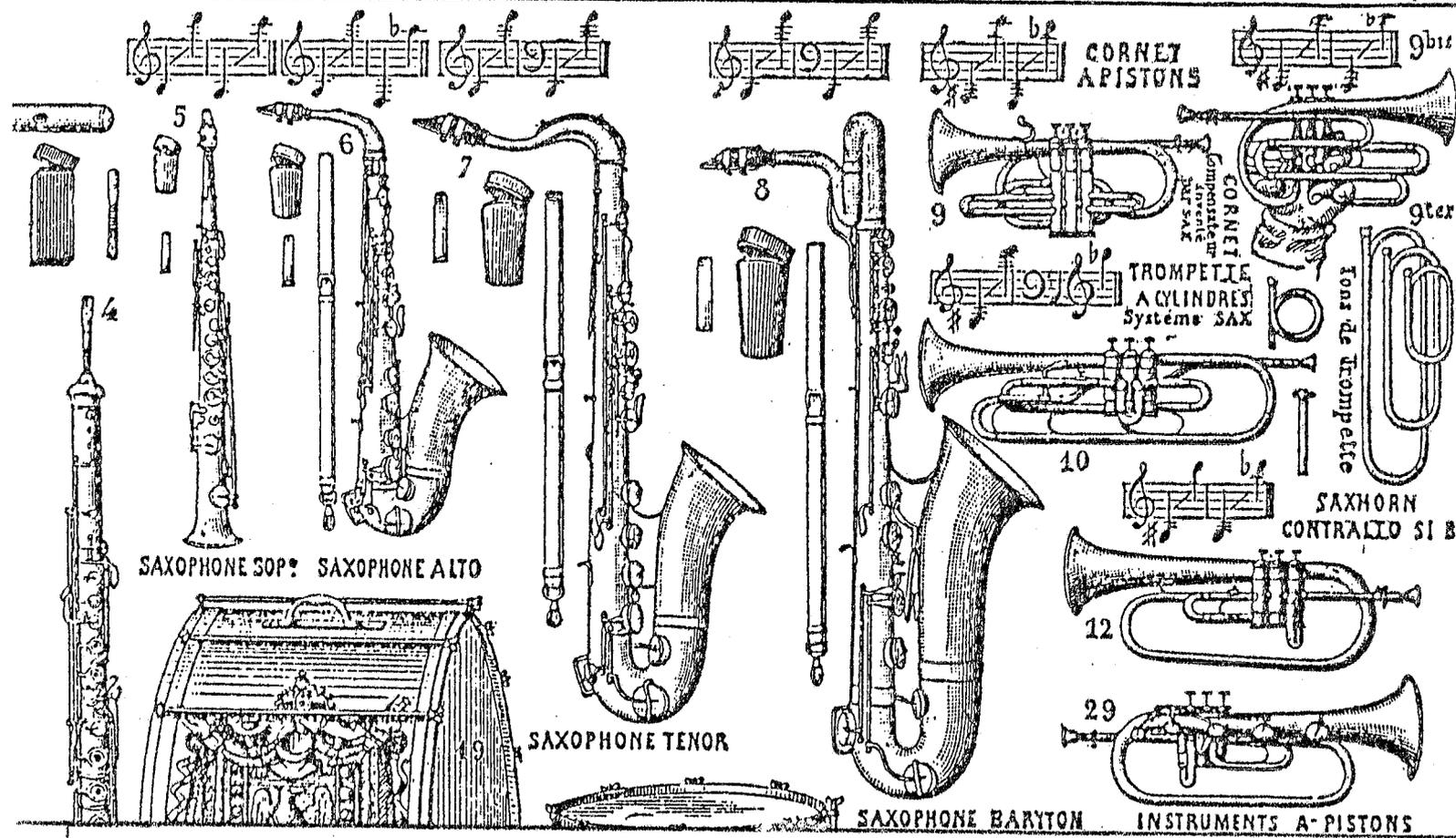


LE SAXOPHONE



par

Jean KERGOMARD - Joël GILBERT - Daniel KIENZKY

N° 115

MARS 1987

GAM

BULLETIN DU GROUPE D'ACOUSTIQUE MUSICALE
UNIVERSITE PARIS VI TOUR 66 - 4 PLACE JUSSIEU 75005 PARIS

G A M

Paris, le 23 décembre 1987

LABORATOIRE D'ACOUSTIQUE
UNIVERSITE PARIS VI
Tour 66 - 5^e étage
Place Jussieu - 75005 Paris

120^e réunion du G A M

LE SAXOPHONE

par

Jean KERGOMARD, Joël GILBERT, Daniel KIENZKY

Etaient présents :

M. le Prof. SIESTRUNCK, Président
Mlle CASTELLENGO, secrétaire générale

Puis par ordre d'arrivée :

Ch. BESNAINOU (Ing. CNRS) ; Xavier BOUTILLON (Charg. Rech. CNRS) ;
J.-B. PRUNET (Ing. ESPCI) ; B. FABRE (Ing. Telecom.) ; X. ROSSELLE (Prof.
saxophone) ; D. GUEROUET (Musicien) ; E. FERRON (Luthier) ; R. BUTY
(Ingénieur) ; D. CHATENAY (CNRS) ; F. AZEMBOURG (Etudiant) ; R. PETIT
(Luthier) ; C. PRAZNOCZY (Etudiante musique Paris VIII) ; P. MULLER
(Enseignant Mécanique UPMC) ; J.-C. RISSET (Chercheur Compositeur) ;
Cl. DELANGLE (Saxophoniste) ; L.-J. RONDELEUX (Chanteur) ; C. DUBOIS
(Saxophoniste) ; R. RAGOT (Charg. Rech. CNRS) ; J.-Ch. HENRY (Professeur) ;
Richard SCOTTO (Réparat. instruments de musique) ; J.-L. VAL (Assist.) ;
E. CHUILON (Compositeur) ; Fr. KADRI MAISONNY (Médecin) ; Mlle
FOURCADE (Etudiante) ; M. SABAN (Informaticien) ; M. FREI (Ingénieur) ;
M. LATTARD (Ingénieur) ; M. KURZ (Directeur de société) ; M. CAUSSE
(IRCAM) ; M. GIBIAT (Ingénieur de recherche) ; M. CHATY (Musicien) ;
P. SELMER (Facteur) ; M. MORKERKEN (Adeline) ; M. SCHNERB ;
J. MILTAT (Dir. Rech. CNRS).

Excusés :

B. BASCHET ; J.-J. BERNARD ; P. BILLAUD ; M. BRUNÉAU ; M. CARRE ;
H. FLEURY ; J. JOUHANEAU ; M. KOMIVES ; M. LEHMANN ; P. LIENARD ;
Mme LOUIS ; D. MERCIER ; P. MULLER ; J.-C. RADIER ; Mme STRAUS.

Directeur de la Publication : M. le Professeur R. SIESTRUNCK
N° Inscription à la Commission Paritaire : N° 819 ADEP
Impression : Laboratoire de Mécanique Physique, 2, place de la Gare de
Ceinture, 78210 - Saint-Cyr-l'Ecole
Diffusion du bulletin G A M : s'adresser au Laboratoire d'acoustique
(voir en-tête)

Sommaire

1 - Eléments d'histoire du saxophone, par Jean KERGOMARD

Qui était Adolphe Sax ?	1
L'invention du saxophone	2
Les différentes innovations de Sax	3
Le serpent de mer de l'acoustique : le matériau et la forme intérieure	5
Succès et déboires de l'invention	7
L'évolution du saxophone	8
Brevet d'invention du saxophone, 21 mars 1846	10
Bibliographie	16

2 - Etude acoustique du saxophone, essai de vulgarisation, par Joël GILBERT

Première partie : Principes généraux de fonctionnement des instruments à vent, appliqués aux saxophones

I. Quelques notions d'acoustique	17
I.1. Introduction	17
I.2. Les grandeurs acoustiques	17
II. Acoustique musicale	19
II.1. Distinction son-bruit	19
II.2. Hauteur	20
II.3. Timbre	20
III. Le fonctionnement acoustique des instruments à vent	22
III.1. Le tuyau sonore	23
III.2. Couplage de l'excitateur (l'anche) avec le tuyau sonore	29
III.3. Anche faible, anche forte "au sens large"	30
III.4. L'émission, effets non linéaires	31
III.5. Résumé	31
IV. Le saxophone parmi les autres instruments à vent	31
IV.1. Le système jet d'air sur biseau	32
IV.2. Le système vibrant type anches	32
Annexe : Un bref aperçu des méthodes de mesure	33
1. Chaîne de visualisation d'un signal acoustique	33
2. Sonagraphe	33
3. Ponts de mesure d'impédance d'entrée	33

Deuxième partie : Etude acoustique du saxophone	
I. L'instrument à vent à anche et à trous latéraux	34
I.1. Introduction	34
I.2. Les trous de notes	35
I.3. Les trous de registre	41
I.4. Tessiture du saxophone alto	42
II. Quelques particularités acoustiques du saxophone alto	45
II.1. Courbes d'impédance d'entrée, rayonnement, sonagramme	45
II.2. Facilité d'émission, harmonicité des fréquences de résonance	47
II.3. Une petite expérience pour conclure	49
Bibliographie	52
3 - Le jeu du saxophone, par Daniel KIENZY	
Historique	55
La fabrication	57
L'enregistrement, l'amplification, captage du son	58
Nouvelle virtuosité	59
Caractéristiques générales, modes de jeu	59
Bibliographie	63

Jean Kergomard

ELEMENTS D'HISTOIRE DU SAXOPHONE

Nous reproduisons ci-dessous l'essentiel d'un article paru dans L'Audiophile (n° 7, novembre 1978), en y ajoutant une reproduction intégrale du brevet original d'Adolphe Sax.

"Tous les autres instruments ont leur origine dans la nuit des temps ; tous ont subi de notables modifications à travers les âges, et leurs migrations ; tous enfin se sont perfectionnés par de lents progrès ; celui-ci, au contraire est né d'hier ; il est le fruit d'une seule conception, et dès le premier jour il a été ce qu'il sera dans l'avenir. Le jury n'a que des éloges à donner à M. Adolphe Sax, pour une si belle découverte." Ainsi s'exprimait Fétis, dans le rapport du jury de l'Exposition universelle de Paris en 1855. C'est en effet cette grande originalité du saxophone qui nous impose de commencer cette description historique par quelques éléments biographiques d'Adolphe Sax.

Qui était Adolphe Sax ?

Né en 1814 à Dinant (Belgique), Antoine-Joseph Sax, dit Adolphe Sax, eut le privilège d'être le fils de Charles-Joseph Sax, facteur d'instruments de musique, qui s'installa à Bruxelles en 1815. Nous sommes donc au début du XIX^e siècle, une époque capitale pour l'évolution des instruments de musique : c'est à cette époque que furent mis au point notamment les systèmes de pistons pour les cuivres, le "système Boehm" pour les bois, le piano... C.J. Sax y participa pleinement, et déposa de nombreux brevets, concernant aussi bien les flûtes, clarinettes, bassons, serpents, cors, que les harpes, guitares ou pianos ; il est un de ceux qui, avec Boehm, Schafhäütl, G. Weber..., mirent au point le système Boehm, c'est-à-dire la réalisation d'instruments chromatiques à trous très larges, qui leur assurent une meilleure homogénéité, et leur permettent d'octavier, quintoyer..., très facilement. Nous aurons l'occasion d'en reparler à propos de la flûte traversière.

C'est dans l'atelier de son père que, nous dit Fétis - qui enjolive certainement un peu la réalité - , Sax apprit le métier de facteur : "Il savait, à douze ans, tourner les pièces d'une clarinette, mouler les clés, les fourches, les polir et les ajuster." Il présenta des instruments probablement déjà à une exposition à Bruxelles en 1830, et en tout cas à celle de 1835, avec une clarinette à 24 clés. Ensuite, ses travaux portèrent sur la clarinette-basse, pour laquelle il dépose un brevet dès 1838. A partir de là, et jusqu'en 1881 (il meurt en 1894), il déposa une trentaine de brevets portant la plupart sur les instruments de musique, à vent et autres, mais aussi...

sur "les signaux mécaniques sur les chemins de fer", "des appareils pour appliquer le goudron", "des appareils de gymnastique pulmonaire", "des dispositions de salles de concerts" (en forme d'oeuf)... Ses activités dépassaient donc largement le cadre de la facture instrumentale ; il était du reste éditeur de musique, professeur de saxophone, chef de la fanfare de l'Opéra, organisateur de concerts, initiateur de la réorganisation des musiques militaires en France... (cf. ouvrages de Malou Haine). Mais ce que la postérité a retenu de tout cela, c'est bien sûr l'invention d'une part du saxophone, d'autre part des saxhorns.

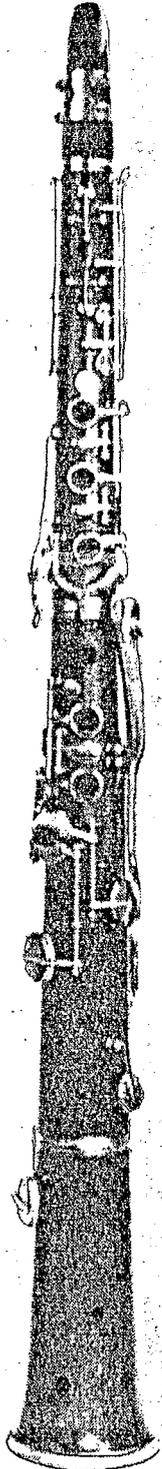
L'invention du saxophone

Il est à noter que les premières recherches de Sax sur les clarinettes portent tout à la fois sur le bec, la fabrication des clés, les clés d'octave... Fait rare à l'époque, Sax était compétent à la fois pour le bois et le métal, et cette pratique solide lui permit d'adapter ces éléments fort divers pour en faire un instrument nouveau. On ne connaît pas la date exacte de ses premiers essais, mais ils se situent certainement entre 1838 et 1840, bien que le brevet date de 1846. Dans ce domaine, les sources de confusion sont nombreuses : il semble que le terme de saxophone ait été donné par certains dès 1839 à la clarinette-basse de Sax ; inversement, en 1844, où le "vrai" saxophone existait certainement, l'acousticien Savart, sans doute plus à l'aise quand il parlait d'instruments à cordes, écrivait : "Ces artistes sont en outre inventeurs d'une clarinette-contrebasse, à laquelle ils ont donné le nom de saxophone" (rapport pour l'Exposition de l'industrie française de 1844, *Instruments de musique*, t. II, p. 558-564).

C'est pourtant incontestablement en travaillant sur la clarinette-basse que l'idée vint à Sax : de fait, le premier instrument qu'il ait mis au point et qui ait été joué fut le saxophone baryton en mi b, appelé semble-t-il à l'époque "ténor", "contralto", ou encore "ténor-baryton". Dans son brevet, il indique les motivations de son invention - qu'il ne faut pas prendre d'ailleurs au pied de la lettre, les explications *a posteriori* étant toujours plus ou moins suspectes ! Il dit (cf. brevet, 2^e page) avoir cherché un instrument qui puisse pallier les inconvénients de l'ophicléide, dont le son est "d'une nature si désagréable qu'on est obligé de le bannir des salles fermées", et inversement ceux du basson, qui ne peut pas jouer fortissimo. L'ophicléide était, rappelons-le, un instrument en cuivre, conique et à embouchure, à trous latéraux et clés : c'était une version améliorée du serpent, inventée par Halary, en 1817.

D'autre part, ajoute Sax (cf. brevet, 2^e et 3^e pages), le basson "est le seul qui se marie avec les instruments à cordes"... Il a donc voulu créer "un instrument qui, par le caractère de sa voix, pût se rapprocher des instruments à cordes, mais qui possédât plus de force et d'intensité que ces derniers".

"Cet instrument, c'est le saxophone [...] je l'ai fait de cuivre et en forme de cône parabolique. Le saxophone a pour embouchure un bec à anche simple dont l'intérieur très évasé va en se rétrécissant à la partie qui vient s'adapter au corps de l'instrument". Avant de commenter cette phrase, on peut se demander s'il s'agit d'une réelle invention. Après tout, le bec est



Tarogato.
J. Thibouville-Lamy



Saxophone Evette et Schaeffer

celui de la clarinette, la forme générale et le matériau ceux de l'ophicléide, la clérierie et les doigtés à peu de chose près ceux de la flûte Boehm, les clés de registre existant déjà sur le basson, la clarinette... L'idée de mettre une anche simple sur un tuyau conique était déjà venue à certains, qui firent même des essais ; d'autre part on peut imaginer que peu de musiciens étaient satisfaits par l'ophicléide (de vigoureux pamphlets contre cet instrument, imprécis et faux, ont même été publiés), et que l'idée n'était pas rare de remplacer son embouchure par un bec de clarinette. Certes ; mais entre le rêve et la réalisation... Sax lui-même a fait breveter de nombreuses idées qu'il n'a probablement jamais réalisées ! A ce propos, on a beaucoup affirmé, depuis Constant Pierre (*La Facture instrumentale à l'Exposition de Paris de 1889*, Paris, 1890), qui n'aimait pas beaucoup Sax, que la clarinette de Desfontenelles (1807) était conique et octaviait ; il n'en est rien. De son côté, le tarogato, instrument hongrois, n'a été fabriqué que vers 1890 sous la forme que nous lui connaissons aujourd'hui, c'est-à-dire une sorte de clarinette conique ; l'instrument qui existait sous ce nom au XVIII^e siècle n'étant en fait qu'une espèce de hautbois (fig. 1).

Il faut donc rendre hommage à Sax, qui fut le seul à maîtriser suffisamment les problèmes posés pour construire le nouvel instrument. Il bénéficiait pour cela, nous l'avons dit, de son apprentissage chez son père, et certainement aussi du fait qu'il était lui-même excellent clarinettiste (et aussi flûtiste).

Les différentes innovations de Sax

Le premier problème qu'il sut résoudre fut la fabrication du bec de saxophone : il fallait adapter un bec de clarinette à un tuyau conique, problème avant tout acoustique, bien plus que technique ; la réaction (c.à.d. l'énergie qui revient sur l'anche) d'un tuyau conique est beaucoup plus faible que celle du tuyau cylindrique de même diamètre d'entrée : en effet le tuyau conique est beaucoup plus large à la sortie, et l'énergie "perdue" par rayonnement est beaucoup plus grande. Cela signifie en pratique que le champ de liberté laissé au musicien est beaucoup plus grand avec le tuyau conique, et donc l'instrument imprécis, difficile à jouer. On a alors intérêt à mettre une "discontinuité" à l'entrée du tuyau conique pour augmenter sa réaction et faciliter l'émission (on en fait autant pour les cuivres, mais dans ce cas c'est au contraire le système excitateur, les lèvres, dont le champ de liberté est trop grand). Sax en a déduit qu'il fallait avoir un bec beaucoup plus large que l'entrée du tuyau, et par conséquent adapter le bec du saxophone à l'extérieur du tuyau, alors que celui de la clarinette s'adapte à l'intérieur.

Le deuxième problème qu'a su résoudre Sax est un problème à la fois technique et acoustique. Il s'agissait d'adapter le système Boehm à un tuyau de perce conique très large : la taille des trous est donc sensiblement différente de celle de la flûte traversière (les plus gros trous du saxophone baryton mesurent 4 à 6 cm de diamètre), et nécessite des solutions différentes quant à la place à laquelle il faut les percer ; d'autre part, la clérierie (et surtout la tringlerie) est vraiment compliquée et difficile à fabriquer. Il faut toutefois noter que Sax n'a pas appliqué complètement le

système Boehm, puisqu'il a laissé un grand nombre de clés fermées pour les notes altérées.

