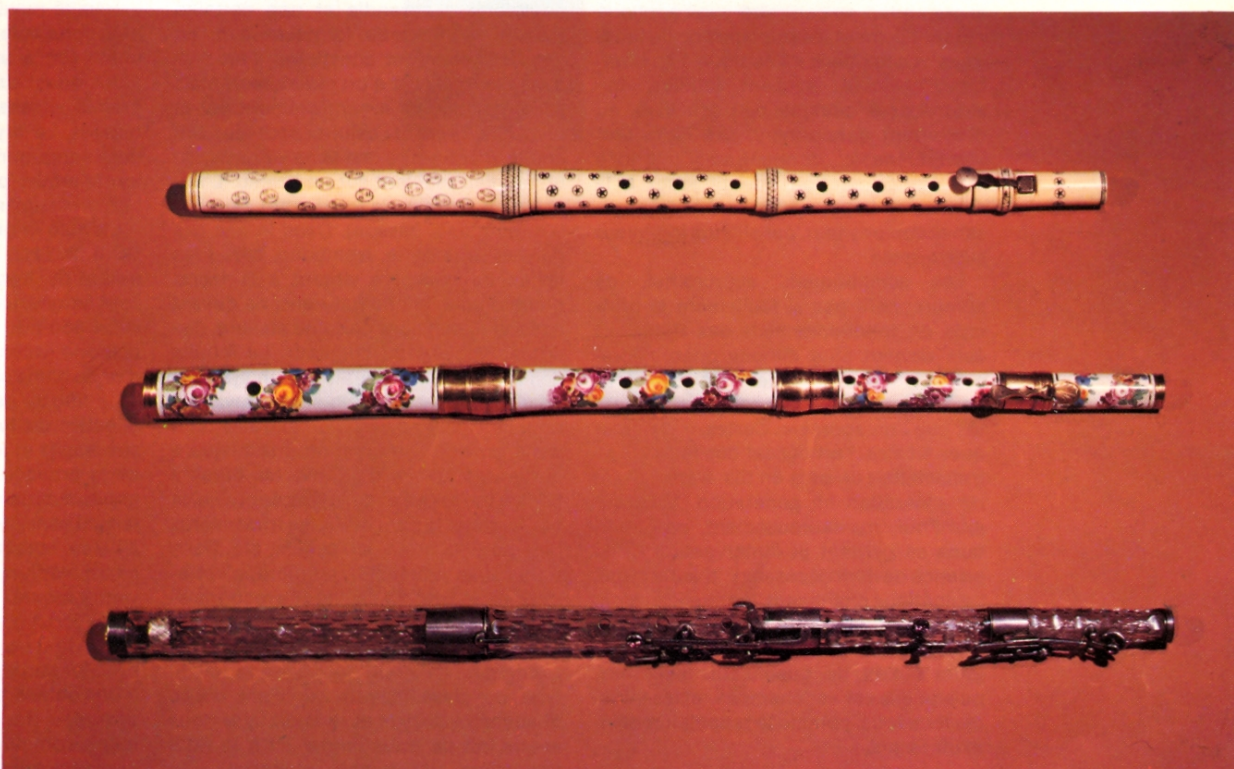


Figure 1. La tête des flûtes baroques (partie de gauche, percée du trou de l'embouchure) est cylindrique et leur corps (partie de droite) légèrement conique. Comme sur la flûte en ivoire gravé ci-dessus, les facteurs du XVIII^e siècle ne perçaient que sept petits trous et n'utilisaient qu'une seule clef, pour boucher le premier trou (RÉ) sur le pied. La flûte en porcelaine de Saxe est de la même époque. La flûte en cristal ornée d'améthystes date du début du XIX^e siècle, époque à laquelle les clefs fleurissaient de façon anarchique le long d'un tuyau dont la forme générale restait la même qu'au XVIII^e siècle. Le cristal a surtout l'avantage de nous montrer la place du bouchon, près de l'embouchure. Ces trois flûtes, ainsi que celles de la figure 6, font partie de la collection d'instruments anciens du musée du Conservatoire national de musique, à Paris. (Cliché Charmet.)

Comprendre le fonctionnement de la flûte, sa sonorité et son mode de jeu.

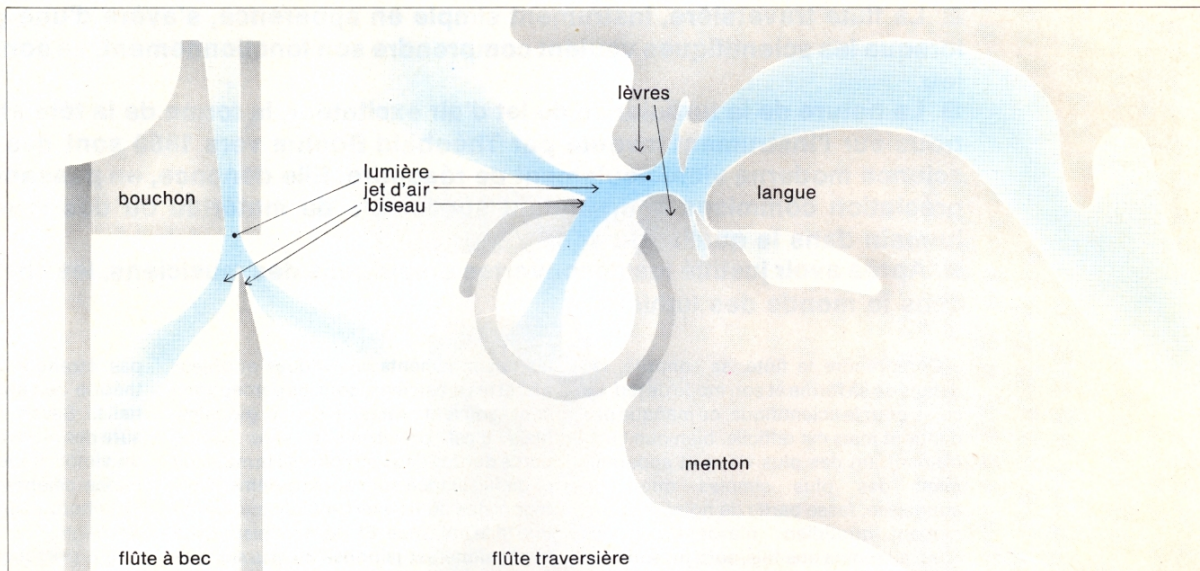


Figure 2. Le son est entretenu par un jet d'air incident sur un biseau, à la flûte à bec comme à la flûte traversière. Mais sur celle-ci, le flûtiste peut changer la position du biseau par rapport au jet. Il obtient ainsi de plus grandes possibilités de jeu.

essais et corrections successives. Mais il se défendait d'avoir fait œuvre empirique et prétendait, au contraire, avoir appliqué rationnellement les principes de l'acoustique et ceux de la mécanique. Les nombreux calculs, souvent inutiles, qui alourdissent quelque peu son livre, au demeurant passionnant, *Die Flöte und das Flötenspiel*, donnent ainsi une idée du rôle de caution que fit jouer à la science ce flûtiste virtuose, à la fois artisan et compositeur, par ailleurs ingénieur sidérurgiste.