Autre innovation, Sax ne s'est pas contenté de fabriquer un seul instrument, mais il en a construit toute une famille : il décrit dans son brevet (brevet n° 3226 du 21 mars 1846 pour "un système d'instruments à vent dits saxophones") huit instruments, depuis le "bourdon" jusqu'au "suraigu", autrement dit du contrebasse au soprano. Il revient donc à un usage qui s'était perdu depuis le XVII^e siècle. A la Renaissance en effet, on fabriquait les instruments par familles entières (citons les familles des violes, des flûtes à bec, des hautbois, des bassons, des cromornes, des trombones...). Malheureusement, il ne réussira pas à introduire cet usage dans l'orchestre symphonique : celui-ci, curieusement, ne comporte qu'une seule famille, celle des cordes, alors que les vents sont utilisés comme des individus, même si on fait de temps à autre appel à un ou deux parents de chaque prototype (cor anglais pour le hautbois, piccolo pour la flûte...).

Vers 1850, Sax avait sans doute fabriqué à peu près toute la famille, ou plutôt deux familles : l'une en do et fa pour la musique symphonique, qui a disparu depuis ; l'autre, celle que nous connaissons aujourd'hui, en si b et mi b, pour les musiques militaires. Les noms exacts de cette famille se stabilisèrent vers cette date ; ce sont : soprano, soprano, alto, ténor, baryton, basse et contrebasse, dans l'ordre alternativement en mi b et si b.

Le serpent de mer de l'acoustique : le matériau et la forme intérieure

On ne peut pas parler de Sax sans parler du problème matériau-forme. A son époque, il était une croyance simpliste à propos des instruments à vent : beaucoup imaginaient que la nature du matériau et la forme extérieure (droite, repliée...) étaient seules déterminantes pour la sonorité et le fonctionnement, et que la forme intérieure n'avait pas d'importance. Pourtant, des physiciens du siècle précédent avaient clairement montré qu'en fait le phénomène sonore dans les instruments à vent était les vibrations de l'air dans le tuyau, dont les parois ne servaient qu'à délimiter la colonne d'air vibrante. Certes, celles-ci peuvent vibrer et influencer un peu sur le son, mais ce n'est absolument pas l'essentiel du phénomène. Même si Sax est un peu trop catégorique, il a raison quand il affirme (Note pour MM. les Conseillers de la Cour de Rouen, cité par Fétis, *Biographie universelle des musiciens*, Paris, 1860-1865) : "Les proportions sont les lois qui régissent et constituent la nature des instruments ; ce n'est pas en effet leur forme [sous-entendu extérieure] qui leur donne leur voix, leur qualité de timbre : ce sont les seules proportions. Ces proportions sont donc différentes pour chaque espèce d'instruments ; ce sont elles qui font qu'un cor n'est pas une trompette, qu'un bugle n'est pas un saxotromba. Et mes adversaires osent répéter à la cour ce qu'ils disaient aux experts, à savoir que loin d'être une loi fondamentale, les proportions sont sans importance, et qu'ils sont appelés à les modifier, suivant les exigences des artistes ! Mais, en niant la nécessité des proportions, les malheureux sont obligés de s'y soumettre, car, sans cela, ils ne pourraient pas fabriquer d'instruments ; - seulement, en suivant par routine un patron, produit de l'arbitraire ou de

tâtonnements, ils font de la proportion sans le savoir, comme Monsieur Jourdain fait de la prose." Pour le prouver, Sax construisit six instruments en cuivre, de perce différente mais de même forme droite, démontrant ainsi que c'était bien la forme intérieure qui influait.

Nous verrons plus précisément l'influence du métal dans le son du saxophone.

Mais que dire de l'expression "cône parabolique" ? Malgré le grand respect que nous avons pour Sax, nous dirons franchement que, sans doute entraîné par la polémique, il exagère un peu ! à moins que ce ne soit pour impressionner ses concurrents et les décourager de l'imiter. Nous avons essayé de comprendre ce que signifiait cette expression, *a priori* condamnée par le dictionnaire (cône = volume engendré par une génératrice droite). L'instrument de Sax était tout bonnement presque parfaitement conique sur toute sa longueur, et se terminait par un pavillon évasé, peut-être parabolique, pourquoi pas en effet ? Le résultat en tout cas ne s'est pas fait attendre : beaucoup d'admirateurs de Sax, convaincus par lui de l'importance des proportions dans la sonorité, ont compris que cette fameuse forme parabolique était la cause du succès de l'instrument (citons l'un d'entre eux : "le dessin paraissant purement conique, est cependant déformé par des lignes paraboliques"). Il faut dire que c'était une idée à la mode : ainsi, un fabricant de cuivres, Alexandre, dans un brevet pour des pavillons paraboliques, s'expliquait en comparant les instruments à vent aux "appareils d'éclairage et de chauffage pour projeter des rayons lumineux ou caloriques" (brevet français du 29 décembre 1845, n° 2493, pour "l'application de courbes paraboliques et elliptiques, sur base mathématique, à la forme du pavillon des instruments à vent"). Quant à Kastner, auteur de la première méthode de saxophone (1845), il écrit : "Son cône est parabolique dans toute sa longueur, tandis que les tubes des autres instruments forment un cône cintré et généralement cylindrique dans une grande partie : d'où il résulte que chez le premier, les vibrations se produisent par ondulations contre la paroi, dans toute sa longueur, tandis que chez les seconds (ophicléide, trompette et trombone), elles se frappent directement d'une extrémité à l'autre."

Il est bon de mettre les choses au point : si on peut à la rigueur parler de focalisation des ondes sonores aiguës dans une salle de concert, la propagation et la réflexion des ondes dans un tuyau est d'une nature toute différente. Elles se propagent dans l'axe du tuyau. Il n'en reste pas moins qu'on aimerait bien savoir ce que Sax entendait exactement par cône parabolique ; d'autant plus qu'il y revient dans son deuxième brevet consacré au saxophone (brevet français du 19 mars 1866, n° 70 894, pour des "perfectionnements apportés aux instruments de musique dits saxophones") : "Je me réserve deux nouvelles dispositions de perce, une en cône droit et une en cône rentrant ou concave soit l'inverse du cône parabolique." C'est malheureusement tout ce qu'il dit, et on en est réduit aux suppositions : il parle vraisemblablement de la forme du pavillon. Pour terminer sur cette question, nous dirons que les mandrins utilisés par Sax étaient rigoureusement coniques, et si l'on trouve quelques déformations dans l'instrument fini, c'est certainement dû à la fabrication elle-même, soit celle du tube, soit la perce des trous latéraux.

Succès et déboires de l'invention

C'est probablement à l'Exposition de l'industrie belge à Bruxelles en 1841 qu'eut lieu la première audition officielle du saxophone. Mais c'est à Paris qu'il eut l'accueil le plus enthousiaste, ce qui décida Sax à s'y installer, dès 1842. Son premier grand succès fut auprès de Berlioz; citons ce dernier (*Journal des débats*, 21 avril 1849) : "La sonorité du saxophone est de telle nature que je ne connais pas un instrument actuellement en usage, qui puisse, sous ce rapport, lui être comparé. C'est plein, moelleux, vibrant, d'une force énorme, et susceptible d'être adouci." Il le fit également connaître à d'autres musiciens parisiens, et aussi à des personnalités proches de Louis-Philippe, et connut un grand succès, aidé, il est vrai, par la renommée acquise avec sa clarinette-basse. Ainsi Rossini, Meyerbeer, entre autres, accueillirent l'instrument avec enthousiasme. En 1844, Berlioz fit jouer son *Hymne* par six instruments de Sax, dont un saxophone. Il était vraiment conquis; citons-le encore (*ibid.*) : "La voix du saxophone, dont la famille comprend sept individus de taille différente, tient le milieu entre la voix des instruments en cuivre et celle des instruments en bois; elle participe aussi, avec beaucoup plus de puissance, de la sonorité des instruments à archet. Son principal mérite, selon moi, est dans la beauté variée de son accent, tantôt grave et calme, tantôt passionné, rêveur ou mélancolique, ou vague comme l'écho affaibli d'un écho, comme les plaintes indistinctes de la brise dans les bois, et, mieux encore, comme les vibrations mystérieuses d'une cloche longtemps après qu'elle a été frappée. Aucun autre instrument de musique existant, à moi connu, ne possède cette curieuse sonorité, placée sur la limite du silence."

Mais ce sont les musiques militaires que le saxophone et (surtout) les saxhorns (famille de cuivres, brevetée en 1843) bouleversèrent le plus. Malgré l'opposition farouche d'autres facteurs, Sax réussit à faire imposer ses instruments par décision ministérielle dans les musiques régimentaires, en 1845. Nous avons dit que bien des instruments de cette époque étaient très peu satisfaisants pour cette fonction : les hautbois et les bassons sont beaucoup trop faibles, et les cuivres étaient beaucoup trop imparfaits, en particulier l'ophicléide. Il n'est donc pas étonnant que Sax ait réussi à remporter ce succès, même si ses adversaires avaient pour eux un argument sérieux : supprimer les instruments à anche double risquait de nuire à la variété des timbres.

Voilà pour les conséquences purement musicales de ses inventions. Regardons maintenant l'envers du décor, les conséquences commerciales. Que Sax ait obtenu un tel monopole était évidemment catastrophique pour ses concurrents (la maison Sax, malgré plusieurs faillites, produisit d'énormes quantités d'instruments), et, dès 1846, commencèrent d'interminables séries de procès. Sax était accusé d'avoir contrefait des instruments qui existaient déjà; ce après quoi il dut lui-même accuser ses concurrents de contrefaçon... En général, il obtint gain de cause, longtemps après tout au moins; mais ces procès coûtèrent fort cher à tout le monde. Si Sax pouvait légitimement se plaindre de la malhonnêteté de ses concurrents, il faut dire, à juste titre, que lui non plus n'a pas toujours employé les meilleurs arguments pour se défendre.

Il serait long de rentrer ici dans le détail ; nous dirons seulement quelques mots, pour dépeindre l'ambiance de l'époque, de l'invention des "sarrusophones", brevetés en 1856 par Gautrot (aujourd'hui maison Couesnon). Sax eut un très long procès avec celui-ci, mais pas pour cet instrument ; en 1866, il déposa néanmoins un brevet pour des "perfectionnements" au sarrusophone, qui revenait en fait quasiment à en faire un saxophone. Qu'était-ce que le sarrusophone ? C'était une famille entière d'instruments coniques à anches doubles (ressemblant à celles du basson et du hautbois). Leur nom venait de Sarrus, chef de musique militaire, qui avait participé à l'invention. Voici donc ce que dit Sax dans son brevet: "Si jusqu'ici je n'ai pas cru devoir intenter une action en déchéance du brevet au soi-disant inventeur du sarrusophone, c'est que d'une part je n'ai pas voulu ajouter un nouveau procès à ceux que j'avait déjà, et que d'autre part, le sarrusophone, dans l'état où il est, sans le bec du saxophone, ne pouvait nuire à mes intérêts [...] Il n'offre rien de nouveau, et ne constitue pas une invention ; en effet, cet instrument n'est autre chose qu'une mauvaise copie mal dissimulée du saxophone [...] Pour dissimuler l'imitation, qu'a-t-on fait ? On a, dût-on rendre mauvaise la voix de l'instrument, utilisé les proportions du tube en le rétrécissant et on lui a donné, au lieu d'un bec à anche simple qui constitue sa véritable embouchure, une anche à double lame semblable à celle du basson, beaucoup plus difficile à jouer." Sax proposait donc de remplacer le bec par celui du saxophone ! En fait, si l'inspiration venait à coup sûr de celui-ci, on ne peut nier qu'il s'agissait d'un autre instrument : si la perce justement est plus fine, c'est pour pouvoir y adapter une anche double. Le sarrusophone était beaucoup plus indiqué pour remplacer les hautbois et les bassons dans les musiques militaires ; et, dans l'orchestre symphonique, le sarrusophone contrebasse remplaça longtemps en France le contrebasson (Saint-Saëns, Fl. Schmitt, Pierné...).

L'évolution du saxophone

Le saxophone n'a pas évolué fondamentalement depuis ses débuts. Néanmoins, sa facilité de jeu a été améliorée par Sax et quelques autres facteurs. Notamment, on a fait des progrès pour les clés d'octave : à l'origine, il en existait deux indépendantes (pour chacune des moitiés de la deuxième octave, où on joue les partiels 2), et il fallait donc changer de clé par exemple quand on montait la gamme dans la deuxième octave (c'est le système aujourd'hui employé pour le basson). On a donc fait en sorte que le changement de clé se fasse automatiquement quand on change de "trou de note". Sax d'autre part a fait des essais pour étendre la tessiture du saxophone, à l'origine de deux octaves et une quinte, vers l'aigu, en ajoutant d'autres clés de registre, pour utiliser les partiels 3 et 4. Cette idée a été souvent reprise depuis, mais n'a jamais vraiment abouti, nous y reviendrons. Quant au grave, Sax l'a "rallongé" d'un demi-ton : les instruments descendaient au si bécarre, et maintenant au si b. Nous parlons là en notation transposée, et non réelle ; un instrument en mi b, rappelons-le, est un instrument pour lequel on écrit la gamme de do à la place de celle de mi b. Dans le cas du saxophone, c'est aussi un instrument dont les doigtés de base sont ceux de la gamme de mi b, les notes graves, au-dessous de cette note, utilisées seulement pour les fondamentaux, constituant donc une "rallonge". Enfin, et c'est un fait important, la perce

du saxophone a été considérablement élargie depuis l'origine : l'angle au sommet s'est fait sous l'influence des jazzmen, qui voulaient donner plus de puissance à leur instrument. A. Baines (*Woodwind instruments...*) dit d'ailleurs que les premiers saxophones sonnaient curieusement assourdis.

Mais comment a-t-on utilisé le saxophone depuis Sax ? Malgré le succès initial auprès des musiciens et des autorités officielles (qui accordèrent même à Sax, par une loi spéciale, en 1860, la prolongation de validité de ses brevets), et malgré son emploi dans les musiques militaires, il faut bien dire qu'il n'a jamais réussi à s'implanter dans l'orchestre symphonique, et n'a été utilisé qu'épisodiquement. C'est vrai en France, mais aussi à l'étranger, puisqu'il a pénétré dans toutes les musiques militaires (excepté en Allemagne), mais n'a été employé que très ponctuellement dans l'orchestre symphonique. On peut s'en étonner quand on pense à la richesse de timbre que recherchaient, grâce aux combinaisons d'instruments à vent, après Berlioz, des compositeurs comme Wagner, Mahler, R. Strauss... On peut tout de même noter quelques exceptions : Bizet (*L'Arlésienne*), Ravel (*Le Boléro*, orchestration des *Tableaux d'une exposition*), Darius Milhaud (*La Création du monde*), R. Strauss (*Symphonie domestique*) ... A ce propos, citons Ch. Koechlin (*Les Instruments à vent*, PUF, "Que sais-je ?", Paris, 1948) : "Ses détracteurs lui reprochent une sonorité trop facile, une douceur un peu molle ; c'est peut-être se plaindre "que la mariée soit trop belle". Si d'ailleurs la suavité et l'ampleur du son demeurent ses qualités dominantes, il peut fort bien ne pas manquer d'accent : tout dépend du jeu, de l'"attaque" de l'exécutant."

De 1857 à 1870, le Conservatoire de Paris créa des classes annexes pour élèves militaires, où les instruments de Sax étaient enseignés ; c'est lui-même qui enseignait le saxophone. Mais ce n'est qu'en 1942 que s'ouvrit vraiment une classe de saxophone au Conservatoire, confiée à Marcel Mule. En fait, chacun sait que c'est le jazz qui a donné au saxophone l'importance qu'il connaît aujourd'hui, bien que ce fait même l'ait quelque peu discrédité auprès de nombre de musiciens classiques, il faut le reconnaître. C'est un cas assez rare d'instrument mis au point dans un but musical donné, et qui n'a vraiment connu d'essor qu'utilisé à d'autres fins. On peut en effet craindre que sans le jazz, il n'ait connu le même sort que le sarrusophone, avec le déclin des musiques militaires.

Brevet d'Invention

sans garantie du Gouvernement.

Le 15 juillet 1844.

N° 7226.

Loi du 5 juillet 1844.

Extrait.

Art. 32.

Neuf Débu de tous ses Droits :

1° Le brevet qui n'aura pas acquité ses annuités avant le commencement de chacune des années de la durée de son brevet ;

2° Le brevet qui n'aura pas mis en exploitation son découverte ou invention en France dans le délai de deux ans, à dater du jour de la signature du brevet, ou qui aura cessé de l'exploiter pendant deux années consécutives, à moins que, dans l'un ou l'autre cas, il ne justifie des causes de son inaction ;

3° Le brevet qui aura introduit en France des objets fabriqués en pays étrangers et semblables à ceux qui sont garantis par son brevet.

Art. 33.

Quiconque, dans des enseignes, annonces, prospectus, affiches, marques ou estampilles, prendra la qualité de breveté sans posséder un brevet délivré conformément à la loi, ou après l'expiration d'un brevet antérieur, ou qui, étant breveté, mentionnera sa qualité de breveté ou son brevet sans y ajouter ces mots : sans garantie du Gouvernement, sera puni d'une amende de 50 francs à 1,000 francs. En cas de récidive, l'amende pourra être portée au double.

Le Ministre Secrétaire d'Etat au Département de l'Agriculture et du Commerce,

Vu la loi du 5 juillet 1844;

Vu le procès-verbal dressé le 21 mars 1844, à 12 heures 20 minutes, au Secrétariat général de la Préfecture du département de la Seine et constatant le dépôt fait par le

sieur *Sax dit Adolphe*

d'une demande de brevet d'Invention de quinze années, pour un système d'instruments à vent, dits : Saxophones.

Attendu la régularité de la demande,

Arrête ce qui suit :

Article premier.

Il est délivré au sieur *Sax, Antoine Joseph, dit Adolphe*, fabricant d'instruments de musique, à Paris, rue neuve Saint Georges n° 10 à ses risques et périls, sans examen préalable, et sans garantie, soit de la réalité, de la nouveauté ou du mérite de l'invention, soit de la fidélité ou de l'exactitude de la description, un brevet d'Invention de quinze années, qui ont commencé à courir le 21 mars 1844 pour un système d'instruments à vent, dits : Saxophones.

Article deuxième.

Le présent arrêté, qui constitue le brevet d'Invention, est délivré au sieur *Sax dit Adolphe* pour lui servir de titre.

A cet arrêté demeurera joint le duplicata certifié de la description et de l'essai déposés à l'appui de la demande, et dont la conformité avec l'expédition originale a été dûment reconnue.

Paris, le Vingt et un Juin mil huit cent quarante-sept.

Le Ministre Secrétaire d'Etat de l'Agriculture et du Commerce.

Pour le Ministre et par délégation :

Le Conseiller d'Etat Secrétaire général,

Mémoire descriptif déposé à l'appui de
la demande d'un Brevet d'invention de quinze
ans par Mr. Antoine Joseph (dit Adolphe) Sax
fabricant d'instruments de musique demeurant
à Paris rue neuve St Georges N° 10 à Paris &
établi domicile à l'effet des présentes chez
Mr Perpigna avocat 10 rue neuve St Augustin
pour un nouveau système d'instruments à
vent-dits Saxophones.