Les scientifiques, aujourd'hui, ne comprennent pas si facilement le principe de fonctionnement des flûtes. Et cela devient plus difficile encore lorsqu'ils tentent de saisir les détails qui donnent à l'instrument et à son jeu des qualités que l'on apprécie. Certes, il y a quelques siècles, l'art délicat des facteurs se transmettait de père en fils, s'améliorant de génération en génération. Mais aujourd'hui, malheureusement, ces traditions se perdent et l'intervention de la science devient nécessaire, d'autant que, l'esthétique changeant, les musiciens ont de nouveaux besoins. Gageons que cela n'empêchera pas la flûte d'attirer toujours autant de qualificatifs excessifs, puisqu'elle est « enchantée », et les flûtistes tous fous, comme le rappelait récemment Fellini.

La flûte parmi les vents.

La tradition veut que Pan ait inventé la flûte en voulant séduire la nymphe Syrinx. En fait, mais peut-être après tout n'est-ce pas contradictoire, on a trouvé à Isturitz (Pyrénées) des flûtes en os datant du paléolithique (20 000 ans av. J.-C.).

Depuis ces temps immémoriaux, la famille des instruments à vent s'est considérablement agrandie et une certaine classification semble ici nécessaire. En général, tous sont constitués d'un système excitateur et d'un résonateur, mais ils se distinguent essentiellement par la nature du premier : celui-ci peut être une anche, c'est-à-dire une lame vibrante, ou un jet d'air incident sur un biseau. L'anche peut être simple (clarinette), ou double (hautbois, basson). Dans le cas des cuivres (trompette, trombone, cor...) les lèvres du musicien vibrent à la façon d'une double anche naturelle, ce qui est aussi vrai, dans une certaine mesure, des cordes vocales du chanteur. La famille des instruments qui utilisent un système jet d'air-biseau (appelés aussi « tuyaux à bouche ») est elle-même extrêmement vaste, puisqu'elle comprend la majeure partie des tuyaux d'orgues, les flûtes à bec de tous pays et de toutes époques, le ney, la flûte de pan, les flûtes traversières bien sûr, l'ocarina, les sifflets, etc. Dans tous ces instruments, le timbre, c'est-à-dire ce qui rend le son des uns reconnaissable de celui des autres, est essentiellement déterminé par la nature du système excitateur ; cela peut justifier à la fois le type de classification qui vient d'être ébauché ci-dessus et le choix que nous avons fait de nous limiter ici à la flûte traversière occidentale moderne, dite « flûte Boehm », que nous appellerons « flûte » pour simplifier.

On joue de la « flûte » en dirigeant avec les lèvres un jet d'air contre le biseau extérieur de l'orifice ovale pratiqué dans sa tête et appelé « embouchure » (fig. 2). Ce jet entretient une vibration résonante de

l'air du tuyau, qui est symétrique par rapport au milieu de l'instrument : à chaque extrémité ouverte, la pression est à peu près constante, égale à celle de l'atmosphère (on a un « nœud de pression »), alors que l'air peut entrer et sortir à grande vitesse (on a un « ventre de vitesse »). Le tuyau contient donc 1, 2, 3 demi-longueurs d'onde du son émis selon le mode (on dit aussi partiel) choisi par le musicien.

La note la plus grave de la flûte est le DO 3 (262 Hz) et correspond au premier partiel du tuyau lorsque tous les trous sont fermés. La vitesse du son étant d'environ 350 m/s, une telle fréquence correspond bien à une demi-longueur d'onde d'une soixantaine de centimètres.

Le flûtiste peut raccourcir la longueur effective du tuyau en ouvrant des trous successifs et jouer ainsi les douze notes de la première octave, appelée registre grave. Il obtient l'octave suivante en refaisant sensiblement la même chose mais à l'aide, cette fois, du second partiel (registre médium). Les parties 3 et 4 lui servent à monter dans l'aigu jusqu'au DO 6 (2096 Hz). Lorsqu'on dit que l'instrument « octave », cela signifie qu'en passant du premier partiel au second le flûtiste saute d'une octave, et cette propriété a le grand avantage de permettre l'utilisation des mêmes doigtés dans le médium et dans le grave (ce n'est pas le cas à la clarinette). Elle rend aussi l'erreur de partiel supportable à la flûte, alors que le « canard » à la clarinette est nettement plus redoutable (on dit que la clarinette « quintoise », elle passe en fait à la douzième supérieure, c'est-à-dire trois fois plus haut en fréquence).

La flûte a un son pur, du moins est-ce ainsi que l'on qualifie généralement son timbre. Nous allons voir que pour une fois un terme du langage musical a un équivalent simple en acoustique. Aucun son musical n'est « purement » sinusoïdal : tous sont, au contraire, constitués de la superposition d'un certain nombre de vibrations à des fréquences différentes. Ces fréquences sont souvent harmoniques, c'est-à-dire multiples entiers de la fréquence de l'une d'entre elles, dite fondamentale, qui détermine en général la hauteur du son. Et le spectre du son, c'est-à-dire sa décomposition en modes purs de fréquence donnée, constitue un élément essentiel du timbre et peut prendre des formes très variées. Les spectres des instruments à vent sont simples mais peuvent être plus ou moins riches en harmoniques (fig. 3). Or, celui de la flûte contient un fondamental prépondérant et des harmoniques peu nombreux dont l'intensité décroît à mesure que leur fréquence croît ; le son de la flûte est donc « pur » parce que proche d'une vibration « purement » sinusoïdale.

Mais le spectre en fréquence ne suffit pas, loin de là, à définir le timbre d'un son. Qui s'est déjà trompé de sens en voulant écouter la bande magnétique enregistrée d'un piano sait que le son, tout en gardant bien sûr le même spectre, se transforme en celui d'un violoncelle un peu geignant. L'autre élément essentiel du timbre est en effet le transitoire d'attaque, c'est-à-dire la façon dont le son évolue pendant les quelques millisecondes qui précèdent son établissement sous forme quasi stationnaire. On peut prendre le son enregistré d'un violon, couper tous les transitoires d'attaque et les remplacer par ceux d'une flûte, le résultat ressemble à un instrument à vent bizarre, de l'accordéon par exemple. Les transitoires d'attaque de la flûte sont parmi les plus longs des instruments à vent (30 à 40 ms), et sont caractérisés par l'entrée successive des harmoniques avec émission de bruit aigu (le chuintement appelé « bruit de souffle » par les musiciens et sur lequel nous reviendrons). Une flûte à bec se reconnaît d'une flûte traversière par ce même transitoire d'attaque qui est alors aussi court que celui des hautbois (environ 10 ms) et comporte un bruit moins aigu, superposé à certains partiels du tuyau (fig. 3). S'il fallait enfin reconnaître Philibert Jambe de Fer jouant sur sa flûte traversière vers 1550 d'un membre de la famille des Hotteterre ou de celle des Lot jouant sur une flûte baroque, ou de Théobald Boehm après 1847, le problème serait plus délicat. Boehm aurait certainement le son le plus intense et le plus riche. Mais il faudrait leur demander de jouer plusieurs notes, l'idéal serait une gamme chromatique : on verrait tout de suite que la flûte Boehm est la seule dont le timbre est homogène ; toutes ses notes

ont sensiblement même intensité et même richesse spectrale. Assez curieusement, la puissance et l'égalité de son furent précisément ce que l'on reprocha à la flûte Boehm à l'époque de son invention. Mais elle fut, en fait, très vite adoptée et provoqua l'éclosion d'une abondante littérature moderne pour la flûte. On comprend mieux toutefois l'origine de ces reproches, lorsqu'on réalise que les compositeurs baroques jouaient avec les défauts de leurs instruments, introduisant ainsi une variété dans le timbre qui donnait des effets musicaux particuliers.

Nous venons de situer la flûte parmi les

vents et d'en décrire rapidement le son et le mode de jeu. Mais l'esprit scientifique désire autre chose : comprendre le principe de fonctionnement et trouver si possible les raisons qui ont conduit à une forme plutôt qu'à une autre pour l'instrument.

Tourbillons et entretien du son.

Dans la flûte, comme dans tous les instruments à vent, la résonance de l'air est très amortie et a besoin d'être entretenue pendant toute la durée du son. Afin de comprendre ce premier point essentiel, l'entretien du son, il nous faudra réfuter

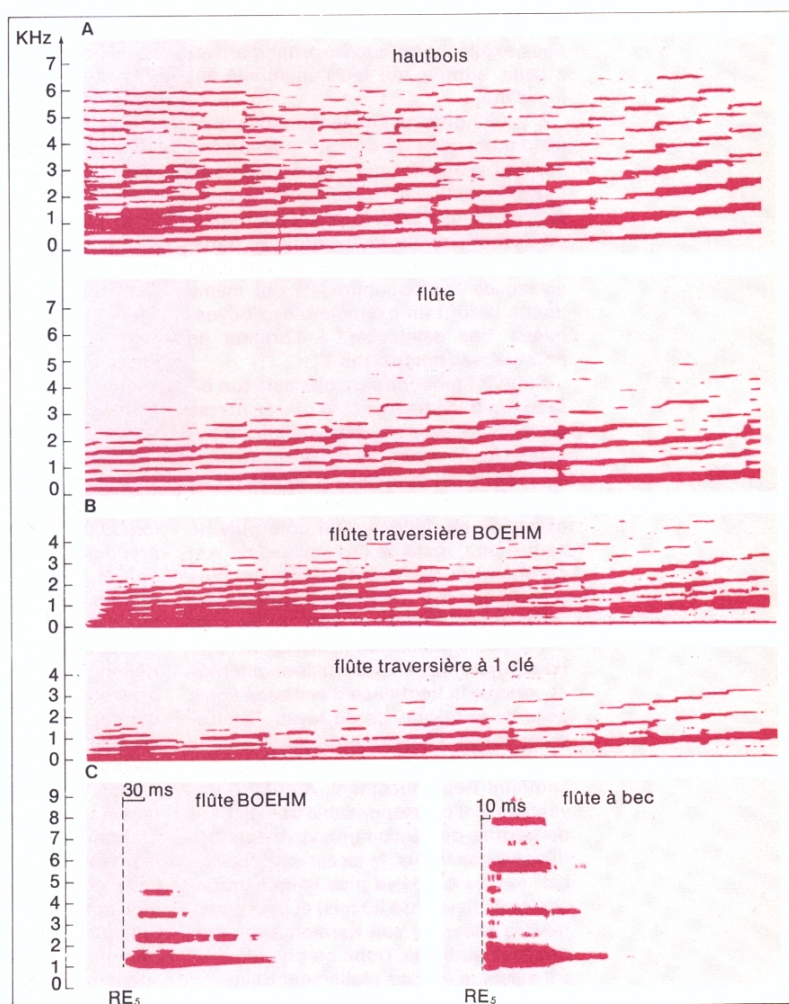


Figure 3. M. Castellengo⁽¹¹⁾ donne, grâce aux sonagrammes ci-dessus, une représentation graphique du timbre de quelques instruments à vent. Les sonagrammes sont des enregistrements du son, grâce à un système de filtres, en fonction du temps. L'épaisseur des traits étant reliée à l'intensité de chaque composante des sons, on obtient une image de l'évolution de leurs spectres en fréquence pendant le jeu (ici des gammes chromatiques). Le hautbois contient davantage d'harmoniques que la flûte (A). Le spectre de la flûte traversière Boehm est plus riche et surtout plus homogène que celui de la flûte baroque à une clef dont les notes sont de timbres très différents les uns des autres (B). Enfin le transitoire d'attaque de la flûte traversière est relativement long (~ 35 ms), avec entrée successive des harmoniques, alors que celui de la flûte à bec est court (~ 10 ms) et comporte un bruit provenant de l'excitation simultanée de certains autres partiels du tuyau. C'est la perception de tous ces détails qui nous permet de reconnaître un instrument d'un autre.

(1) Il ne faudrait pas croire par exemple ce qu'écrivit Sir James Jeans à propos de la flûte dans *Science et musique*, livre pourtant traduit par François Morin et Jacques Monod (Hermann, Paris, 1939).

Les raisons qui ont conduit à une forme de flûte plutôt qu'à une autre sont encore obscures.

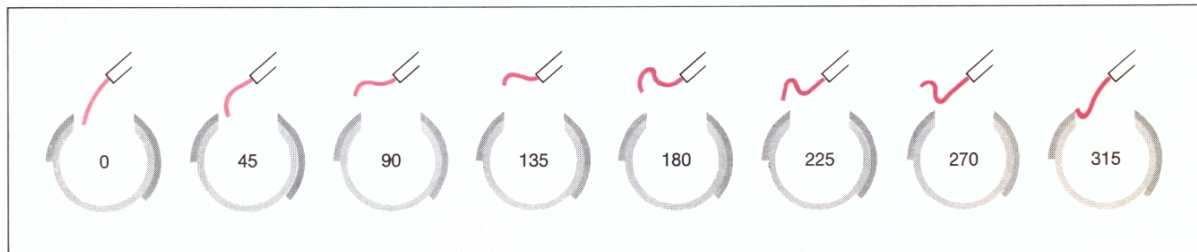


Figure 4. La déformation du jet d'air sur le biseau de l'embouchure a été étudiée par Z. Carrière dès 1925. Les dessins présentés ici ont été réalisés d'après un film en stroboscopie de J.W. Coltman.⁽⁹⁾ L'air, mélangé de fumée de cigarette, est soufflé par une bouche artificielle et la flûte résonne dans le cas présent à 437 Hz. Le décalage de phase entre les photos et la vibration sonore est indiqué par un nombre de 0 à 360°, et les huit croquis décrivent donc la forme approximative du jet pendant une période complète du son. On voit la déformation se propager de l'embouchure à la lèvre et revenir à son point de départ au bout de 360°, c'est-à-dire exactement en même temps que l'onde sonore.

deux explications fausses avant d'arriver à celle, subtile, qui fait l'unanimité aujourd'hui.