Original.

Exposé

On sait que, en général les instruments à vent
sont ou trop durs ou trop mous comme sonne-
rité; c'est particulièrement dans les basses que
l'un ou l'autre de ces défauts est le plus sensible.
L'Ophicléide, par exemple, qui renforce les
trombones, produit un son d'une nature si désa-
gréable qu'on est obligé de la bannir des salles
fermées, faute d'en pouvoir modifier le timbre.
Le basson, au contraire, rend un son si faible
qu'on ne peut l'employer que pour du parties
de remplissage & d'accompagnement; on
encore pour des effets particuliers d'orchestration
dans la forte, il est parfaitement inutile.
Il faut remarquer que ce dernier instrument est
le seul qui se joue avec les instruments à
cordes.

Il n'y a que les instruments à vent en cuivre
dont l'effet soit satisfaisant en plein air; au lieu
l'harmonie composée de ces instruments est elle
la seule combinaison d'orchestre qu'on puisse em-
ployer dans de pareilles circonstances.

Quant aux instruments à cordes, tout le
monde fait que, en plein air, leur effet est
nul à cause de la faiblesse du timbre; ce
qui rend leur emploi presque impossible dans
ces semblables conditions.

Troqué de ces divers inconvénients j'ai cherché
le moyen d'y remédier en créant un instrument
qui, par le caractère de sa voix, pût se

rapprocher de instruments à cordes, mais qui
 dépassât plus de force & d'intensité que ces
 derniers. Cet instrument c'est le saxophone
 Mûr qu'aucun autre le saxophone est
 susceptible de modifier de tons à fin de leur
 donner les qualités qui viennent d'être mentionnées
 & de leur conserver une égalité parfaite dans
 toute leur étendue: Je l'ai fait de cuivre
 et en forme de cône parabolique. Le
 saxophone a pour embouchure un bec à
 anche simple dont l'intérieur très évasé
 va en se rétrécissant à la partie qui vient
 s'adapter au corps de l'instrument.

— Description & nomenclature des divers
 individus de la famille des saxophones.

N^o 1. saxophone en mi^b ténor tout fermé:
 si en mi^b fait ré⁴ en ut.

N^o 2. saxophone en ut, descendant en si^b dans
 son ton.

Le même instrument se fait aussi en si^b &
 descend par conséquent en la^b qui fait si^b dans
 le même ton.

N^o 3. saxophone en sol contre basse; on peut aussi
 le faire en la^b.

N^o 4. saxophone en ut Bourdon, on peut
 aussi le faire en si^b (un ton plus bas).

Les saxophones N^o 5, 6, 7 & 8 font dans les
 mêmes tons que les précédents à l'octave supé-
 rieure.

Doigtés.

N^o 1. Le doigté de ce modèle participe de la
 flûte & de la clarinette, on peut au reste lui
 appliquer tous les doigtés possibles & en usage
 tout fermé ré⁴ en ut.

1. Clef d'ut ouverte. — 2. ut # — 3. ré' — 4. ré' # —
 5. mi — 6. fa. — 7. fa #. 8. sol. — 9. sol #. 10. la. —
 11. la #. 12. si. — 13. ut. — 14. ut #. 15. ré' —
 16. clef pour octavier la première partie de l'
 instrument — 17. ré' # — 18. mi — 19. fa — 20. clef pour
 octavier la seconde partie de l'instrument.

qui
ce
ophone
est
de leur
entouree
Dau
vire
Le
s a
ivase
vient
vers
res
Termé:
si b Dau
b & c
si b Dau
naufsi
ut
les
supé
vils
lui
usage
re#
cyla
re
- de f
pour

11^o 2. Toud fermé si^b = 1. si^b 4 = 2 ut = 3 ut#
4 re' = 5 re'#. = 6 mi = 7 fa. = 8 fa# = 9 sol
10 sol # = 11 la = 12 la # = 13 si = 14 ut =
15 ut # = 16 re'## re'# = 18 clef pour octavier
chromatiquement la premiere quinte de
l'instrument. = 19 clef pour octavier une
partie des notes suivantes. =
20 clef pour octavier le reste des notes
suivantes, autrement dit pour produire les
sons les plus élevés de l'instrument.

Description du Bec

N^o 9 Bec Du saxophone basse. Les autres becs
sont dau les mêmes proportions; on peut tou
fois les faire un peu plus petits ou plus fortes
si on le desire.

Fait a Paris le 20 mars 1846.

Approuvé deux mots rayés nuls

[Signature]

~~Vu pour être annexé au *[illegible]*
de quinze ans, pris le 21 mars 1846
par
Paris. Le 1846
Pour le Ministre & par délégation
Le Conseiller d'Etat, Secrétaire Général~~

— un rôle.
— quinze lignes.
— sans renvoi.
Deux mots nuls

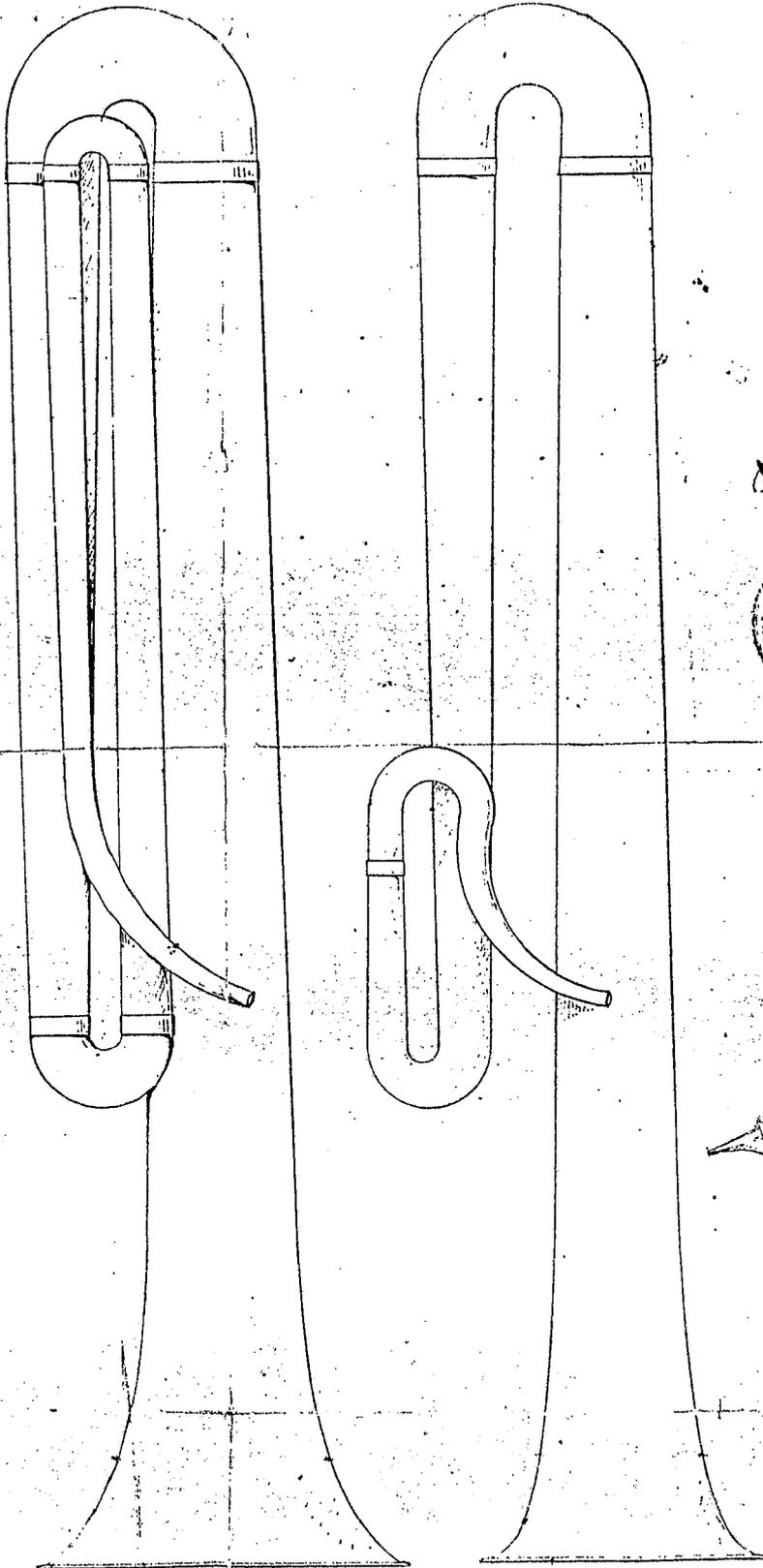
Vu pour être annexé au *[illegible]*
de quinze ans, pris le 21 mars 1846
par le sieur Sax et adré
Paris. Le vingt Deux Juin 1846
Pour le Ministre & par délégation
Le Conseiller d'Etat, Secrétaire Général

[Signature]

n^o 4

n^o 3

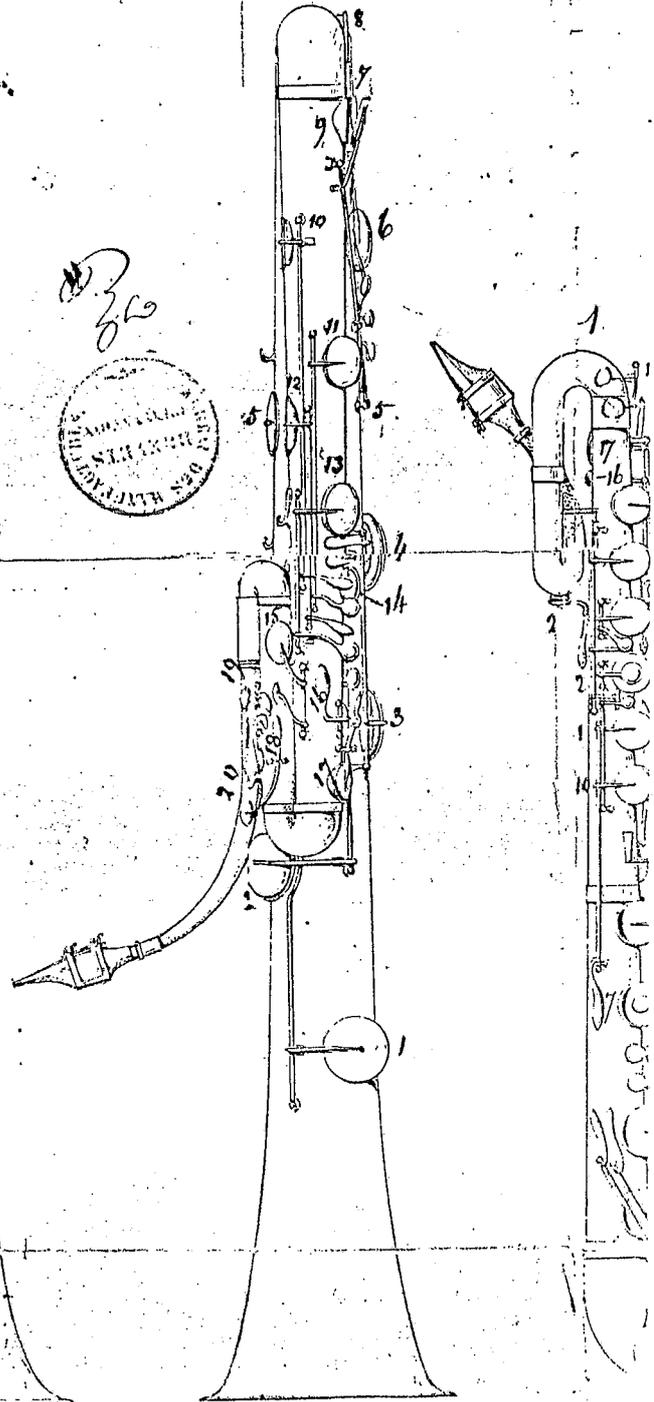
3.226

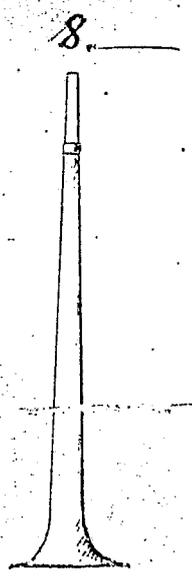
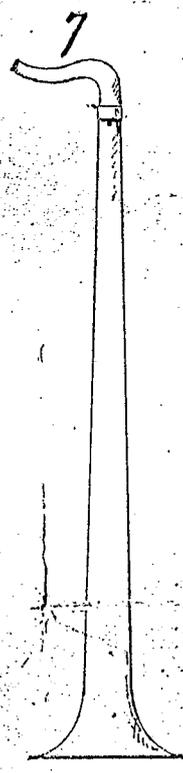
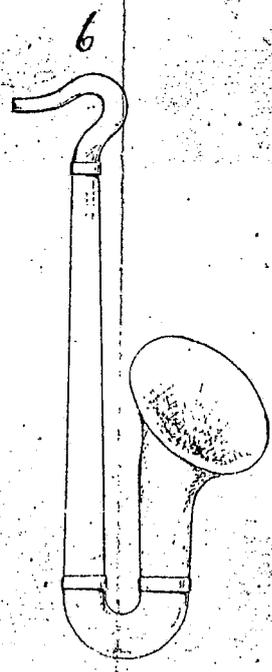
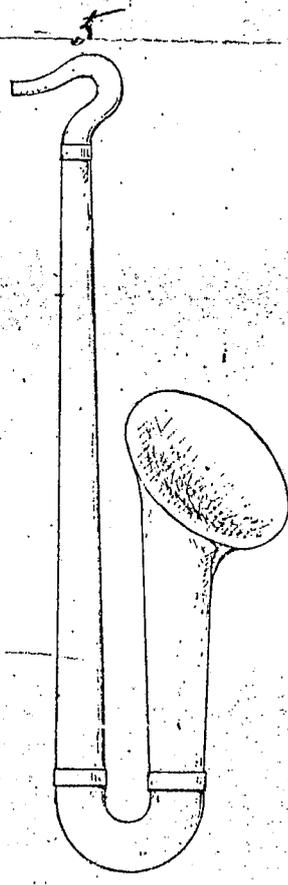
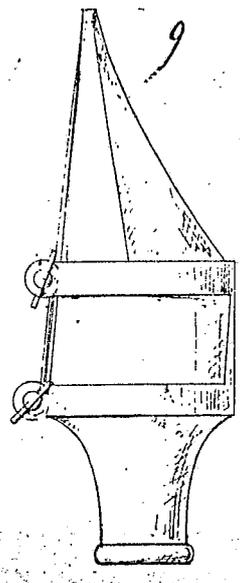
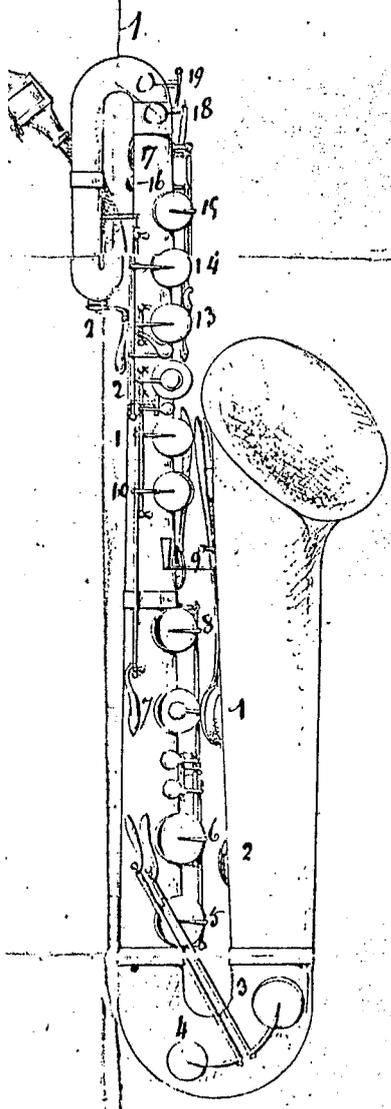


36



n^o 2





Eschalle. Fig. 9. Grandeur réelle.

En hauteur fig. 25 centimètres par hauteur.

Déposé original déposé à l'appui de la loi
 9 m. Brevet d'invention par M. le baron de Saxe
 Paris le 20 Mars 1816.

[Handwritten signature]

3226

Bibliographie

- PERRIN M., *Le Saxophone* , Paris, Fischbacher, 1952, rééd. Les Introuvables, 1979.
- VENTZKE K., RAUMBERGER C., HILKENBACH D., "Die Saxophone", *Das Musikinstrument* , Franckfort/Main, 1979.
- COMETTANT O., *Adolphe Sax. Ses ouvrages et ses luttes* , Paris, Pagnerre, 1860, rééd. Genève, Minkoff, 1983.
- HAINÉ M., *Adolphe Sax. Sa vie et ses instruments* , éd. Université de Bruxelles, 1979.
- HAINÉ M., de KAISER I., *Catalogue des instruments Sax au musée instrumental de Bruxelles* , éd. Musée instrumental de Bruxelles, 1980.
- HAINÉ M., *Les Facteurs d'instruments de musique à Paris au XIXe siècle*, éd. Université de Bruxelles, 1985.
- BAINES A., *Woodwind instruments and their history* , Londres, Faber, 1957.

Joël Gilbert

ETUDE ACOUSTIQUE DU SAXOPHONE essai de vulgarisation

Le texte qui suit a en grande partie été réalisé durant le stage de D.E.A. effectué au Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine (Le Mans) sous la responsabilité de Jean Kergomard (chercheur C.N.R.S.).

Il se partage en deux parties : d'une part les principes généraux de fonctionnement des instruments à vent, d'autre part les particularités acoustiques du saxophone.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le concours du saxophoniste Daniel Kientzy et de Michèle Castellengo, chercheur C.N.R.S., responsable du Laboratoire d'acoustique musicale de Jussieu, université Paris VI.

Première partie Principes généraux de fonctionnement des instruments à vent, appliqués aux saxophones

I - QUELQUES NOTIONS D'ACOUSTIQUE

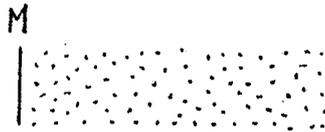
I.1 Introduction

L'oreille perçoit un son, ou plus généralement un bruit, si une source sonore provoque un ébranlement de l'air environnant, cet ébranlement se propageant jusqu'au tympan qui est ainsi mis en vibration. Ce mouvement mécanique de la membrane du tympan génère ensuite *via* l'oreille moyenne et l'oreille interne des influx nerveux qui impliquent la sensation sonore.

En résumé, la sensation auditive est engendrée par une vibration de l'air environnant dite vibration acoustique. Afin d'analyser de manière objective l'espace sonore, il nous est donc nécessaire de définir des grandeurs physiques décrivant l'état acoustique (l'état sonore) en un point donné de l'espace à un instant donné.

I.2 Les grandeurs acoustiques

Emission d'un signal acoustique par la membrane M d'un haut-parleur:



Situation 1 : initialement, M est immobile, c'est le silence ; les points plus ou moins rapprochés représentent les molécules d'air selon la pression.



Situation 2 : compression (zone où la pression est localement supérieure à la pression atmosphérique).