Il y a longtemps que les physiciens ne s'étonnent plus de voir un phénomène continu se transformer en phénomène alternatif, comme dans la flûte où la pression continue exercée par le diaphragme du flûtiste sur l'air qu'il souffle se transforme en vibration sonore alternative au niveau de l'embouchure. Ils ont même tous à l'esprit un exemple d'hydrodynamique très semblable, à l'origine de nombreuses confusions.⁽¹⁾

Si un jet rencontre un obstacle (un biseau, un fil en travers...) et que la vitesse de ce jet dépasse un certain seuil, l'écoulement laminaire continu devient instable au profit d'un écoulement plus compliqué. Celui-ci comporte l'émission alternative de tourbillons d'un côté puis de l'autre de l'obstacle (les « allées de von Karman »), à une fréquence d'autant plus grande que la vitesse du jet est élevée.

On pourrait donc se dire : le jet d'air dirigé par le flûtiste sur le biseau de l'embouchure émet des tourbillons alternés et, lorsque la fréquence d'émission égale celle de la résonance du tuyau, l'instrument sonne. On peut produire des sons selon un tel processus à la flûte à bec en soufflant très doucement. A la flûte traversière, il n'est responsable que du bruit de souffle qui accompagne le son des flûtistes imparfaits : le jet est mal focalisé, l'air sur les bords va plus lentement (au centre il atteint 10 à 20 m/s) et peut émettre des allées de von Karman à des fréquences audibles. Donc ce phénomène, s'il existe, n'est pas réellement utilisé en musique, ce qui lui a valu de la part de Bouasse le nom de « régime buccal » (par référence à la bouche des tuyaux d'orgue, non à celle du flûtiste) par opposition au « régime normal » qui est celui que l'on utilise « normalement ».

La deuxième explication est celle que donne Lord Rayleigh et qu'il attribue à Helmholtz :⁽²⁾ l'air vibre dans le tuyau et agit directement sur le jet qui, en entrant et sortant alternativement par l'embouchure, donne à la vibration l'énergie né-

cessaire pour compenser les pertes par frottements ou émission sonore. Le jet est ainsi une sorte de prolongement du tuyau, il réagit immédiatement, en entier et en phase, à la vibration de la colonne d'air dans la flûte. Cette explication n'est pas correcte.

Le principe de fonctionnement de la flûte, tel qu'on l'admet généralement aujourd'hui, est le suivant : l'action de l'air qui vibre dans le tuyau produit une déformation du jet au niveau du biseau. Cette déformation se propage vers les lèvres à une vitesse de l'ordre du tiers de la vitesse du jet et revient vers l'embouchure. Si elle arrive en phase avec l'onde sonore, la vibration s'amplifie et le jet entretient la résonance (fig. 4). C'est cette adaptation que le flûtiste ressent sur ses lèvres (il a l'impression que l'air résiste) lorsqu'il accroche bien sa note. On comprend que la relation de phase entre l'action et la réaction dépende de manière critique de la vitesse de l'air et de la distance lèvre-biseau. Ces deux paramètres n'apparaissent pas dans la théorie de Helmholtz. Rayleigh avait pensé pourtant à la bonne explication, mais à propos d'un aveau (ou chanterelle) utilisé pour chasser les oiseaux et constitué, comme les bouchons de certaines bouilloires sifflantes, de deux trous identiques percés face à face dans une petite boîte.

Le flûtiste adapte donc simultanément la pression de l'air (quelques millibars) et l'avancée des lèvres en fonction de chaque note qu'il joue. C'est bien sûr une difficulté pour le débutant, mais c'est surtout un avantage immense de la flûte traversière sur la flûte à bec où la distance lumière-biseau étant fixe ne peut être qu'un mauvais compromis, ce qui limite considérablement l'étendue du registre de l'instrument.

Cette déformation alternative du jet d'air fut observée dès 1925 par Z. Carrière⁽³⁾ qui fit de la stroboscopie sur un énorme tuyau d'orgue (50 pieds!). Le processus fut ensuite étudié par H. Bouasse, mesuré par J.W. Coltman, calculé par G.B. Brown⁽⁴⁾ et H. Sato.⁽⁵⁾ L'une des façons théoriques de traiter le pro-

blème consiste à définir une impédance acoustique du jet au niveau de l'embouchure, qui est le rapport de la pression acoustique produite à la quantité de mouvement alternative dudit jet. Cette impédance est une grandeur complexe, fonction à la fois de la pression du soufflé, de la distance lèvre-biseau, de la fréquence mais aussi de l'orientation exacte du jet par rapport au biseau. Ce dernier aspect, pourtant fondamental, n'a pas encore été étudié de manière systématique et nous nous contenterons de l'avoir mentionné.

Mais cette impédance a une autre propriété remarquable : elle dépend de l'amplitude de la pression du jet. Cela veut dire que des phénomènes non linéaires ont lieu au niveau de l'embouchure, les hydrodynamiciens s'en seraient douté. Or c'est très important : sans ces phénomènes non linéaires à l'excitation, le tuyau résonnerait sur un seul mode, non couplé aux autres, et le son n'aurait qu'une seule composante sinusoïdale, aucun harmonique. Les musiciens trouveraient un tel son pauvre, détimbré, « manquant de rondeur », comme celui des flûtistes débutants qui n'arrivent pas encore à imprimer à leur air une vitesse suffisante. La nature exacte des phénomènes non linéaires ayant lieu à l'embouchure est encore mal connue, et c'est d'autant plus regrettable qu'ils sont responsables d'une bonne partie du timbre de la flûte et que, d'après Y. Sawada,⁽⁶⁾ ils jouent un rôle essentiel dans la transition d'un mode à un autre.

Le mode d'entretien du son que nous venons de décrire est-il efficace ? Non, il ne l'est pas, surtout dans le grave : pour un LA 3 (440 Hz), J.W. Coltman estime que la puissance sonore émise ne vaut qu'un millième environ de la puissance disponible dans le jet. Si l'on peut très bien distinguer les aigus des flûtes dans les « tutti » d'un grand orchestre symphonique, c'est parce que la puissance émise croît comme la puissance cinquième de la fréquence, à ouverture de lèvres constante. Pourtant le bon flûtiste sait très bien jouer « piano » dans l'aigu et

(2) H. Helmholtz, *On the sensation of tone*, Dover, New York, 1954.

(3) Z. Carrière, *J. de Phys. et de Rad.*, 6^e série, p. 52-64, 1925.

(4) G.B. Brown, *Proc. Phys. Soc.* (London), 47, 703, 1935.

« forte » dans le grave. C'est que le mode de jeu est particulier et cela a des conséquences très importantes sur la forme de la flûte: elle n'est pas, en fait, vraiment cylindrique. Nous en arrivons ici à expliquer l'une des deux innovations majeures de Théobald Boehm.

La parabole de Boehm.

A la flûte, l'amplitude de la force excitatrice est directement proportionnelle à la pression du souffle et à la surface de la lumière formée entre les lèvres. Le flûtiste pourrait changer de registre en augmentant simplement la pression, mais la transition serait difficilement contrôlable et produirait une note aiguë de timbre et d'intensité très différents de la note grave. De plus, il ne pourrait jouer très longtemps dans l'aigu selon cette méthode sans perdre tout son souffle. Il préfère donc avancer (ou reculer) les lèvres, ce qui revient à changer trois paramètres à la fois: il augmente le recouvrement d'une partie de l'embouchure par la lèvre inférieure, il diminue la distance lèvre supérieure-biseau ainsi que la surface de la lumière entre les deux lèvres (fig. 5). Il peut contrôler ainsi, vite et bien, la transition par exemple de SOL 3 à SOL 4 et obtenir deux notes homogènes entre elles. Or, ce mode de jeu a une conséquence importante sur la justesse (ici de l'octave SOL 3-SOL 4).

En effet, la fréquence est déterminée par la longueur de la colonne d'air vibrante et cette longueur est légèrement supérieure (30 à 60 mm) à la longueur réelle du tuyau; c'est une longueur effective qui tient compte des « effets de bord » à chaque extrémité. La correction de longueur à l'embouchure dépend en particulier du degré de recouvrement de son orifice, et comme le flûtiste change ce recouvrement en jouant, il faut corriger cet effet en modifiant la forme du tuyau. Si l'on veut que cette modification vaille, quelle que soit la note jouée, il faut qu'elle concerne la tête de la flûte. Comme d'autre part couvrir davantage l'embouchure revient à augmenter la longueur effective (abaisser la fréquence), on aurait des octaves trop courtes si l'on ne rétrécissait pas la tête de la flûte ce qui produit l'effet inverse. Comme enfin il n'y a que deux formes de tuyaux dont les partiels sont harmoniques, et qui sont donc utilisables en musique occidentale traditionnelle, le cylindre et le cône, deux solutions principales s'offraient aux facteurs de flûtes, qui toutes deux ont vu le jour. La flûte baroque et le piccolo moderne ont une tête cylindrique et un corps conique convergents; la flûte Boehm a une tête grossièrement conique (dont le diamètre croît de 17 à 19 mm), puis un corps cylindrique (diamètre 19 mm). Dans les deux cas la tête est progressivement plus étroite que n'aurait été l'extrapolation vers l'embouchure de la forme du corps

de la flûte, mais la flûte baroque est plus étroite à l'extrémité qu'à l'embouchure et cela choquait le bon sens de Boehm, qui choisit donc la solution inverse. Il est vraisemblable qu'il pensait aux cuivres dont le son sort mieux par un pavillon évasé, mais ce n'est pas vrai de la flûte dont le son sort essentiellement de l'embouchure et du premier trou ouvert. L'un des avantages, que Boehm ne cite pas

mais que A.H. Benade explique, (7) est relié à la façon dont les musiciens s'accordent entre eux. Pour changer la hauteur de leur instrument, les flûtistes tirent ou poussent la tête dans le corps. Dans la flûte baroque, cela changeait aussi la justesse de l'instrument et exigeait un réglage conjoint de la position du bouchon qui ferme la tête près de l'embouchure. Boehm élimina ces inconvénients et fixa



Figure 5. Pour passer du grave (A) au médium (B) puis à l'aigu (C), les flûtistes avancent les lèvres. Ils modifient ainsi la surface de la lumière (donc la section du jet), la distance lumière-biseau et le degré de recouvrement du trou de l'embouchure par la lèvre inférieure (sans parler de l'orientation du jet ni de la pression de l'air). Un tel mode de jeu produirait des sons faux si la justesse n'était pas corrigée par le rétrécissement de la tête de l'instrument. La forme exacte de cette tête n'est ni tronç-conique ni parabolique, et varie d'un constructeur à l'autre. (Clichés Charmet.)

(5) H. Sato, *J. Fluid Mech.*, 7, 53, 1960.

(6) Y. Sawada et S. Sakaba, *J. Ac. Soc. Am.*, 67, 1790, 1980.

(7) A.H. Benade et J.W. French, *J. Ac. Soc. Am.*, 37, 679, 1965.

**T. Boehm trouva le nombre
et la position des trous de façon empirique.
Depuis, ils ont été confirmés par le calcul.**

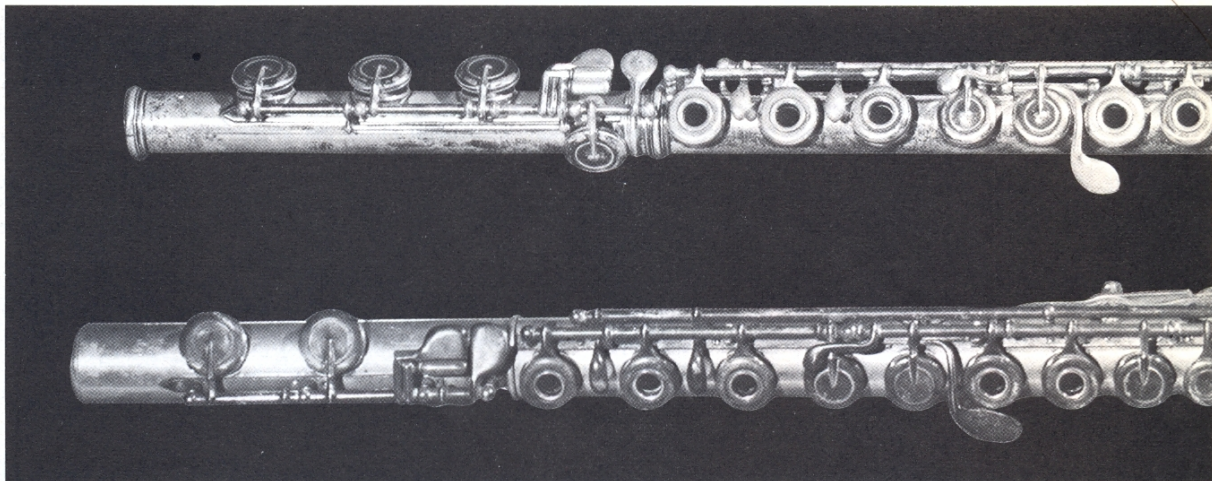


Figure 6. Ces deux flûtes en argent, qui datent de 1870 environ, ont été construites selon le système Boehm. Elles n'ont que peu de différences avec les flûtes actuelles. On distingue bien sur la moins oxydée (signée Louis Lot) la forme cylindrique du corps et celle, légèrement rétrécie, de la tête. On soude une plaque pour faciliter la pose des lèvres et pour augmenter l'épaisseur de la paroi au niveau du trou de l'embouchure. Grâce à un ingénieux système de clefs et d'axes, on actionne avec neuf doigts des plateaux qui peuvent boucher quinze grands trous (~ 13 mm) surmontés de petites cheminées. La nouvelle forme du tuyau et le nouveau système de clefs sont les deux inventions majeures qui permirent à Théobald Boehm de donner à la flûte moderne une sonorité ample, juste et homogène. (Cliché Charmet.)

le bouchon à 17 mm de l'embouchure. Cela lui permit d'obtenir des partiels justes, donc à la fois d'enrichir le timbre de l'instrument et de supprimer différents craquements indésirables qui pouvaient apparaître dans le jeu des octaves.