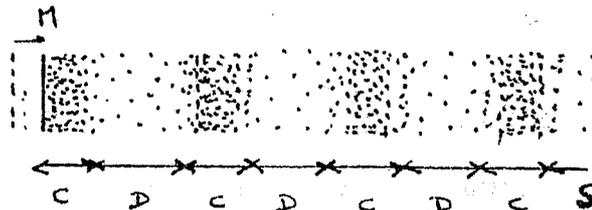
Situation 3 : dépression (zone où la pression est localement inférieure à la pression atmosphérique).



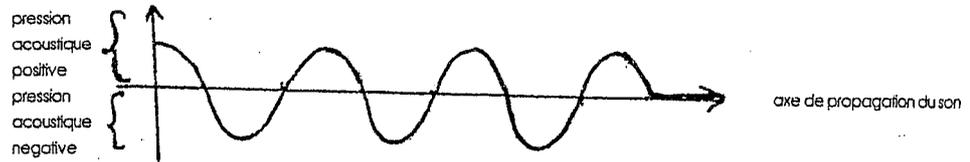
compression dépression compression

Situation 4 : la membrane du haut-parleur vibrant en piston autour de sa position d'équilibre va ainsi provoquer en son voisinage immédiat des zones de surpression (compression) et des zones de dépression qui vont se propager grâce aux forces de liaison élastique existant entre les molécules d'air.

On définit ainsi la première grandeur acoustique : la pression acoustique p , qui est la différence entre la pression existant au point étudié et la pression atmosphérique (constante dans un voisinage donné en état de silence).



C : compression. D : dépression. S : silence (pression acoustique nulle).



On peut également traduire le mouvement des tranches d'air par son déplacement, sa vitesse, on définit donc ainsi : le déplacement acoustique, la vitesse acoustique.

A partir de ces grandeurs on définit la quantité impédance acoustique, rapport de la pression acoustique sur la vitesse acoustique.

La vitesse de propagation des zones de compression et de dépression (la vitesse du son) ne dépend pas de l'excitateur (du haut-parleur), mais du matériau dans lequel il se propage, de l'état de ce dernier, de la température; ainsi, la vitesse du son augmente avec cette dernière.

II - ACOUSTIQUE MUSICALE

II.1 Distinction son-bruit

Même si la limite entre ces deux domaines est assez floue, en première approximation un son musical correspond à une perturbation acoustique périodique, qui se répète régulièrement au cours du temps.

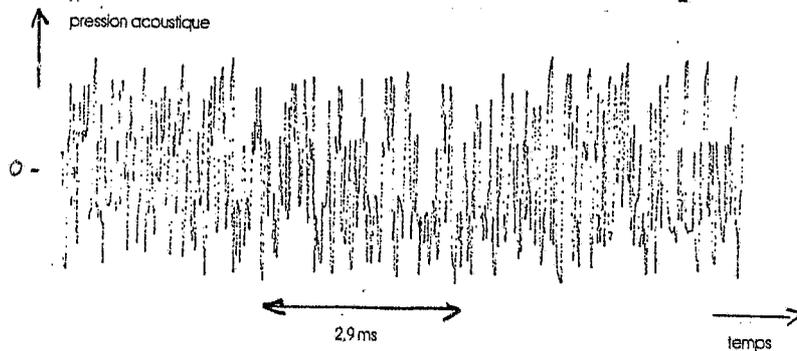


fig. n° 1

pression acoustique en fonction du temps d'un bruit blanc
(cf. annexe : Chaîne de visualisation d'un signal acoustique)

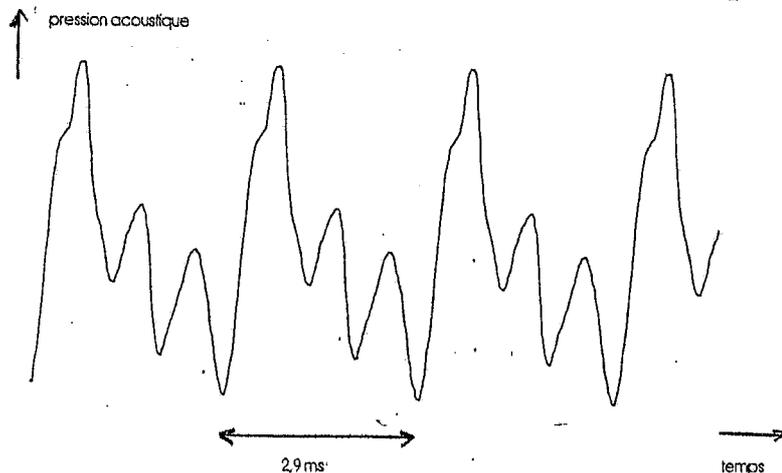


fig. n° 2

pression acoustique en fonction du temps du ré aigu (en mi b)

II.2 Hauteur

Pour le musicien : elle est référenciée sur la portée par les notes de la gamme.

Pour l'acousticien : sachant que pour une note donnée la perturbation acoustique se répète régulièrement au cours du temps, on définit sa fréquence fondamentale comme le nombre de fois qu'elle se répète en une seconde. Par exemple, si elle se répète 440 fois par seconde, sa fréquence fondamentale est de 440 hertz (lag du diapason).

Pour calculer la fréquence d'une note à partir d'une note de référence, le lag du diapason par exemple, il suffit de multiplier par un coefficient caractéristique de l'intervalle entre ces deux notes, pour un tempérament donné, la fréquence correspondant à cette note de référence.

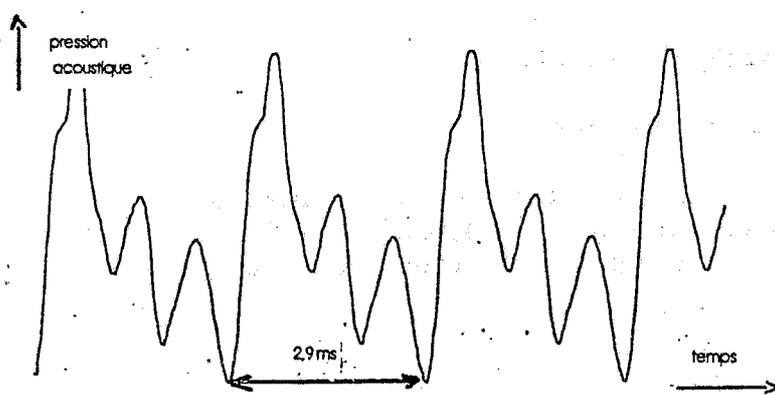


fig. n° 3
pression acoustique en fonction du temps du ré aigu (en mi b) 350 hertz (Hz) 

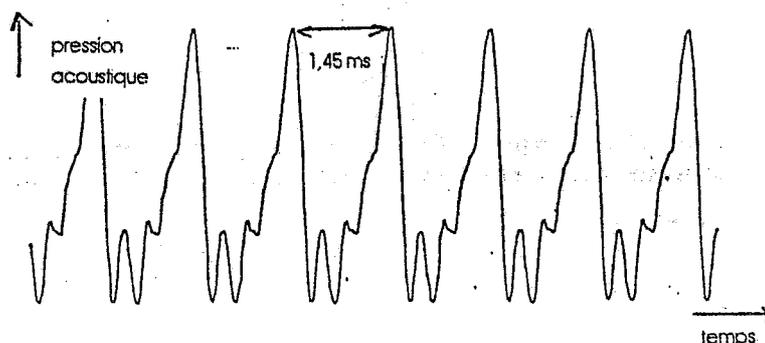


fig. n° 4
pression acoustique en fonction du temps du ré suraigu 700 Hz
(l'octavisation correspond à un doublement en fréquence)

Remarque : en réalité, l'oreille n'est pas un récepteur aussi simple ; les psychoacousticiens ont montré d'une part que la hauteur dépendait aussi de l'intensité, du timbre (cf. Leipp [29], Zwicker [33]), et d'autre part que l'oreille "écrasait" les aigus et remontait les graves.

II.3 Timbre

Deux instruments se différencient, pour une note donnée, par leur timbre, leur sonorité.

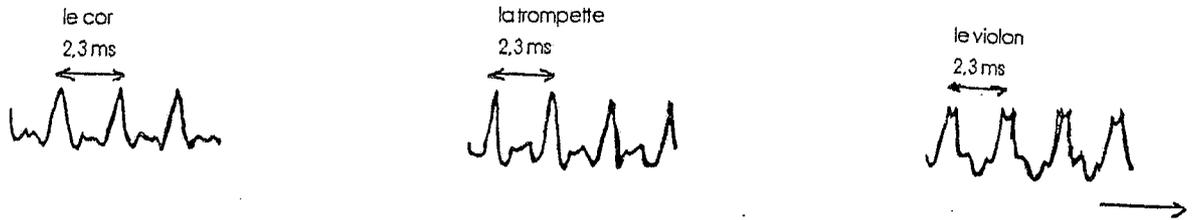


fig. n° 5
pression acoustique en fonction du temps d'une même note :
le la du diapason (440 Hz) par trois instruments différents
(d'après Hall [26])

A chaque forme de courbe, pour une même note (même fréquence fondamentale), correspond un timbre, son analyse reposant sur la "décomposition spectrale" de celle-ci.

Il nous faut d'abord définir le son pur détimbré, que donne le diapason par exemple, correspondant à la forme caractéristique appelée mathématiquement "sinusoïde".

Il est démontré (théorie de Fourier) que toute courbe périodique (ici période de 2,27 milliseconde ; fréquence 440 Hz pour fondamentale, ou première harmonique) peut être décrite comme la somme de sinusoïdes (sons purs) de fréquence 2×440 Hz, 3×440 Hz, 4×440 Hz..., chacune d'elles étant pondérée d'un coefficient déterminé donnant en quelque sorte le poids de chaque harmonique dans la note timbrée.

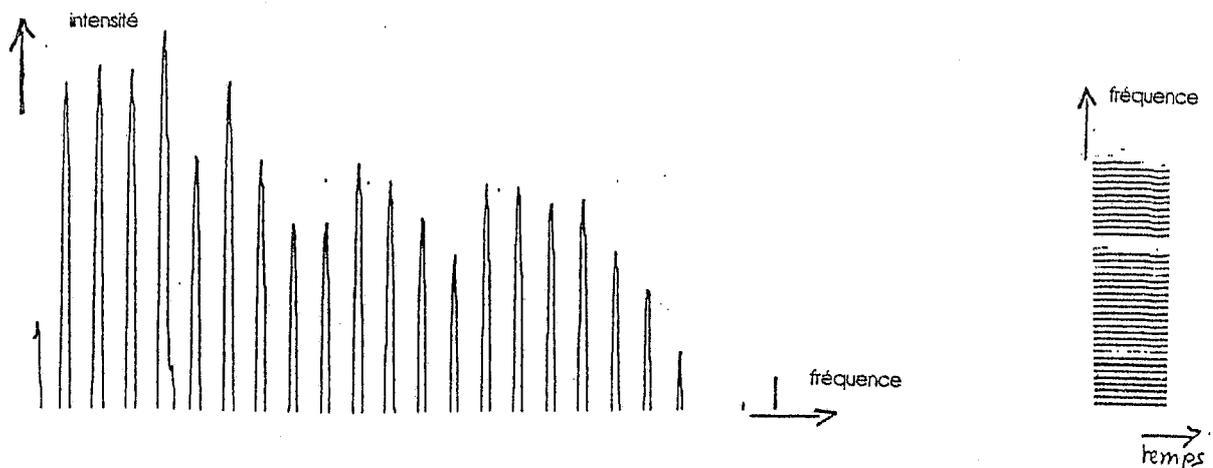


fig. n° 6
décomposition spectrale du ré grave par analyseur fréquentiel (gauche)
et sonographe (droite)

On peut dire à la limite qu'une note timbrée de fréquence fondamentale f , somme de sons purs de fréquences $2f, 3f, 4f, 5f, \dots$, est un accord si consonant que l'oreille ne les sépare plus. A ce sujet, il est intéressant de faire l'expérience suivante (voir la conférence quotidienne sur le son au Palais de la découverte par exemple) : écouter un son pur de fréquence déterminée f puis ajouter successivement les sons purs de fréquence $2f, 3f, \dots, 4f, \dots$; l'oreille entend bien les premières entrées, puis distingue mal les suivantes, le tout se fondant en un timbre de plus en plus riche.

Il est ainsi possible de rattacher des caractéristiques de timbre à des types de spectres :

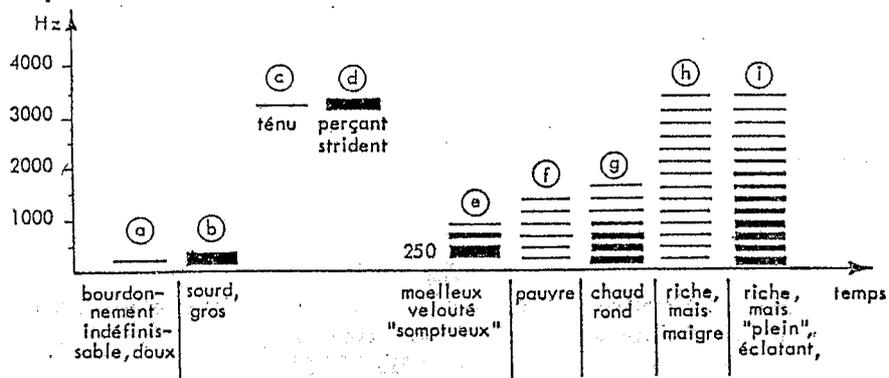


fig. n° 7

typologie physique et perceptive des spectres de raies harmoniques
(d'après Leipp [29])

On peut remarquer que le spectre d'une note donnée attaquée fortissimo s'appauvrit en harmoniques aigus lorsqu'on diminue l'intensité sonore : la sonorité s'adoucit et s'assombrit (voir fig. n° 8).

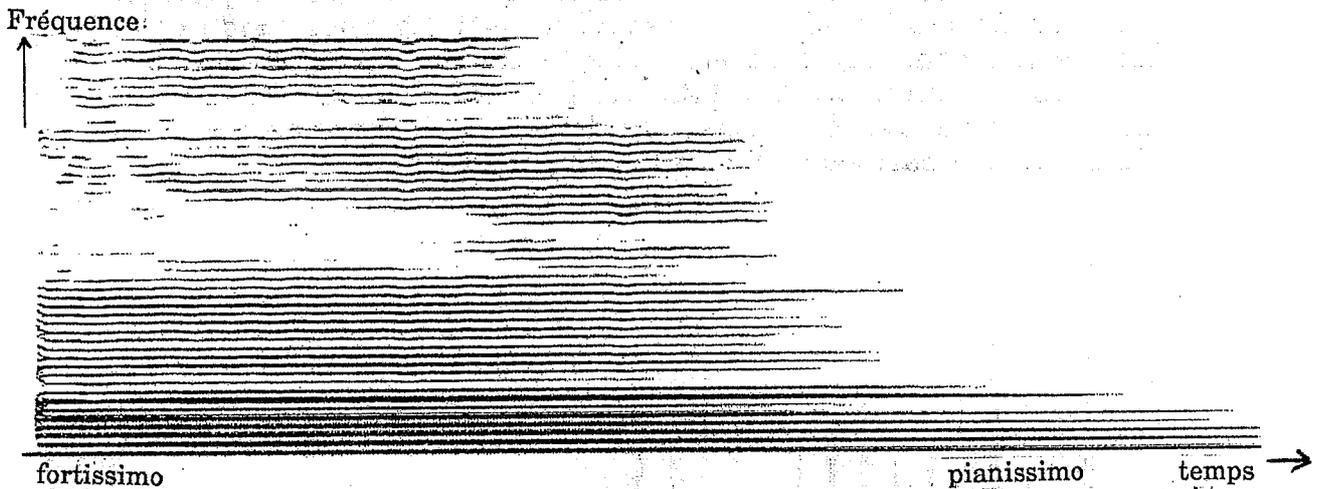


fig. n° 8

sonagramme d'un son filé d'intensité décroissante

Le mouvement de l'anche devient moins brusque et excite de moins en moins d'harmoniques élevés.

Cette technique de décomposition spectrale permet ensuite par le mécanisme inverse de réaliser un premier type de synthèse des sons, mais fait abstraction des transitoires (attaque et extinction de la note), qui sont fondamentaux pour la caractérisation des instruments.

III - LE FONCTIONNEMENT ACOUSTIQUE DES INSTRUMENTS A VENT

Le son est produit par un couplage entre un système excitateur oscillant entretenu (l'anche) et un résonateur acoustique appelé aussi tuyau sonore (le corps de l'instrument et le bec) rayonnant dans l'atmosphère.

Attention ! tout ce qui est dit dans cette partie ne concerne que l'instrument toutes clés fermées. Le fonctionnement acoustique pour des doigtés particuliers n'en est qu'une généralisation à quelques détails près que nous verrons ultérieurement.

III.1 Le tuyau sonore

Opérons tout d'abord un découplage entre l'excitateur et le résonateur, et détaillons le rôle de ce dernier.

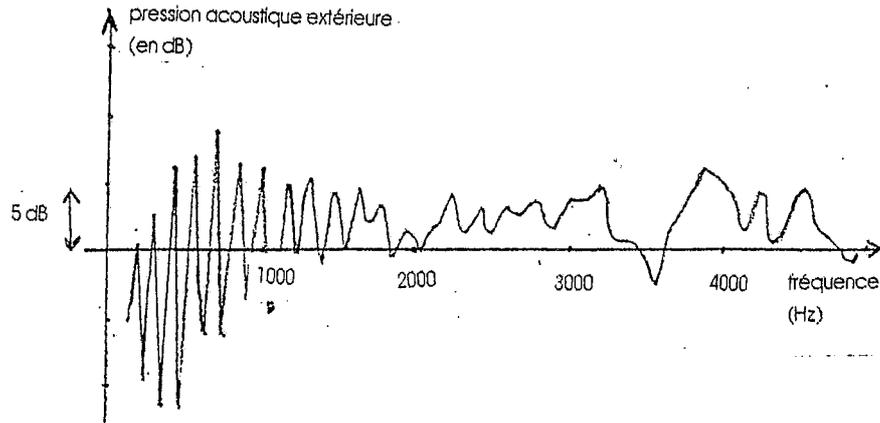


fig. n° 9

mesure de la pression extérieure (à 20 cm du pavillon), le saxophone, toutes clés fermées (doigté du si b grave), étant excité par une source sonore à débit constant en fonction de la fréquence (cf. annexe)

Nous avons effectué ces mesures en chambre sourde pour éviter toute réflexion parasite et ainsi mesurer les caractéristiques de l'instrument lui-même et non pas de la salle !

Cette courbe représente la pression mesurée dans la salle (à 20 cm du pavillon) en fonction de la fréquence, sachant que le tuyau sonore est excité par un micro, utilisé en haut-parleur (émetteur), imposant une vitesse acoustique sinusoïdale donnée à l'entrée ; le tuyau sonore fonctionne en "oscillations forcées".

On remarque que le tuyau sonore ne réagit pas de la même manière suivant la fréquence qui l'excite, il a un rôle sélectif : certaines fréquences sont très amplifiées, d'autres sont atténuées, ce phénomène étant très net sur la première partie de la courbe.

En fait, la courbe ci-dessus met en évidence deux phénomènes :

- résonance à l'intérieur du tuyau sonore,
- rayonnement non uniforme en fréquence de l'instrument.

III.1.1 Oscillations forcées. Fréquences de résonance

Soit une source sonore à l'entrée de l'instrument (voir expérience précédente) qui ne soit pas influençable par le tuyau sonore lui-même (le microphone source donne une vitesse acoustique constante quelle que soit la fréquence). Le tuyau sonore fonctionne alors en "oscillations forcées" par le microphone source. L'onde acoustique (onde de pression) générée va se propager à l'intérieur du tube en se réfléchissant sur les extrémités. (Réflexion sans changement de signe sur une extrémité fermée : une surpression se réfléchit en une surpression, une sous-pression en une sous-pression. Réflexion avec changement de signe sur une extrémité ouverte : une surpression se réfléchit en une sous-pression et réciproquement.) En définitive, pour certaines fréquences dites fréquences de résonance, les ondes successives se réfléchissant vont se superposer de

manière constructive, le système d'ondes stationnaires ayant des ventres de pression (zones où les variations de pression sont maximales) et des noeuds de pression (zones où les variations de pression sont minimales) très prononcés. Pour ces fréquences de résonance, le son est en quelque sorte "amplifié" par le tuyau sonore.

Remarque, réflexion avec ou sans changement de signe : cela dépend de la nature de la condition acoustique limite (aux extrémités). Si l'extrémité est fermée, la vitesse acoustique est nulle sur la paroi (la réflexion est sans changement de signe, il n'y a pas transfert d'énergie au-delà de la paroi). Si l'extrémité est ouverte sur l'espace infini, la pression acoustique y est nulle, car la pression y est imposée constante (pression atmosphérique) par le milieu infini (la réflexion est avec changement de signe, de manière qu'à la limite la somme des deux pressions acoustiques y est nulle), là aussi le transfert d'énergie au-delà de la "paroi fictive" est négligeable. En fait, ce dernier n'est pas rigoureusement nul, néanmoins très inférieur à l'énergie à l'intérieur du tuyau sonore ; heureusement, c'est cette énergie qui atteint l'auditeur !

Pour le doigté du si b grave, les fréquences de résonances sont approximativement : 140, 280, 420 Hz... (voir fig. n° 9).

Par contre, pour les fréquences intermédiaires, les ondes successives se réfléchissant se superposent de manière destructive, si bien que le système d'ondes stationnaires est moins prononcé, le tuyau sonore "répond mal".

Pour le doigté du si b grave, ces fréquences d'antirésonance sont approximativement : 210, 350, 490 Hz... (voir fig. n° 9).

On peut mesurer expérimentalement les fréquences de résonance d'un tuyau sonore en traçant son diagramme d'impédance d'entrée (cf. annexe, p. 00) et en remarquant que ce sont les fréquences pour lesquelles l'impédance d'entrée est maximale. Nous rappelons que l'impédance d'entrée d'un instrument quelconque à une fréquence donnée, rapport de la pression acoustique sur la vitesse acoustique à l'entrée de ce dernier, caractérise la réaction acoustique du tuyau sonore à son entrée (cf. p. 00).

III.1.2 Oscillations libres. Fréquences propres

Soit une source sonore rayonnant dans un tuyau sonore : tant qu'elle fonctionne il est en "oscillations forcées" ; dès qu'on l'éteint, de l'énergie acoustique subsiste à l'intérieur de celui-ci qui fonctionne alors en "oscillations libres". En régime "oscillations libres", le tuyau sonore répond là aussi différemment pour les diverses fréquences ; les fréquences favorisées sont appelées fréquences propres.

Or il se trouve que les fréquences de résonance d'un tuyau sonore, fréquences pour lesquelles l'impédance d'entrée est maximale, sont égales aux fréquences propres du même tuyau sonore fermé fictivement à l'entrée

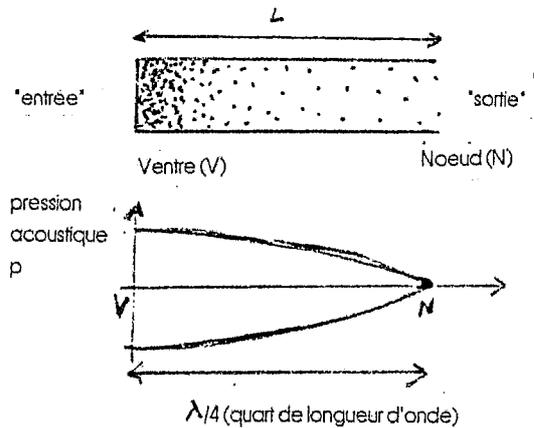
Attention ! cela n'est vrai que pour les instruments avec un excitateur type anches.

III.1.3 Systèmes d'ondes stationnaires

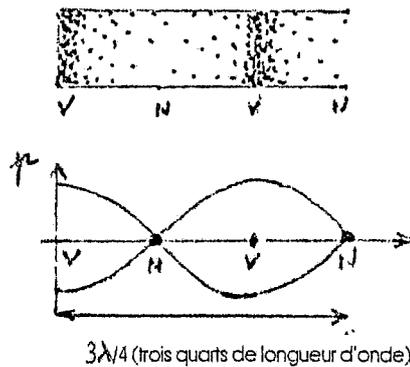
Voyons les systèmes d'ondes stationnaires pour les premières fréquences de résonance de quelques configurations simples de tuyaux sonores.

Le cylindre fermé-ouvert de longueur L

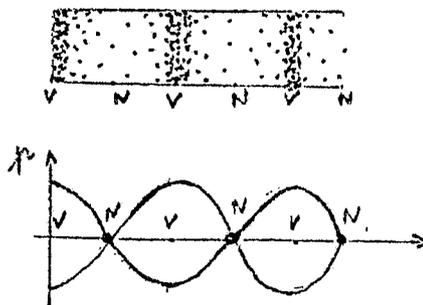
- 1^{re} fréquence de résonance $f_1 = c/4L$ ($c =$ vitesse du son)



- 2^e fréquence de résonance $f_2 = 3f_1 = 3c/4L$



- 3^e fréquence de résonance $f_3 = 5f_1 = 5c/4L$

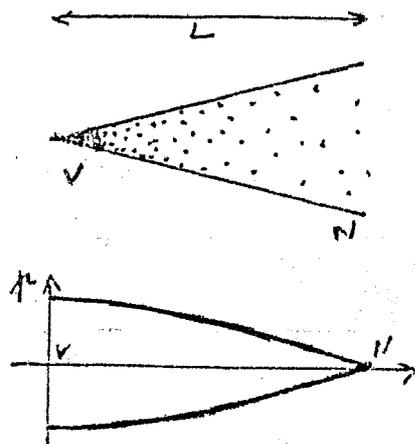


- la n^{ième} fréquence de résonance est $f_n = (2n + 1) f_1 = (2n + 1) c/4L$

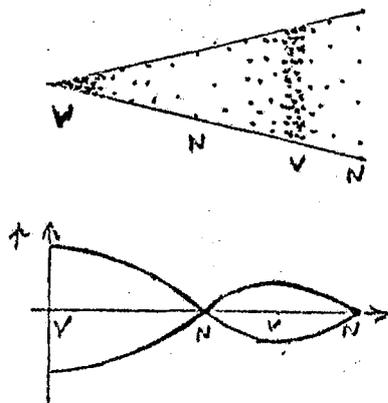
Les fréquences de résonance forment ici une série 1, 3, 5, 7...

Le cône complet

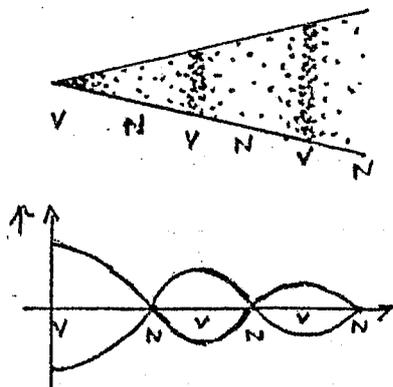
- 1^{re} fréquence de résonance $f_1 = c/2L$



- 2^e fréquence de résonance $f_2 = 2f_1 = c/L$



- 3^e fréquence de résonance $f_3 = 3f_1 = 3c/2L$



- la n^{ième} fréquence de résonance est $f_n = nf_1 = nc/2L$

Les fréquences de résonance forment ici une série 1, 2, 3, 4...

Il est intéressant de remarquer qu'à une extrémité ouverte correspond toujours un noeud de pression, quelle que soit la fréquence et quel que soit le tuyau sonore, et qu'à une extrémité fermée correspond toujours un ventre de pression.

III.1.4 Rayonnement

Le tuyau sonore façonne en quelque sorte un son interne à l'instrument (voir § suivant) qu'on peut recueillir au voisinage du bec, qu'on peut analyser et dont on peut faire le spectre. Nous avons dit que les ondes de pression se réfléchissent sur l'extrémité ouverte du tuyau (pavillon), mais heureusement une petite partie de l'énergie sonore traverse cette barrière fictive et peut atteindre l'auditeur. Cette transmission par le pavillon, et les trous latéraux s'ils sont ouverts, n'est pas fidèle ; ainsi le spectre externe du son rayonné diffère notablement du spectre interne de l'instrument. On peut les relier l'un à l'autre par une fonction de transformation qui peut être définie comme le rapport de la pression externe sur la pression interne, l'instrument étant excité à vitesse constante.

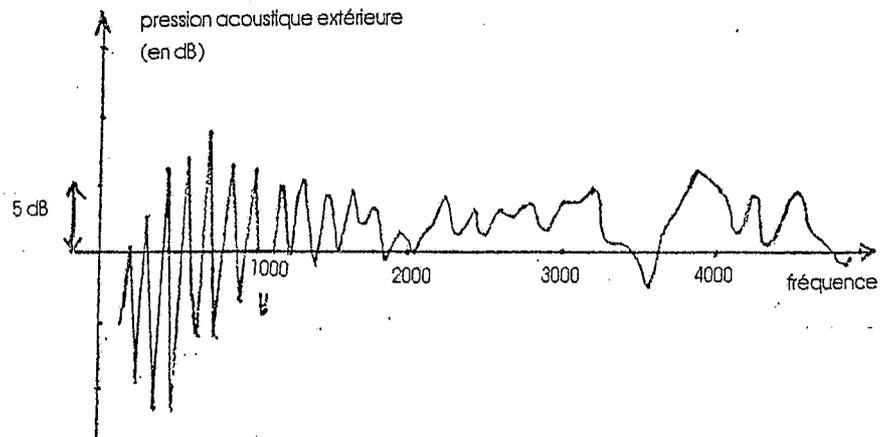


fig. n° 10
mesure de la pression extérieure (à 20 cm du pavillon), le saxophone (doigté du si b grave) étant excité par une source sonore à l'entrée à débit constant en fonction de la fréquence

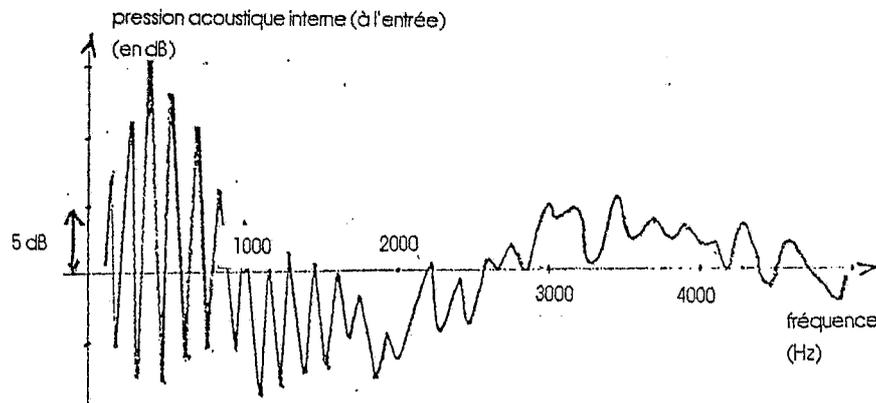


fig. n° 11
pression interne (au niveau de la source, à l'entrée de l'instrument) en fonction de la fréquence

En échelle logarithmique (dB), cela revient à faire la différence des deux courbes ci-dessus. Il apparaît alors que la fonction de transformation correspond à un filtre passe-haut (cf. Benade [23], p. 481), à savoir qu'à partir d'une certaine fréquence de coupure f_c la valeur de la fonction de transfert est 1 ($P_{ext.} = P_{int.}$), là l'instrument ne résonne plus mais fonctionne comme un mégaphone.

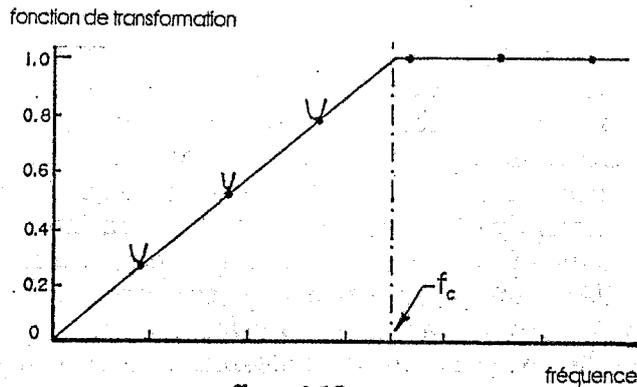


fig. n° 12
fonction de transformation ($P_{ext.}/P_{int.}$) d'un instrument à vent conique
(d'après Benade [23])

FRÉQUENCE D'OUVERTURE DE L'ANCHE: $f_0 = v/4L$

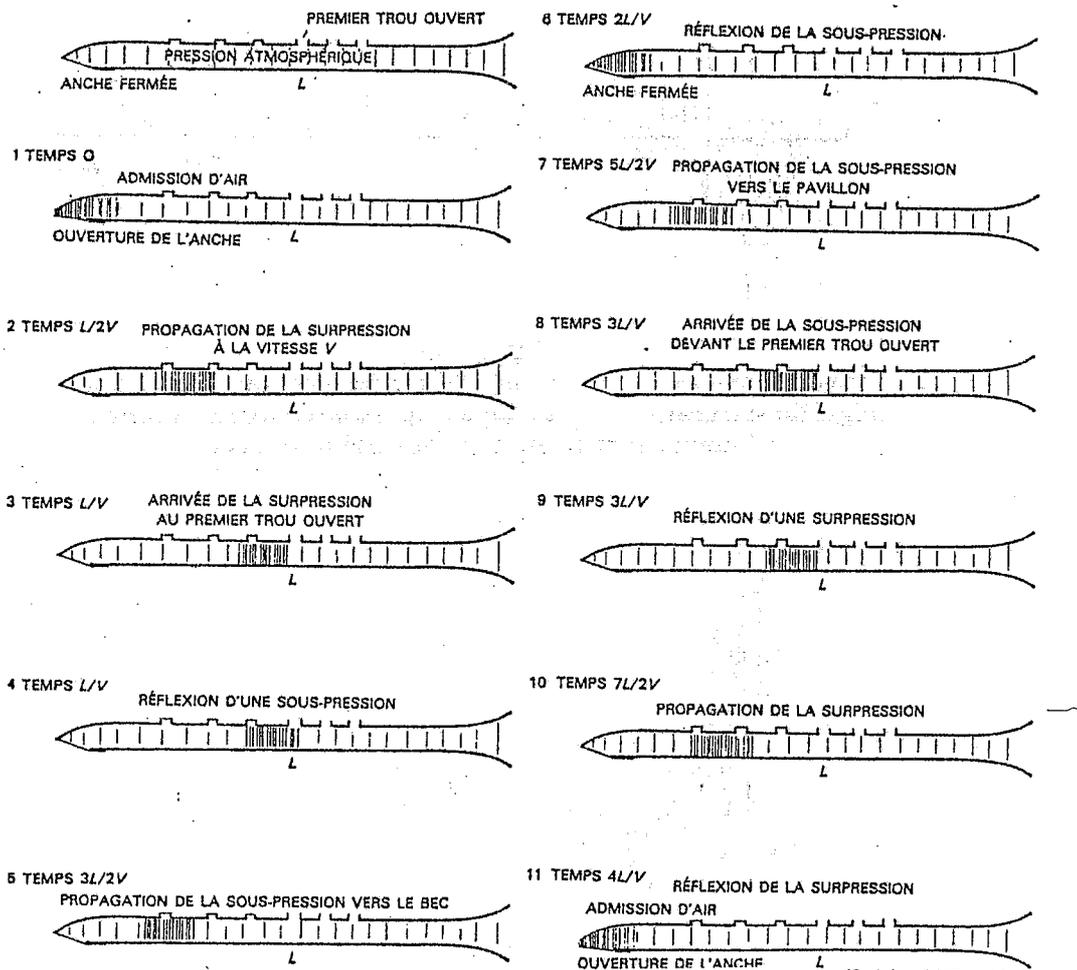


fig. n° 13
les ondes de pression (d'après Laloë [15])

Remarque : le choix de $P_{ext.}$ est très délicat, car il dépend *a priori* de la position du micro récepteur et de la salle elle-même ; pour définir une fonction de transformation caractéristique de l'instrument, et non pas de la salle, il faut en quelque sorte faire une moyenne de $P_{ext.}$ sur l'espace environnant l'instrument (cf. Keefe [18], p. 218).

III.2 Couplage de l'excitateur (l'anche) avec le tuyau sonore

Nous avons, dans le paragraphe précédent, découplé le système excitateur du tuyau sonore pour pouvoir analyser ce dernier. En réalité, le fonctionnement de l'excitateur (la mise en vibration de l'anche) dépend du tuyau sonore.

Voyons en détail l'évolution de la pression acoustique pour la fréquence $f_0 = V/4L$ d'ouverture de l'anche de clarinette (première fréquence de résonance du cylindre de longueur L).

Les ondes de pression qui se propagent dans la clarinette déterminent le mouvement de l'anche. L'ensemble des étapes d'un cycle complet, qui se produit en quelques dizaines de millisecondes seulement, est représenté sur cette figure. Les phénomènes les plus importants de ce cycle sont les réflexions de l'onde sonore, soit sur le premier trou ouvert à partir du bec (3, 4, 8, 9), soit sur l'anche. Sur un trou ouvert, une surpression se réfléchit et se transforme en sous-pression, une sous-pression se transforme au contraire en surpression ; en revanche, sur l'anche, les perturbations de pression se réfléchissent sans changer de signe (cf. III.1.1). Quand une surpression arrive sur l'anche, elle l'ouvre et permet l'admission d'une nouvelle bouffée d'air, ce qui entretient l'oscillation. En pratique, la perturbation de pression est la somme d'anches de plusieurs fréquences qui se propagent indépendamment les unes des autres (cf. III.4), mais agissent ensemble sur l'anche. Pour simplifier la figure, on a supposé que les perturbations de pression étaient de forme simple et bien localisées dans le tube ; mais, en réalité, elles s'étendent sur toute sa longueur.