La forme des têtes de flûtes est une occasion de retrouver les rapports curieux que Boehm entretenait avec la science. Il prétendait que leur forme était parabolique. Une coïncidence aussi remarquable aurait dû avoir une justification théorique simple. Or Boehm avoue, là encore, avoir travaillé empiriquement. Pire, la tête Boehm, bien que légèrement concave par rapport à un cône, n'est pas parabolique du tout! Mais l'image était belle et cela suffisait à cet homme remarquable, dont on peut discuter les qualités de compositeur ou de physicien mais certainement pas le génie inventif.

Des grands trous et des tringles.

La deuxième grande innovation de Boehm concerne la perce des trous dans le tuyau. Supposons que nous voulions percer un premier trou dans une flûte en bambou que nous serions en train de construire, afin de pouvoir jouer un RÉ ou un DO selon que le trou serait ouvert ou fermé. Nous pourrions, en principe, le percer n'importe où dans la deuxième moitié du tuyau, à condition de lui donner un diamètre plus ou moins grand. Et la raison est simple : un trou ouvert ne provoque un nœud de pression franc à l'endroit où il est que s'il est suffisamment grand, c'est-à-dire d'un diamètre voisin de celui de la perce du tuyau lui-même.

Plus il est petit, plus l'air continue à vibrer loin en aval, plus la longueur effective de la colonne d'air vibrante est donc supérieure à la longueur embouchure-trou ouvert. Mais nos mains n'ont pas, elles, n'importe quelle forme, et si l'on veut jouer le MI et le RÉ avec deux doigts adjacents il va falloir choisir des diamètres de trou qui permettent de percer en des endroits voisins, d'une part, et qui ne soient pas trop grands, d'autre part, si l'on veut pouvoir les boucher correctement. Des trous trop petits, enfin, donnent un son faible, ce que l'acousticien comprend bien en pensant qu'une cavité résonante, pour avoir un grand facteur de qualité, exige des conditions aux limites franches. Le problème se complique de manière sensible si l'on veut un instrument chromatique : une gamme chromatique a douze demi-tons et nous n'avons que dix doigts dont au moins un ou deux sont nécessaires pour tenir l'instrument.

Ce problème difficile fut résolu tant bien que mal par les facteurs baroques : la conicité du tuyau raccourcissait la longueur nécessaire de l'instrument (qui, malgré tout, ne descendait que jusqu'au RÉ 3) et permettait de rapprocher les trous entre eux.⁽⁸⁾ Ceux-ci étaient souvent coniques (la paroi était évidée à l'intérieur), ce qui donnait un diamètre effectif plus grand que le diamètre réellement bouché par le doigt. Les flûtes baroques à une clef n'avaient que sept trous et Hotterterre, en 1707, jouait par exemple FA dièse 3 en ouvrant les trois derniers trous mais, pour jouer FA 3, devait reboucher les deux derniers tout en gardant le troisième ouvert. C'est ce qu'on appelle un doigté de fourche. Ces doigtés, compli-

qués, limitaient considérablement la vitesse d'exécution et produisaient des sons d'un timbre relativement pauvre.

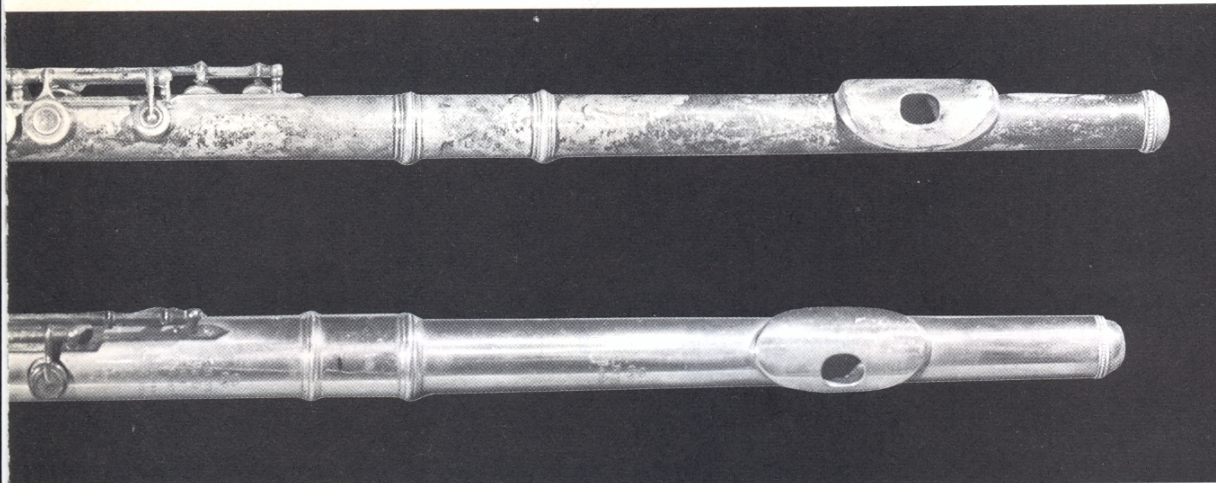
Boehm, très conscient de l'avantage des grands trous pour l'obtention de sons intenses, décida qu'il en percerait le nombre nécessaire (15), du diamètre requis (~ 13 mm), estimant qu'il trouverait bien ensuite une méthode pour les boucher de façon adéquate (fig. 6). Il trouva chacune de leurs positions de façon empirique, mais récemment J.W. Coltman a entièrement calculé les fréquences de résonance des flûtes, ce qui n'est pas facile car il faut, bien sûr, tenir compte de tous les détails de leur forme (y compris la hauteur des cheminées, l'angle d'ouverture des plateaux...).

Le résultat est un instrument dont le son est riche, puissant et homogène. Son jeu est grandement facilité par la disparition des doigtés de fourche, mais ceci n'est vrai que dans les deux premières octaves. En effet, Boehm n'a réussi à étendre le registre des flûtes sur trois octaves qu'au prix d'un compromis, seul défaut de son œuvre.

Le défaut du système Boehm et les multiphoniques.

Ainsi que nous l'avons vu, le rétrécissement de la tête sert à corriger la justesse de l'instrument, mais il n'est utile que sur deux octaves : au-delà de 1 000 Hz il produit l'inverse de l'effet désiré. La solution consiste alors à modifier les doigtés de la troisième octave : en ouvrant des trous légèrement au-dessus d'un nœud de pression de la colonne vibrante, on force la position de ce nœud vers la tête de l'instrument et on remonte

(8) M. Castellengo, F. Drouin et P. Sechet. Bulletin GAM n° 97, Paris 1978. Il est difficile de se procurer ces bulletins. On peut essayer chez : « Le droit chemin de musique », 5, rue Fondary, 75015 Paris ou « La Flûte de Pan », rue de Rome, 75009 Paris. (9) J.W. Coltman, *The Instrumentalist*, 62-65, 5 mai 1977. (10) P.Y. Artaud et G. Geay, *Techniques contemporaines pour la flûte*, éd. Jobert Transatlantiques.



la fréquence. Ce rôle est souvent joué par le treizième trou (DO dièze 4) dont la place est donc issue d'un compromis entre le désir de jouer des DO dièzes justes et celui de corriger la troisième octave. Cette note est légèrement trop aiguë. Mais, bien qu'un système un peu différent ait été proposé par J.W. Coltman,⁽⁹⁾ les musiciens, qui n'aiment pas changer leurs habitudes, continuent d'adapter leur jeu au seul défaut apparent du système Boehm (fig. 7).