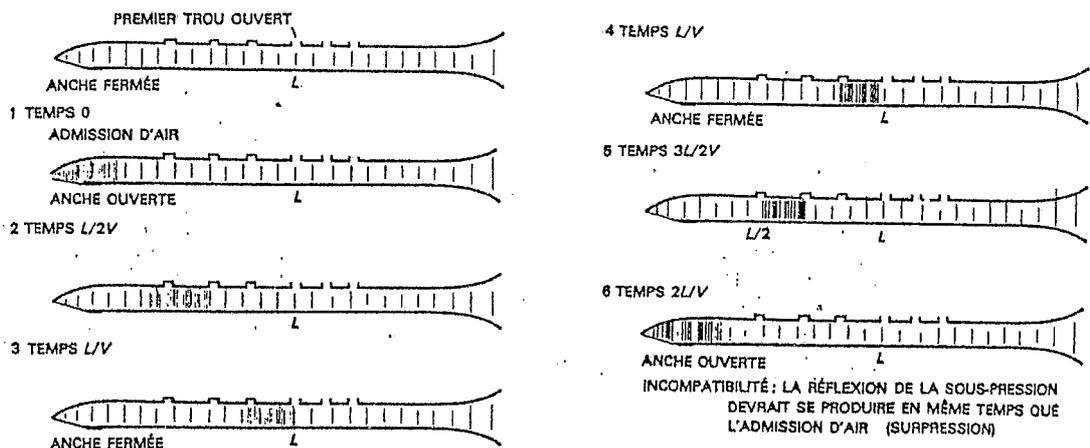


fig. n° 14
fréquence d'ouverture de l'anche (d'après Laloë[15])

De la même manière, envisageons un mouvement de l'anche à la fréquence $f = V/2L$, qui n'est pas une fréquence de résonance du système. Après un aller-retour de la perturbation de pression, celui-ci reviendrait

sous forme de souspression, alors qu'une surpression serait nécessaire pour ouvrir l'anche à la fréquence $V/2L$. Un régime d'oscillations entretenues n'est donc pas possible à cette fréquence.

A partir de ces exemples sur la clarinette, il apparaît que, d'une part, à certaines fréquences (1^{er} exemple, fig. 13), l'excitateur, l'anche, oscille et génère une onde de pression à l'intérieur du tuyau sonore (corps de l'instrument), et, d'autre part, pour d'autres fréquences (2^e exemple, fig. 14), l'oscillation de l'anche est incompatible avec les caractéristiques géométriques du même tuyau sonore. Le mouvement oscillatoire de l'anche est asservi au tuyau sonore qui impose les fréquences favorables à l'oscillation (couplage fort entre l'anche et le tuyau sonore).

Par conséquent, dans les conditions réelles de jeu, il y a un régime d'oscillations auto-entretenues : le flux d'air continu, provenant des poumons de l'instrumentiste, est haché en bouffées successives par l'anche qui oscille et génère le son grâce à la "réaction positive" du tuyau sonore.

Le couplage de l'anche et du tuyau sonore génère des oscillations auto-entretenues pour certaines fréquences qui en première approximation sont les fréquences de résonances du tuyau sonore, fréquences correspondant aux maxima d'impédances d'entrées en régime d'oscillations forcées, ou aussi les fréquences propres de ce dernier fermé fictivement à l'entrée en régime d'oscillations libres.

Remarque : attention à la confusion ! Il est courant de lire dans la littérature : tout instrument à vent type anche fonctionne comme un tuyau fermé à son entrée, ce qui a priori peut choquer vu l'ouverture périodique de l'embouchure. En fait, il faut comprendre : les fréquences permettant l'auto-oscillation entretenue correspondent en première approximation aux fréquences propres du tuyau sonore fermé à l'entrée en régime d'oscillations libres.

III.3 Anche faible, anche forte "au sens large"

Il est bien connu des instrumentistes qu'il y a une certaine latitude quant à la hauteur de la note émise. Il existe un rapport de force entre l'excitateur (l'anche) et le tuyau sonore ; nous avons dit précédemment que le tuyau sonore impose la fréquence de jeu au système excitateur (régime d'oscillations auto-entretenues), mais il se peut également que l'instrumentiste le maîtrise suffisamment bien pour imposer une fréquence qui n'est pas fréquence de résonance (quasiment régime d'oscillations forcées) ; dans ce cas nous disons que l'on a une "anche forte au sens large".

Quelques exemples :

- un tromboniste contrôlant bien les vibrations de ses lèvres peut conserver une note donnée tout en remontant lentement la coulisse vers des positions *a priori* non prévues pour la note en question (régime d'oscillations forcées). Il est bien clair que cela implique une dégradation de la qualité sonore et ne peut être utilisé que dans un but pédagogique de parfaite maîtrise de ses lèvres !
- en revanche, si on adapte un bec de saxophone ténor sur le même trombone, cette expérience n'est plus réalisable ; le système bec plus anche est une "anche faible au sens large", le tuyau sonore impose alors sa volonté (oscillations auto-entretenues).

III.4 L'émission, effets non linéaires

Dans un premier temps (cf. III.2), nous avons vu que le fonctionnement de l'anche n'était possible que pour les fréquences de résonance du tuyau sonore. Mais l'anche peut avoir un mouvement complexe s'éloignant du mouvement sinusoïdal (anche dite "battante" lorsque l'instrumentiste joue fort), si bien qu'elle génère en plus de sa fréquence fondamentale f les harmoniques $2f$, $3f$, $4f$... (oscillation de relaxation : mouvement périodique avec des "cassures", donc riche en harmoniques). Cela implique, d'après ce qui a été dit dans le paragraphe III.2, que l'anche vibre facilement si les différentes fréquences f , $2f$, $3f$... sont fréquences de résonances du tuyau sonore.

Ceci peut être résumé sous la forme d'un postulat que l'on peut appeler postulat de la théorie faiblement linéaire de Bouasse et Benade (cf. [27], p. 159) :

On fait d'autant mieux sonner un tuyau que les premières harmoniques de la fréquence fondamentale imposée par l'excitateur coïncident plus étroitement avec les fréquences de résonance de ce même tuyau sonore.

Par conséquent, un des premiers contrôles de qualité d'un instrument à vent sera de vérifier que ses fréquences de résonance coïncident avec une série harmonique : elles sont multiples d'une fréquence donnée dite "fondamentale" (utilisation des ponts de mesure d'impédance d'entrée, cf. annexe).

Réciproquement, Benade a fait construire un instrument, qu'il a appelé "Tacet horn", à la forme telle que ses fréquences de résonance ne sont pas du tout harmoniques. Il a pu ainsi contrôler son postulat par l'absurde : en effet, seules quelques notes à l'émission difficile et incertaine ont pu être jouées (cf. [27], p. 160).

III.5 Résumé

L'excitateur (l'anche) génère directement un signal acoustique composé d'une fréquence fondamentale et de ses premières harmoniques, ces fréquences étant avant tout imposées par la réaction du tuyau sonore, qui va ainsi façonner un spectre interne (première étape : création du son par mise en oscillations auto-entretenues de l'anche). Il sera ensuite modifié par la fonction de transmission de l'instrument pour donner le spectre externe du son se propageant vers l'auditeur (seconde étape : rayonnement du son dans la salle). Il faudrait alors parler de la troisième étape : l'écoute, qui dépend de beaucoup de phénomènes physiques (salle, position de l'auditeur...) et de phénomènes psychoacoustiques (état de l'auditeur, interactions entre le musicien, l'instrument, la salle, l'auditeur... ; cf. le schéma de M. Castellengo, [21]).

IV - LE SAXOPHONE PARMIS LES AUTRES INSTRUMENTS A VENT

Les deux premiers critères de distinction entre les différents instruments à vent sont d'une part le système excitateur, d'autre part la

forme intérieure du tuyau sonore (la "perce").

Il existe deux grands types de mode d'excitation : le système jet d'air sur biseau et le système vibrant type anches.

IV.1 Le système jet d'air sur biseau

- Cas de la flûte traversière, où l'instrumentiste maîtrise totalement le jet d'air.

- Cas de la flûte à bec, où le jet d'air est guidé par la bouche de l'instrument.

Ce type d'instruments fonctionne pour les fréquences de résonance correspondant aux minima d'impédance d'entrée (ou aussi aux fréquences propres de tuyau sonore ouvert fictivement à l'entrée). Leur perce est quasi cylindrique, par conséquent les fréquences de résonance rentrent dans une série hamonique 1, 2, 3, 4... de fondamentale $f = c/2L$.

IV.2 Le système vibrant type anches

Ce sont tous les autres instruments à vent : les bois hormis la flûte, les cuivres. Ce type d'instruments fonctionne pour les fréquences de résonance correspondant aux maxima d'impédance d'entrée (ou aussi aux fréquences propres du tuyau sonore fermé fictivement à l'entrée).

IV.2.1 Anches faibles au "sens large" : anches en roseau

- Anche simple :

- la clarinette, de perce quasi cylindrique, par conséquent les fréquences de résonance rentrent dans la série 1, 3, 5... de fondamentale $f = c/4L$.

- les saxophones, de perce conique, par conséquent les fréquences de résonance rentrent dans la série 1, 2, 3, 4... de fondamentale $f = c/2L$.

- Anche double : hautbois et basson, de perce conique (mêmes conclusions que pour le saxophone).

IV.2.2 Anches fortes au "sens large" : anches lippales (lèvres)

- Les cuivres en général, dont la perce est dite cylindro-évasée, car constituée d'une plus ou moins longue partie cylindrique centrale, qui peut être précédée d'une partie conique (cas du cor par exemple) complétée par un long pavillon évasé. On peut montrer que cette forme complexe de tuyau sonore résonne pour une série de fréquences quasi harmoniques.

Les types différents de mode d'excitation (anche faible ou forte au "sens large") impliquent une facture instrumentale et un mode de jeu distincts (trous latéraux, trous de registres). Nous verrons cela plus en détail dans la seconde partie de cet exposé.

Annexe Un bref aperçu des méthodes de mesure

1. Chaîne de visualisation d'un signal acoustique

Pour "visualiser" la pression acoustique en un point donné, on place un microphone en ce point. Les molécules d'air en vibration mettent en mouvement la membrane du microphone qui va convertir ce mouvement en un signal électrique (transducteur acousto-mécano-électrique), dont les variations sont identiques aux variations de pression au cours du temps au point considéré. Ce signal étant ensuite "projeté" sur un écran d'oscilloscope, sur lequel on peut ainsi visualiser les variations de pression acoustique au cours du temps (voir quelques exemples fig. n° 1, 2, 3, 4).

2. Sonographe

Le sonographe est un analyseur fréquentiel donnant la composition du son en fréquence (représentée en ordonnée) au cours du temps (représenté en abscisse), la noirceur d'un trait étant proportionnelle à l'intensité de la fréquence mesurée. Pour une explication détaillée de cet appareil, lire par exemple Leipp [29], p. 86 (voir exemple fig. n° 8).

3. Ponts de mesure d'impédance d'entrée

- Pont de mesure utilisant un tube capillaire.

Celui-ci a la propriété de fournir une vitesse à l'entrée de l'instrument proportionnelle à la pression à l'entrée du capillaire.

C'est pourquoi, en mesurant les deux pressions à l'entrée et à la sortie du capillaire, on obtient l'impédance d'entrée de l'instrument.

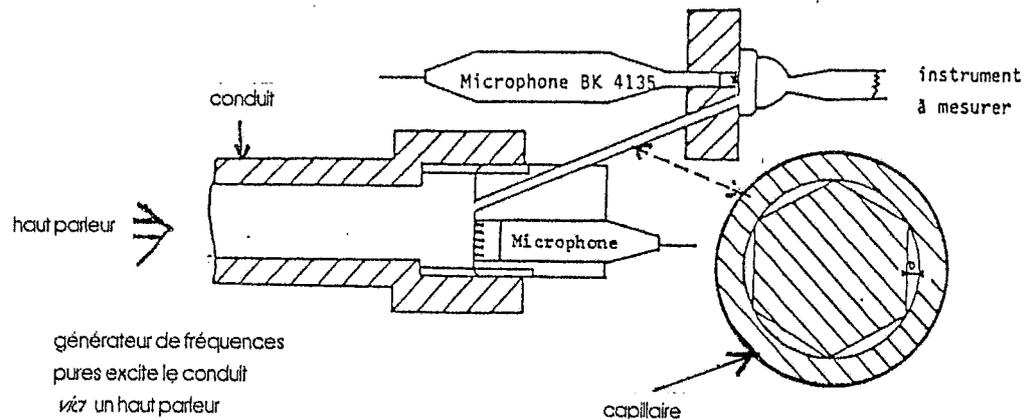


fig. n° 15
principe du pont de mesure d'impédance d'entrée à capillaire

Pour plus de détails, voir par exemple le rapport de D.E.A. de J.-P. Dalmont [17] ; ici, des exemples d'utilisation fig. n° 10, 11.

- Pont de mesure utilisant deux microphones

Celui-ci utilise un microphone en émetteur (haut-parleur), et l'autre en récepteur ; un micro-ordinateur traitant les données de ces deux

microphones en déduit ensuite la valeur de l'impédance d'entrée (thèse de J.-P. Dalmont, en cours).

Cet appareillage, avec son traitement informatique, peut être utilisé pour mesurer des pressions acoustiques extérieures à l'instrument. Quelques exemples d'utilisation fig. n° 9, 10.

Deuxième partie Etude acoustique du saxophone

I - L'INSTRUMENT A VENT A ANCHE ET A TROUS LATERAUX

I.1 Introduction

Nous avons considéré dans la première partie le tuyau sonore dans toute sa longueur. Un premier régime d'oscillations auto-entretenues, correspondant au si b grave, met en jeu la première fréquence de résonance f_1 (premier pic de la courbe d'impédance d'entrée) et ses harmoniques $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$... correspondant aux fréquences de résonance suivantes (deuxième, troisième, quatrième pics...) si l'instrument est acoustiquement bon (cf. I^{re} partie, III.4). Nous appelons cette note le premier partiel du tuyau sonore dans la configuration ci-dessus (pas de clés latérales ouvertes). Si on maîtrise suffisamment bien le système excitateur, sans modifier le tuyau sonore on peut atteindre un deuxième régime d'oscillations, appelé second partiel, donnant l'octave : l'anche vibrera à la fréquence fondamentale $f_2 = 2f_1$, toujours selon une oscillation de relaxation, donc en excitant aussi les fréquences $2f_2$, $3f_2$... (cf. I^{re} partie, III.4) correspondant aux second, quatrième, sixième pics de résonance.

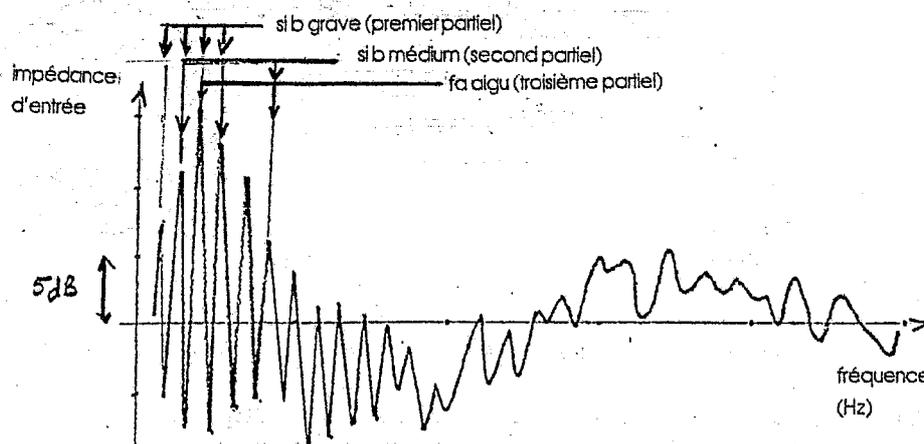


fig. n° 1
diagramme d'impédance d'entrée (en dB) du si b grave

De la même manière, on peut mettre en évidence un troisième partiel : fa  ; un quatrième partiel : si b  ; un cinquième partiel : ré , etc.

Le système excitateur des bois (anches en roseau) étant une anche faible au "sens large", ces partiels élevés sont peu utilisés car d'émission périlleuse (voir trous de registre, I.3), à l'opposé des cuivres qui utilisent couramment les partiels de rang élevé.

Pour obtenir les notes intermédiaires, on peut rallonger ou raccourcir le tuyau sonore (trombone à coulisse), intercaler des dériviatives (systèmes à pistons ou à palettes : les autres cuivres), ou introduire des trous de notes.

I.2 Les trous de notes

I.2.1 Longueur équivalente

En ouvrant successivement les clés à partir du bas, on a ainsi les notes qui suivent le si b grave : si \flat , do, do#, ré... En première approximation tout se passe comme si l'on avait coupé le cône au trou ouvert le plus proche du bec. En effet, le rapport du diamètre d'ouverture de chaque trou latéral sur le diamètre du cône à son emplacement est quasi constant, il se trouve alors que le tuyau sonore fictivement tronqué se comporte comme un cône de même conicité mais de longueur équivalente plus courte (cf. Nederveen [31]), et ainsi les fréquences de résonance décalées vers le haut conservent approximativement leur harmonicité.

I.2.2 Fréquence de coupure

Pour le si b grave (toutes les clés sont fermées), les premiers pics d'impédance (cf. fig. n° 2) sont très marqués, mais à haute fréquence le pavillon ne joue plus son rôle de "barrière fictive", il transmet ("mégaphone"), le système ne peut plus résonner, les pics d'impédance sont très peu marqués. On peut ainsi définir une fréquence dite "fréquence de coupure" au-delà de laquelle on considère que les pics d'impédance sont si peu accusés qu'ils n'interviennent plus. Pour le si b grave, on peut la situer vers 1700 Hz. D'après le petit raisonnement précédent, elle est avant tout la conséquence de la bonne transmission des hautes fréquences par l'instrument.

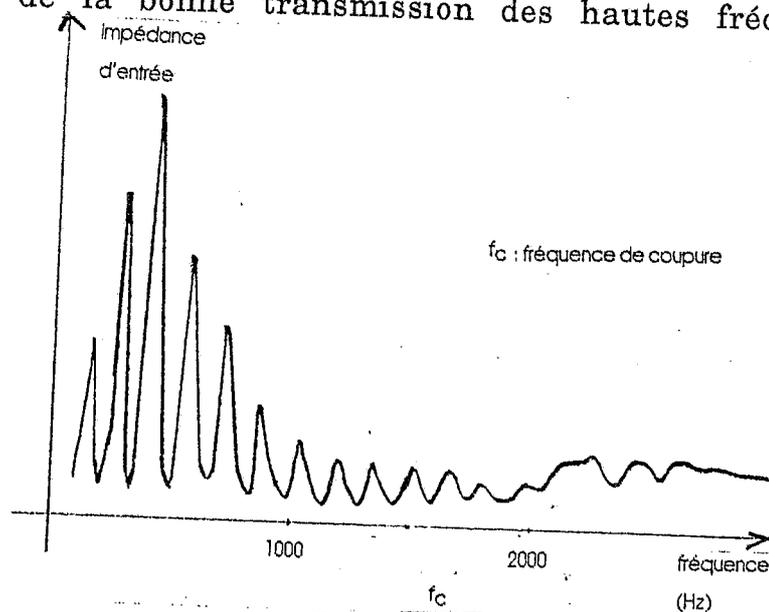


fig. n° 2
diagramme d'impédance d'entrée du si b grave

Or, pour les doigtés mettant en jeu des trous latéraux ouverts, cette fréquence de coupure est plus basse, de l'ordre de 100 Hz par exemple pour le la du doigté de base.

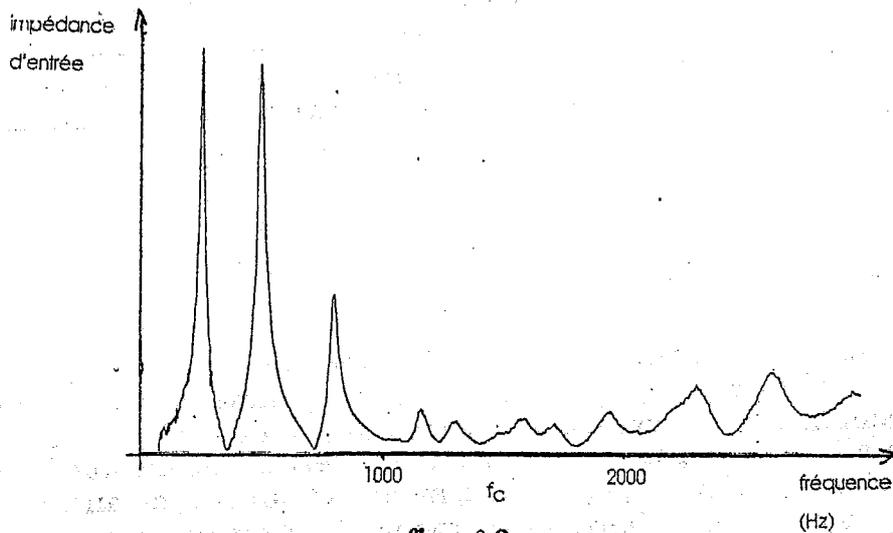


fig. n° 3
diagramme d'impédance d'entrée du la médium

Benade (cf. [23]) montre que cette fréquence de coupure est pratiquement indépendante du doigté utilisé (en dehors de l'extrême grave) et serait le paramètre important de caractérisation du timbre de l'instrument.

Si la fréquence de coupure telle qu'elle est ainsi définie est somme toute assez approximative, elle correspond à un phénomène physique connu, dit "effet de filtre" du tuyau sonore percé de trous latéraux (voir § suivant).

La fréquence de coupure introduite par le pavillon pour les notes les plus graves permet donc d'obtenir un effet analogue à l'effet de filtre du tuyau sonore percé de trous latéraux (notes les plus aiguës) et implique ainsi un timbre plus homogène du grave à l'aigu.

Remarque : la courbe d'impédance d'entrée du la n'ayant que trois pics de résonance bien marqués, il est impossible d'émettre un partiel de rang élevé (supérieur à 3), contrairement au cas du si b grave.

1.2.3 Le tuyau sonore percé de trous latéraux en tant que filtre acoustique, rayonnement

Remarque : le développement de ce paragraphe est applicable à tout autre instrument à vent à trous latéraux.

Une petite expérience classique

Boucher le pavillon du saxophone par un chiffon, le timbre apparaît plus sombre ; ceci est confirmé par la comparaison des deux sonagrammes suivants.

Dans le second cas, le sonagramme est beaucoup moins riche en harmoniques aigus.

Autre exemple, les courbes de pression acoustique prises au niveau du premier trou ouvert et du pavillon d'une clarinette.

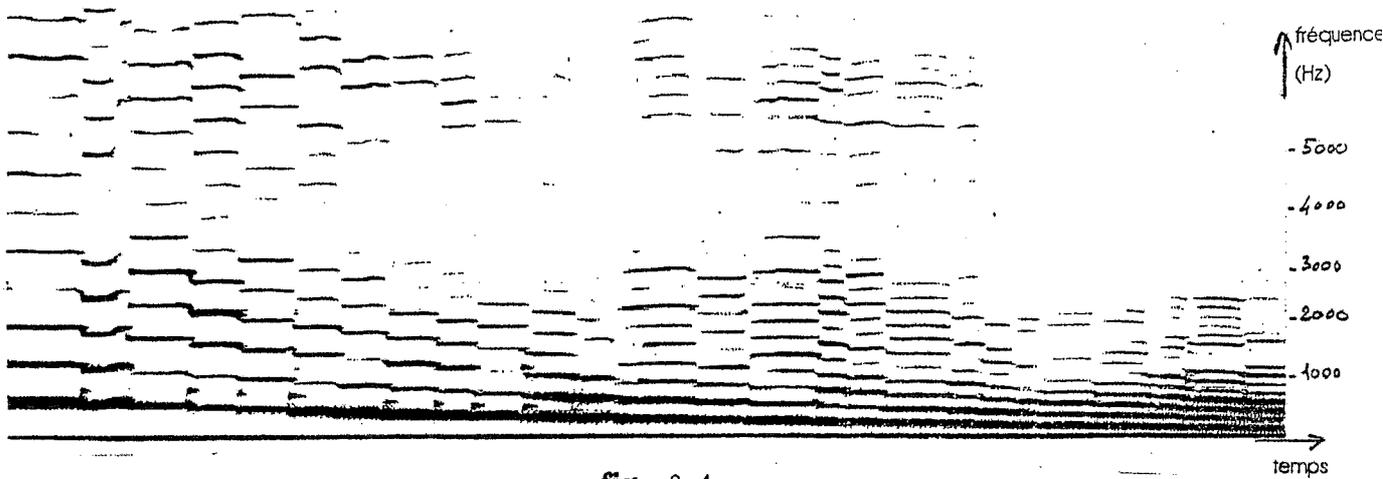


fig. n° 4
gamme chromatique descendante d'un sax alto, le pavillon bouché par un chiffon

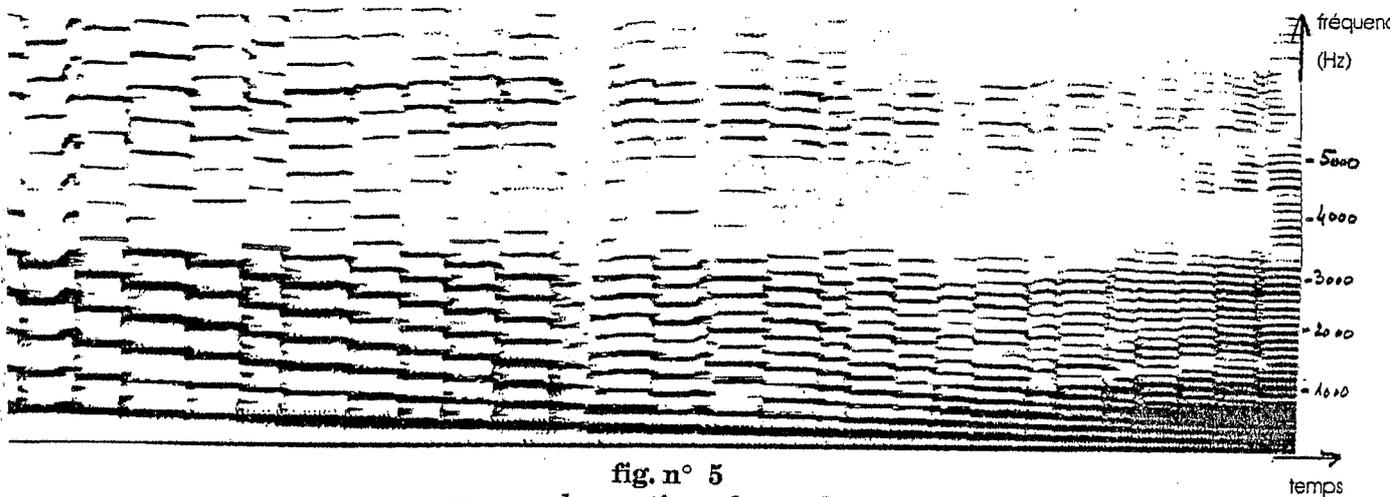


fig. n° 5
gamme chromatique descendante

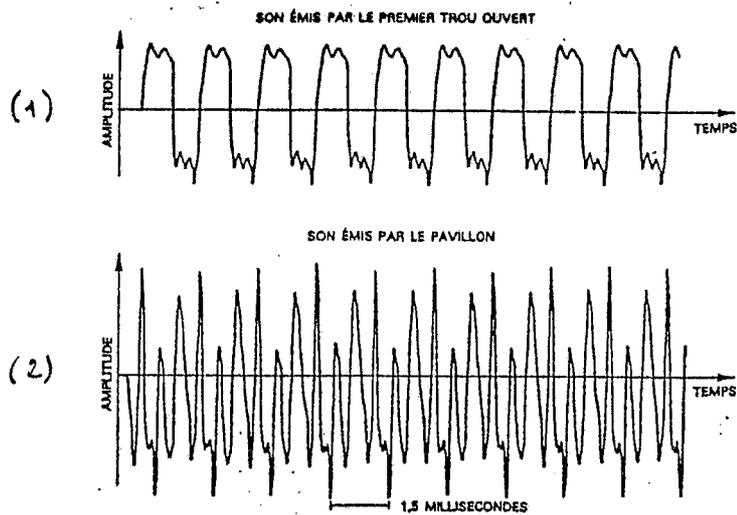


fig. n° 6
(d'après Laloë [15])

La courbe (1) est plus riche en basses fréquences que la courbe (2) : la fondamentale, très présente dans (1), semble absente dans (2).

Approche théorique

Soit par hypothèse un tuyau cylindrique percé régulièrement de seize trous latéraux sur sa deuxième partie :

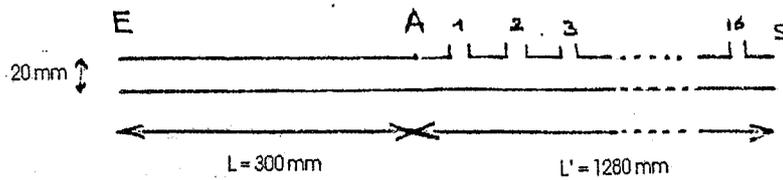


fig. n° 7
coupe longitudinale du filtre acoustique

L' : seize fois la cellule de base de longueur 80 mm.

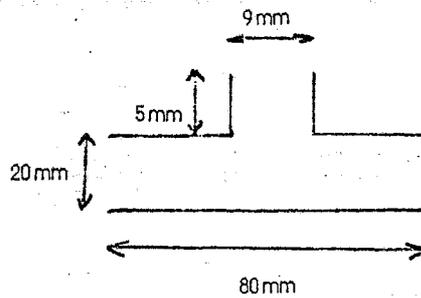


fig. n° 8
coupe longitudinale de la cellule de base du filtre acoustique

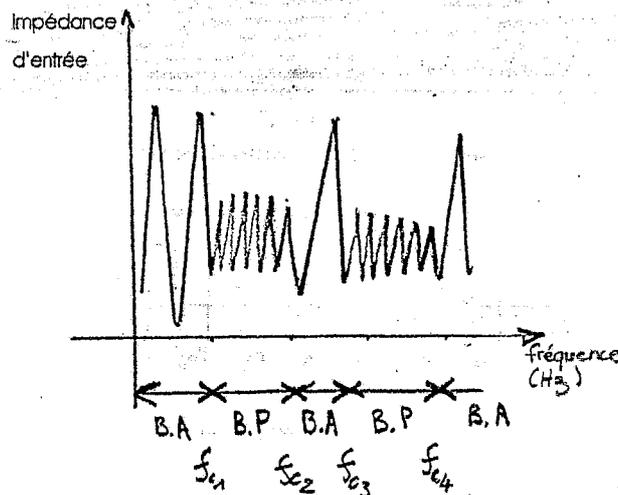


fig. n° 9
diagramme d'impédance d'entrée du filtre acoustique

On distingue sur la courbe ci-dessus deux types de zones de fréquences différentes : les bandes d'arrêt (B.A) et les bandes passantes (B.P) du filtre acoustique.

- Soit un son de fréquence pure d'une bande d'arrêt du filtre acoustique, il se propagera à partir de l'entrée E jusqu'en A (place du premier trou ouvert), où il se réfléchira en quasi-totalité ; en première approximation la

courbe d'impédance d'entrée (dans la bande d'arrêt) est identique à celle du tuyau cylindrique de longueur L . Au niveau de la "barrière fictive" (premier trou ouvert, en A), où pratiquement toute l'énergie est réfléchiée, une petite quantité est rayonnée (de l'ordre de 1 %). De plus, l'onde sonore décroît très rapidement le long du tuyau de A à S, elle est dite évanescence, si bien que les trous latéraux suivants rayonnent de moins en moins et le pavillon pratiquement plus.

- Soit un son de fréquence pure d'une bande passante du filtre acoustique, il se propagera à partir de l'entrée E jusqu'en S, où il se réfléchira en grande partie ; en fait, la résonance a lieu maintenant sur toute la longueur $L + L'$, la "barrière fictive" n'est plus au niveau du premier trou ouvert mais au niveau du pavillon, en ce sens on peut dire que l'onde "ne voit pas" les trous latéraux ouverts. La courbe d'impédance d'entrée est identique à celle du tuyau cylindrique de longueur $L + L'$, ainsi dans la bande passante les fréquences de résonance sont plus serrées et les pics moins hauts à cause des pertes viscothermiques plus importantes (la longueur effective $L + L'$ étant plus grande que dans le cas précédent de longueur effective L). Ainsi c'est le pavillon qui va rayonner la plus grande partie de l'énergie sonore, une petite partie étant rayonnée en quantité très inégale par les différents trous latéraux, cette quantité dépendant de leur diamètre d'ouverture mais aussi de leur place vis-à-vis des noeuds et des ventres du système d'ondes stationnaires (voir [11]).

Analogies

Pour la compréhension du phénomène, nous assimilerons en première approximation le saxophone à un tuyau percé régulièrement de trous latéraux.

Envisageons une note du registre de base avec plusieurs trous de notes ouverts, le la par exemple (huit trous latéraux ouverts), pour laquelle nous allons appliquer le raisonnement de la situation simplifiée précédente.

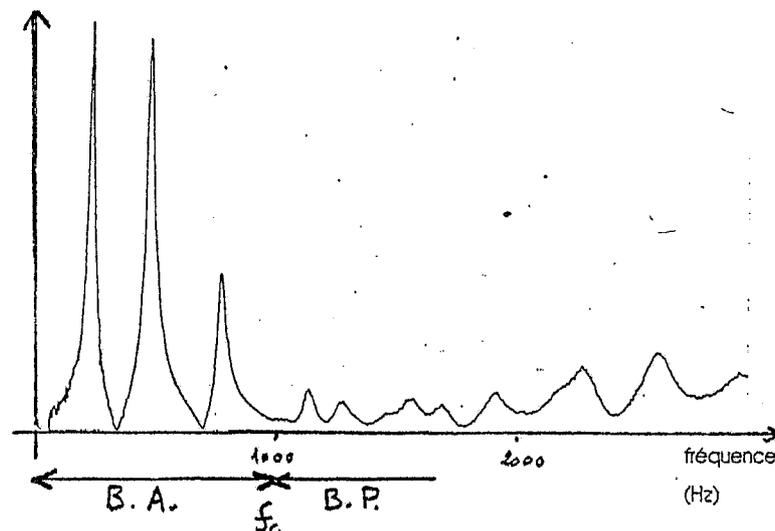


fig. n° 10
diagramme d'impédance d'entrée du la médium

Pour la première bande de fréquence où les pics sont très marqués, la courbe d'impédance d'entrée est celle d'un cône de longueur effective beaucoup plus courte que la longueur totale, cela justifie la première

approximation faite au paragraphe I.2.1 (cône coupé au niveau du premier trou ouvert en partant du bec). Cette bande correspond à la bande d'arrêt du filtre acoustique équivalent.

Au-delà de f_c , les pics ne sont pratiquement plus marqués, les ondes sonores se propageant jusqu'au pavillon s'atténuent fortement par effets viscothermiques d'une part, d'autre part les pertes par rayonnement des trous latéraux et du pavillon impliquent un faible taux de réflexion et donc une résonance peu marquée sur toute la longueur de l'instrument.

Remarque, autre exemple, le basson : on peut mettre en évidence sur sa courbe d'impédance d'entrée la première bande passante pour laquelle les pics d'impédance sont moins élevés et plus serrés, comme pour le filtre théorique.

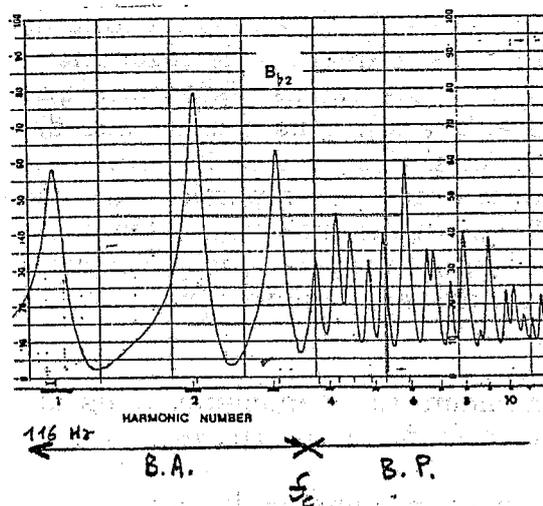


fig. n° 11
diagramme d'impédance d'entrée de si b1 d'un basson
(d'après Backus [1])

Conséquences sur le rayonnement

Pour un doigté d'une note intermédiaire, la plus grande partie de l'énergie sonore (les fréquences les plus graves, les premières harmoniques) est par conséquent rayonnée par le premier trou latéral ouvert. Ceci est particulièrement évident pour le basson, où les trous latéraux sont très éloignés entre eux ; on entend alors clairement le son provenir de sources situées en différents points de l'instrument. Par contre, les hautes fréquences (harmoniques de rang élevé) sont pratiquement rayonnées en totalité par le pavillon. Si on place le microphone près du pavillon, le son apparaîtra donc beaucoup plus clair, à cause de l'enrichissement relatif en fréquences aiguës.

Signalons dans cet ordre d'idée la fabrication d'une sourdine qui avait pour effet d'atténuer le son par suppression des fréquences aiguës, mais qui n'avait aucune influence sur les fréquences graves et qui modifiait le timbre.

Il faut bien noter que le problème de l'étude du rayonnement d'un instrument à trous latéraux est d'une incroyable complexité ! Hormis le fait que la sensation du timbre dépend de la salle, elle dépend aussi de la position de l'auditeur et de l'instrumentiste, car le champ rayonné par plusieurs sources implique un champ d'interférences bien compliqué ; voir

par exemple quelques résultats théoriques et expérimentaux dans Kergomard, [11], [19], et Keefe, [18].

1.3 Les trous de registre

Grâce aux trous latéraux, en utilisant les premiers partiels on peut ainsi obtenir les notes du registre grave et médium (cf. le chapitre suivant). Comme nous l'avons laissé supposer précédemment, les seconds partiels seront utilisables grâce aux trous de registre, et ainsi l'étendue de l'instrument sera complétée vers l'aigu.

Pour un cône de longueur équivalente donnée (par exemple doigté du la), plaçons un trou de petite dimension à mi-longueur, cela imposera une nouvelle condition acoustique : à savoir un noeud de pression pour le système d'ondes stationnaires près de cet endroit (cf. I^{re} partie, III.1.3). Cette nouvelle contrainte acoustique est incompatible avec le système d'ondes stationnaires de la première fréquence de résonance, comme pour les autres fréquences de résonance de rang impair d'ailleurs, la pression acoustique y étant non nulle puisque près d'un maximum.