Revenons toutefois au jeu de ce registre aigu : on y réutilise des doigtés de fourche, puisque certains trous sont refermés après le premier trou ouvert (fig. 5). Mais en général on a deux parties différentes du tuyau qui résonnent à la même fréquence, ou à deux fréquences harmoniques, et qui se renforcent donc l'une l'autre pour donner un son unique et intense. Cependant plusieurs parties du tuyau, en résonnant à des fréquences différentes, peuvent produire de véritables accords à plusieurs notes. C'est ce que l'on appelle aujourd'hui des sons multiphoniques, depuis qu'ils ont été redécouverts en jazz (est-ce par John Coltrane, vers 1960 ?) et en musique dite « contemporaine ». De plus en plus utilisés, ces multiphoniques à la flûte viennent de faire l'objet d'une classification exhaustive⁽¹⁰⁾ et de recherches particulières à l'IRCAM (en particulier⁽¹¹⁾ sur le difficile problème de leur notation). On peut les ranger en deux grandes catégories selon qu'ils donnent lieu à un son stable, superposition de plusieurs fréquences (harmoniques ou anharmoniques), ou à un son instable résultant de l'alternance entre plusieurs régimes de l'instrument. Nous n'entrerons pas plus avant dans les détails. Il est toutefois intéressant de remarquer que, pour produire un multiphonique, il faut trouver un mode d'excitation qui satisfasse deux résonances différentes. Or, si ces résonances sont trop pointues (si leur facteur de qua-

lité est trop grand), il sera difficile de leur trouver une zone d'excitation commune. Dans la flûte conçue spécialement à l'IRCAM pour l'obtention des multiphoniques, on a donc réduit la dimension des trous, ce qui, nous l'avons vu, a comme conséquence de ne pas stopper complètement la vibration sonore au niveau du premier trou ouvert et de lui permettre d'exciter, par exemple, une autre résonance dans la suite du tuyau. Ainsi est-on en train, grâce aux doigtés de fourche et aux petits trous, de retrouver certaines caractéristiques des flûtes baroques, où des multiphoniques à régime instable étaient même explicitement utilisés pour le jeu de certains trilles. Nous ferons une dernière remarque à ce sujet : certaines flûtes chinoises sont percées vers le bout de quelques trous inaccessibles aux doigts qui ne servent nullement à accrocher des pompons comme certains le croient. Le « bout mort » ainsi constitué résonne faiblement et participe au timbre de l'instrument. Nous venons de tenter d'expliquer comment on excite le son d'une flûte et comment on joue les différentes notes. Nous pourrions nous arrêter là. Nous ne voudrions pas cependant conclure sans avoir mentionné quelques faux problèmes et détruit quelques mythes.

Mythes et faux problèmes.

Commençons par le rôle du matériau. J.-P. Rampal écrit :⁽¹²⁾ « Doté d'une certaine vitesse, [le souffle] se brise sur le biseau de l'embouchure, et les molécules d'air ainsi projetées dans le tube font vibrer le métal de l'instrument. Cela contrairement à ce que certains traités d'acoustique un peu primaires ont soutenu parfois, prétendant qu'il n'y avait aucune influence de la matière sur la vibration. Ce qui est totalement faux !... » Au risque de paraître « primaire », nous répétons donc que les différences de son sont produites par des différences de

forme ou de jeu de l'instrument. C'est bien l'air qui vibre. Le matériau ne produit aucune vibration audible sauf s'il est aussi flexible que du papier et produit des effets de type mirliton.

Savart, en 1825, ne s'y trompait déjà plus.⁽¹³⁾ Bien sûr certains matériaux, plus faciles à travailler, peuvent permettre mieux que d'autres l'obtention de formes précises. D'autres sont plus ou moins résistants aux chocs et aux éraflures, plus ou moins oxydables, hydrophiles ou faciles à polir, ce qui peut influencer sur l'état de surface interne de la flûte donc sur le rendement de celle-ci. Boehm lui-même prétendait que le métal sonnait à la manière de celui des cloches (qui ne sont pas en argent, à propos). Il considérait donc avec attention les poids de ses instruments, dont il donnait les valeurs avec trois chiffres significatifs, mais sur lesquels il se trompa d'un bon facteur deux. Il est beaucoup plus raisonnable de remarquer qu'il n'aurait pu installer une tringlerie aussi complexe sur une flûte en bois, et de penser qu'il choisit l'argent parce qu'il s'oxyde peu et que, comme tout bon artisan réalisant un authentique chef-d'œuvre, il préférerait travailler un métal précieux.

On peut se demander, de manière plus sérieuse, si la nature du matériau peut jouer un rôle sur la température du tuyau, par conséquent sur la qualité de l'instrument. Dans une flûte, pendant qu'on en joue, la température varie effectivement d'environ 30 °C au niveau de l'embouchure à environ 25 °C à l'autre bout. La vitesse du son dans l'air varie comme la racine carrée de la température, mais un changement de cette dernière provoque aussi un changement d'hygrométrie dont il faut tenir compte. Un échauffement uniforme produit donc une augmentation générale de la hauteur du son. Mais Coltman a montré que même une variation linéaire de température d'un bout à l'autre de l'instrument ne modifie pas les oc-

(11) M. Castellengo, IRCAM à paraître.

(12) J.-P. Rampal, *La Flûte*, Denoël. Les erreurs que nous soulignons sont loin d'être les seules dans ce livre, écrit pour les adolescents, qui aurait dû faire l'objet d'une plus grande rigueur.

(13) F. Savart, *Annales de chimie physique*, t. XXX, p. 73, 1825.

**Le but des physiciens
n'a jamais vraiment été d'améliorer la flûte
avant tout faite pour et par des musiciens.**

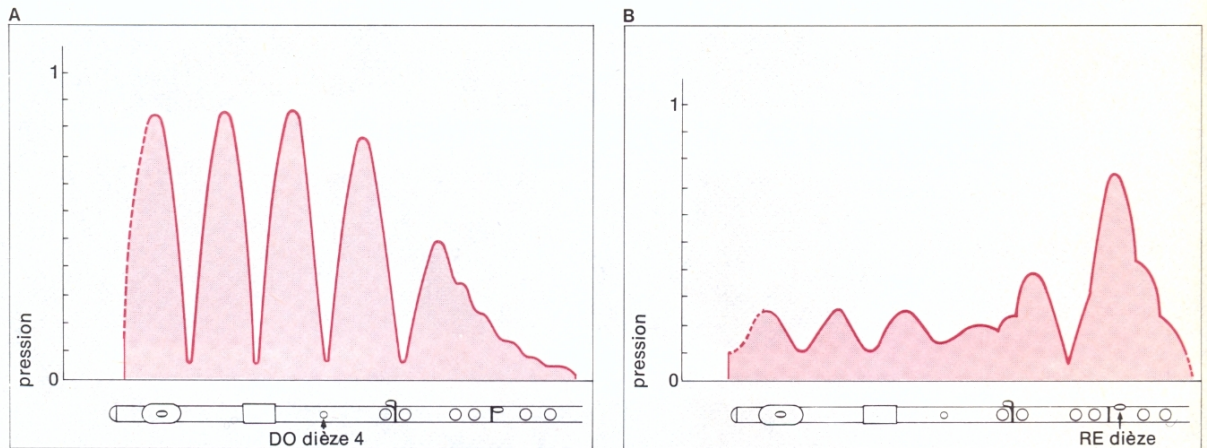


Figure 7. J.W. Coltman a calculé ⁽⁹⁾ le profil de la pression oscillante dans la flûte traversière pour chaque doigté. Le cas A est celui de la note LA 5 (1760 Hz). Seuls les trous ouverts ont été dessinés sur la flûte qui définit l'échelle de longueur de l'axe horizontal. L'axe vertical est celui de la pression dont les ventres et les nœuds correspondent respectivement aux maxima et aux minima de la courbe. On a une demi-longueur d'onde entre deux extrema voisins. Ce cas est celui d'un doigté de fourche dans lequel on a ouvert le trou de DO dièze 4 pour relever légèrement la fréquence du quatrième partiel joué ici. La vibration sonore est déjà intense au niveau de l'embouchure, où la correction de longueur effective vaut environ un quart de longueur d'onde. Les vibrations dans la première partie du tuyau (trois demi-longueurs d'onde) et dans la seconde (une demi-longueur d'onde) se renforcent l'une l'autre pour produire la même note. Dans la dernière partie, la pression chute peu à peu à chaque nouveau trou ouvert, mais la vibration est appréciable jusqu'à l'extrémité. Le cas B montre l'importance de cette dernière partie du tuyau (le « bout mort ») : on a refermé le trou de RÉ dièze dans une région pourtant éloignée du premier trou ouvert, mais on a créé ainsi une cavité acoustique de relativement grand facteur de qualité qui absorbe l'essentiel de l'énergie sonore. La résonance de la première partie du tuyau est considérablement atténuée et la note LA 5 est difficile à jouer, effectivement, avec ce doigté pourtant peu différent du bon.

taves ni le timbre dans le cas de la flûte où la résonance de l'air est symétrique. Il est donc vraisemblable que la nature du matériau ne joue un rôle que psychologique dans l'esprit du musicien.

Le rôle du couplage éventuel des résonances de la flûte à celles du corps humain est plus intéressant. On peut se demander en particulier quel est le rôle de la cavité buccale : le timbre clair caractéristique de la voix d'un chanteur d'opéra tient à la présence, vers 2 à 3000 Hz, c'est-à-dire dans la zone de sensibilité maximale de l'oreille, d'un formant caractéristique des résonances de l'air entre le larynx et les dents.⁽¹⁴⁾ Mais les harmoniques du son de la flûte ne sont pas plus intenses dans cette zone de fréquence qu'ailleurs, au contraire. Et si les professeurs enjoignent à leurs élèves de jouer « avec de l'air dans la bouche », c'est pour faciliter le passage de celui-ci et l'établissement de la pression en décontractant le larynx, plus que pour créer les conditions d'une quelconque résonance de la cavité buccale. Nous voulions donc préciser ces quelques points qui ont donné lieu à trop d'erreurs et de confusions.

Science et musique.

Comme nous l'avons vu, les chercheurs de ces vingt dernières années se sont surtout attachés à comprendre le fonctionnement de la flûte, les raisons de sa forme, de sa sonorité, de son mode de jeu. Le but, pour eux, n'a jamais été vraiment d'améliorer l'instrument. La flûte n'est pas le cor, seul instrument de l'orchestre symphonique sur lequel même

les professionnels ont le droit de faire un couac de ci de là. La flûte est un instrument que Boehm avait amené empiriquement à un haut degré de perfection, bien qu'en fonction d'une utilisation musicale très spécialisée. Certains des chercheurs dont nous avons cité les noms seraient sans doute capables d'aider à la conception d'instruments nouveaux, en fonction des besoins d'une musique nouvelle, ou retrouvée. Et précisément, s'il nous est permis de suggérer une orientation pour les recherches à venir, nous voudrions insister sur l'importance de la musique. M. Castellengo souligne à juste titre que les mesures les plus intéressantes ne sont pas forcément les plus précises mais plutôt les plus représentatives de notre perception auditive. La musique, d'autre part, n'est pas constituée de sons stationnaires, chaque mélodie tirant au contraire son intérêt de l'agencement subtil de différentes sortes de transitions, en intensité, entre notes, entre registres. C'est dans ce domaine des transitoires qu'à notre avis une collaboration entre scientifiques et musiciens serait aujourd'hui réellement passionnante. D'autant que les physiciens de la turbulence ou les mathématiciens de la théorie des bifurcations pourraient bien trouver là un terrain proche de leurs préoccupations habituelles. D'autant, enfin, qu'une telle collaboration contribuerait ainsi à donner raison à Michel Serres, lequel écrivait récemment :⁽¹⁵⁾ « Il est intéressant que le mot choisi par les musiciens pour leurs textes écrits soit le mot partition. Il est intéressant qu'on en ait une

définition rigoureuse, depuis que l'ont choisi les mathématiciens. Ce n'est pas la première rencontre entre ces deux groupes, ces deux fonctions et leur langage. Sans le savoir toujours ils sont toujours ensemble. Ils sont nés sous le même ciel et au même moment, jumeaux, ils sont nos compagnons sous les mêmes orages. Eux seuls savent, parmi nous, ce qu'est un accord et comment le réaliser. Il faut bien s'accorder, pour jouer ensemble, pour calculer ou pour déduire ensemble. »

Pour en savoir plus :

- Th. Boehm, *Die Flöte und das Flötenspiel* (Munich, 1871). On peut se procurer l'excellente traduction annotée de D.C. Miller, *The flute and flute playing* (Dover, 1964). Il est regrettable qu'un livre aussi intéressant n'ait jamais, à notre connaissance, été traduit en français.
- H. Bouasse, *Instruments à vent*, Delagrave, t. I (1929) et t. II (1930).
- J.W.S. Rayleigh, *The theory of sound*, Dover, New York, 1945 (1^{re} éd. en 1877).
- H.E. Rauch, *The mathematical intelligence*, t. I, 52, 1978.
- J.W. Coltman, *J. Ac. Soc. Am.*, 40, 99, 1966 et 44, 983, 1968.
- M. Castellengo, *Contribution à l'étude des tuyaux à bouche*, thèse d'université, Paris, 1976.
- J.W. Coltman, *J. Ac. Soc. Am.*, 65, 499, 1978.

(14) J. Sundberg, *The acoustics of the singing voice*, Sc. Am., mars 1977.

(15) M. Serres, *Le Parasite*, Grasset, Paris 1980.