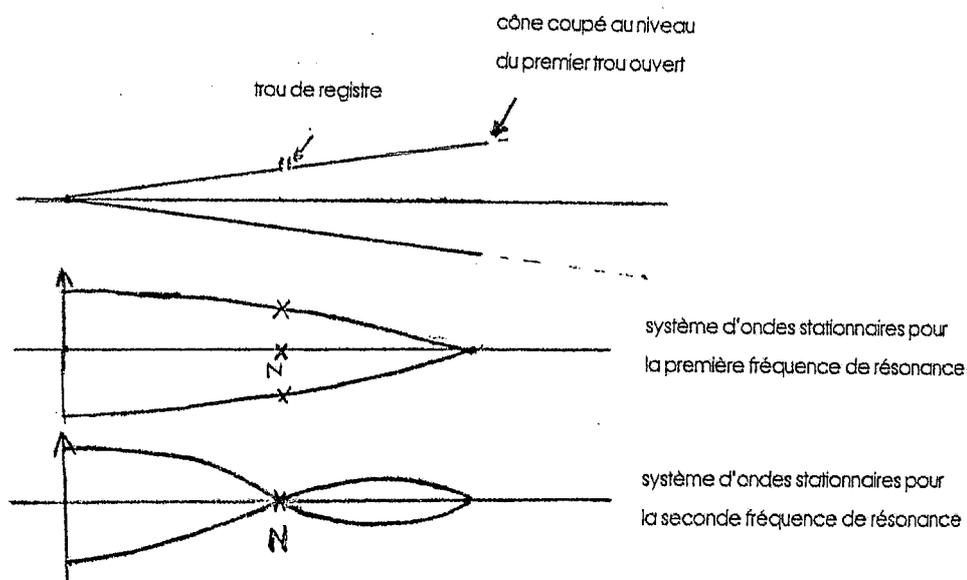


fig. n° 12
trou de registre et ondes stationnaires

En revanche, ceci est compatible avec le système d'ondes stationnaires de la seconde fréquence de résonance, où se trouve déjà un noeud de pression.

Par cette méthode, on peut *a priori* penser qu'il faut une clé de registre pour chaque note de la gamme. En fait, les facteurs d'instruments ont réalisé un compromis, se limitant à deux trous de registre pour une gamme complète : le premier agissant du ré au fa#, le second du sol au do#, ces deux trous de registre étant activés par une seule clé grâce à un ingénieux mécanisme.

Conséquences du trou de registre sur le diagramme d'impédance d'entrée :

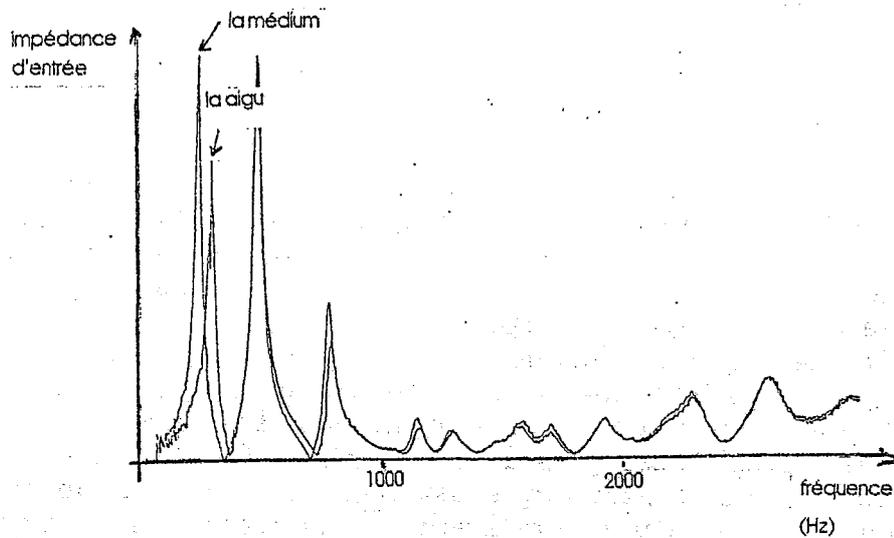


fig. n° 13
diagramme d'impédance d'entrée du la médium et de son octave

Le trou de registre a pour effet d'abaisser et de décaler le premier pic d'impédance, ce qui implique une attaque du régime supérieur (octave) plus facile et plus nette pour le saxophoniste. On peut noter par ailleurs qu'une fois le son attaqué, il peut être refermé sans conséquence sur le timbre.

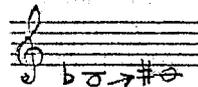
Remarque : pour les autres instruments, il y a un plus grand nombre de trous de registre, trois pour le hautbois, quatre pour le basson. Le saxophone, comme les autres bois coniques (hautbois, basson), octave, car la deuxième fréquence de résonance est le double de la première ; la clarinette, pour sa part, "quintoie", plus exactement il faudrait dire "douzoie", car la deuxième fréquence de résonance est le triple de la première, un triplement de fréquence correspondant à un intervalle de douzième (cf. I^{re} partie, III.1.3).

I.4 Tessiture du saxophone alto

Voyons la tessiture écrite, c'est-à-dire en mi b.

L'extrême grave

Du si b au do # ; c'est la rallonge.



Ces notes correspondent à des partiels de rang 1, les partiels de rang supérieur étant peu utilisés.

La gamme de base

Du ré au do #.

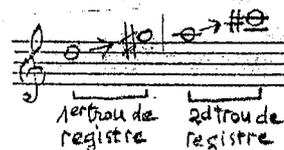


Ces notes correspondent aussi à des partiels de rang 1 (fondamentaux).

Le registre aigu

Du ré au do # aigu.

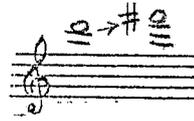
Ce sont les partiels 2 de la gamme de base.



L'extrême aigu

Du ré au fa # aigu.

Ce sont les partiels 2 de doigtés dont les premiers partiels sont peu utilisés, sinon dans la nuance pianissimo car d'émission plus facile.



Voyons par exemple le ré aigu de doigté C1



et le partiel 3 est le si aigu



partiel 2, dont le

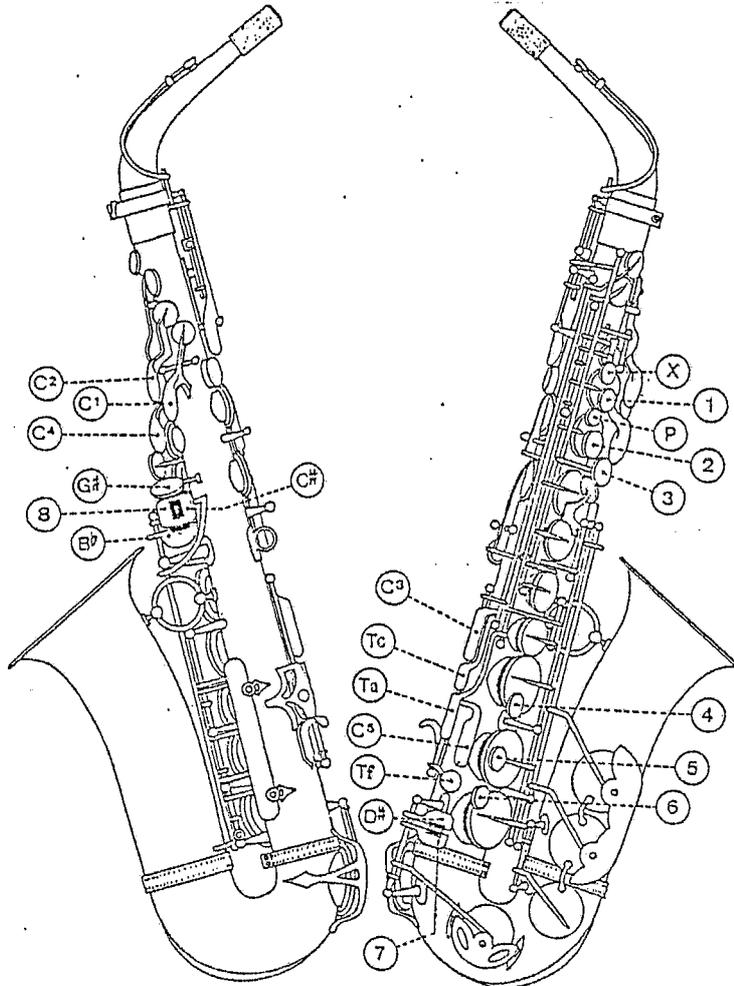


fig. n° 14
références des différentes clés du sax-alto

Le suraigu

Au-delà de la tessiture classique, n'utilisant que des partiels 1 ou 2, le suraigu correspond à des partiels 3, voire 4.

Par exemple, le sol de doigté 1.(P).3/4.6.Ta, un si b en partiel 1



un si b en partiel 2



partiel 3, donne aussi un do en partiel 4



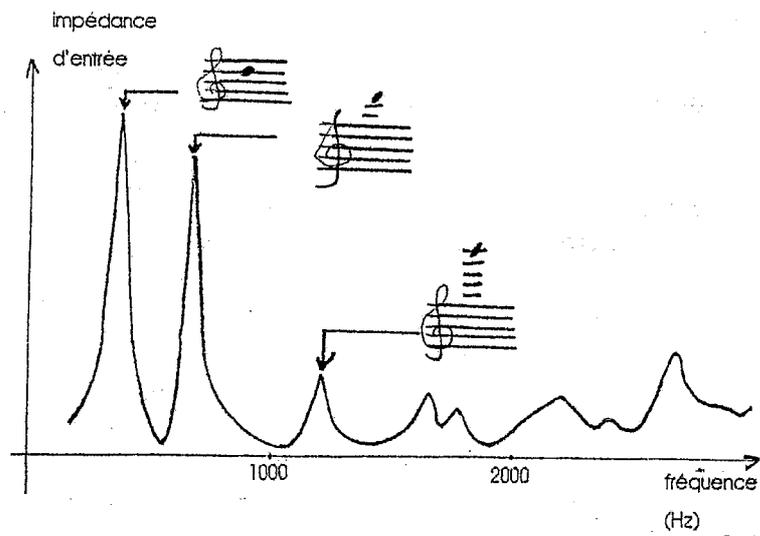


fig. n° 15
diagramme d'impédance d'entrée du ré aigu de doigté C1

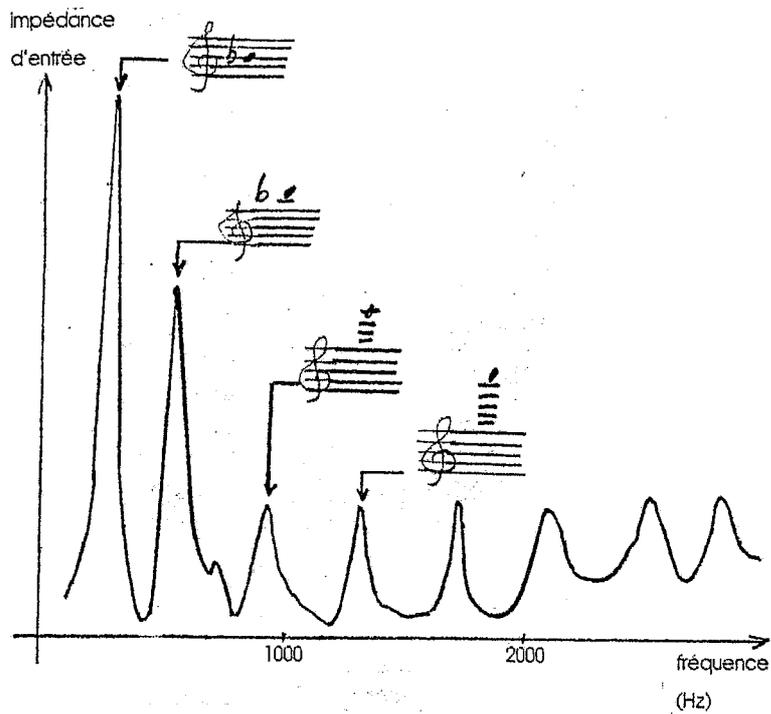


fig. n° 16
diagramme d'impédance d'entrée du sol aigu de doigté 1.(P).3/4.6.Ta

II - QUELQUES PARTICULARITES ACOUSTIQUES DU SAXOPHONE ALTO

II.1 Courbe d'impédance d'entrée, rayonnement, sonagrammes

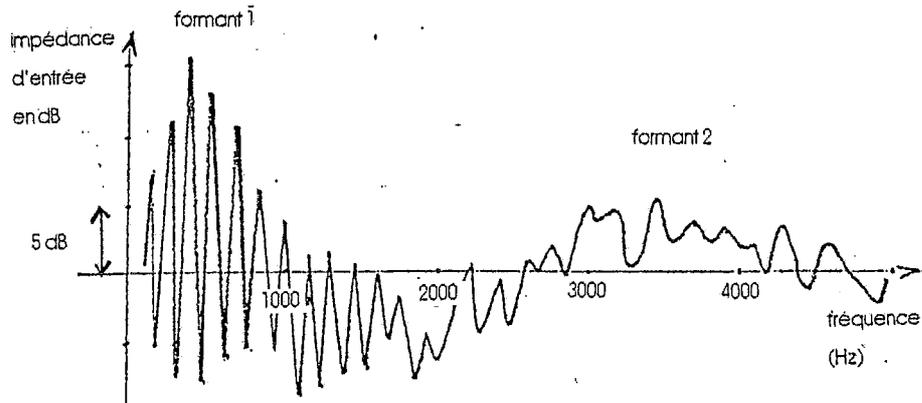


fig. n° 17
diagramme d'impédance d'entrée (en dB) du si grave

Si on observe l'enveloppe de cette courbe (la "courbe des pics"), on peut remarquer deux formants (zones où les pics sont localement les plus hauts) qui sont la conséquence de la perce (forme intérieure) du tuyau sonore.

Ainsi, le formant 1 est la conséquence de la forme conique du saxophone alto. Ceci implique une émission difficile des notes du registre extrême grave: le second pic étant plus haut que le premier, le premier régime d'oscillations (partiel 1) n'est pas aisé d'émission.

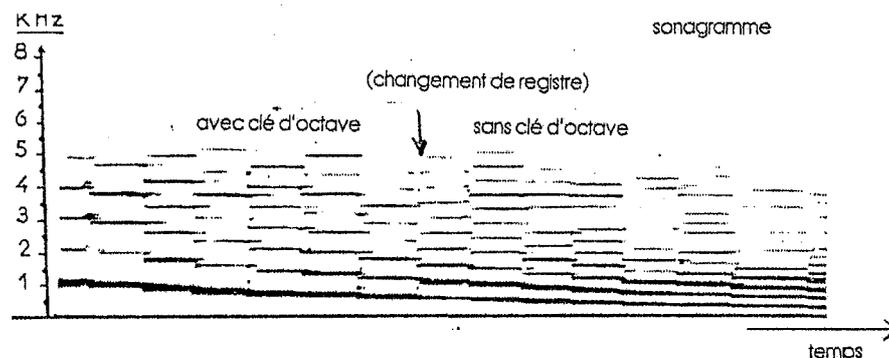


fig. n° 18
gamme chromatique descendante d'un saxophone soprano
(d'après Kergomard, [12])

Ainsi, pour ce premier régime d'oscillations, notes de l'extrême grave et de la gamme de base (♭ à ♯), la seconde harmonique correspondant au second pic de résonance est plus importante que le premier dans le son résultant (cf. sonagramme, fig. n° 18).

Lorsqu'on passe du registre sans clé d'octave (premier registre) au registre avec clé d'octave, l'importance relative des deux premières harmoniques s'inverse.

Cette difficulté d'émission dans le grave ne se retrouve pas pour la clarinette de perce cylindrique, pour laquelle le premier pic de résonance est plus haut que le second.

Remarque : notons que la hauteur du premier pic de résonance du saxophone dépend de manière critique de la fermeture des clés. Un bouchage non hermétique de trous de notes abaisse le premier pic de résonance, ce qui implique un extrême grave d'autant plus difficile.

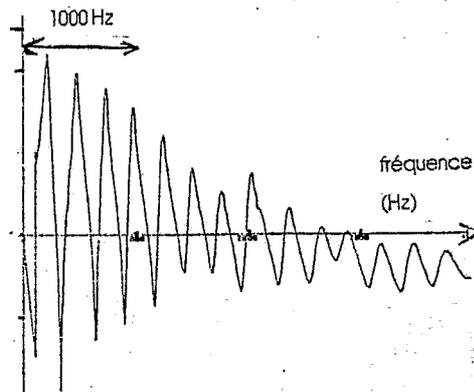


fig. n° 18bis
diagramme d'impédance d'entrée (en dB)
du mi grave de la clarinette

D'autre part, le second formant provient d'une résonance secondaire à l'intérieur du bec, qui module la courbe d'impédance d'entrée d'un cône et qui renforce les harmoniques situées autour de 3000 Hz (cf. fig. n° 21).

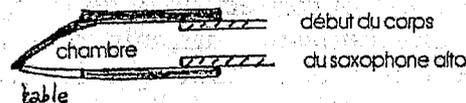


fig. n° 19
coupe longitudinale du bec

Le bec est adapté au corps du saxophone alto par l'extérieur (contrairement à la clarinette par exemple).

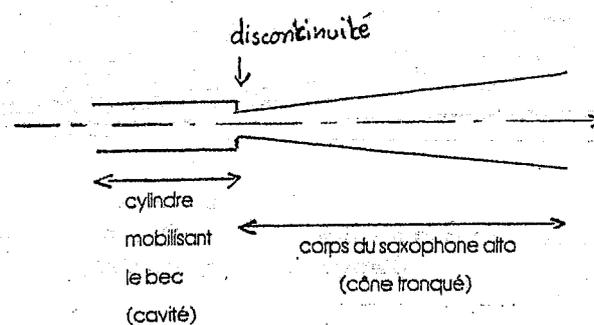


fig. n° 20
forme intérieure (perce) du saxophone alto et de son bec
modifié par un cylindre

Le bec du saxophone alto est en grande partie cylindrique (rayon 8 mm), nous le modélisons donc par un cylindre de même rayon. Nous avons beaucoup simplifié le début du bec (chambre, table, ouverture), dont les paramètres ont sans doute une grande influence pour le saxophoniste mais dont la forme géométrique complexe (pas de symétrie de révolution) interdit actuellement toute modélisation plus précise.

La petite cavité ainsi placée à l'entrée de l'instrument crée une résonance secondaire qui module sa courbe d'impédance d'entrée (formant n° 2) et par conséquent renforce les harmoniques situés autour de 3000 Hz dans le spectre sonore du saxophone (cf. fig. n° 21).

Nous avons adapté à l'intérieur du bec classique un tube cylindrique (cf. fig. n° 23) prolongeant le cône du corps de l'instrument en atténuant la discontinuité. On peut ainsi vérifier que les harmoniques situées autour de 3000 Hz (cf. fig. n° 22) sont beaucoup moins marquées que dans le cas classique (cf. fig. n° 21).

II.2 Facilité d'émission, harmonicité des fréquences de résonance

Pour une "embouchure" donnée, le système va osciller en mettant en jeu plusieurs fréquences (la fondamentale et ses harmoniques) voisines de fréquences de résonance. Par un changement d'embouchure, le musicien va légèrement modifier la hauteur de la note, en décalant les fréquences mises en jeu correspondant alors à d'autres valeurs d'impédance d'entrée, ce qui impliquera une nouvelle couleur du son (l'importance relative de chaque harmonique étant modifiée).

Par conséquent, la prise d'embouchure laisse une certaine latitude d'expression et de réglage de la justesse, tout cela avec en contrepartie une émission stable plus difficile, les fréquences mises en jeu (fondamentale et ses harmoniques) correspondant moins aux fréquences de résonance.

Il semble pourtant certain que l'émission sera d'autant plus facile que les fréquences de résonance seront harmoniques.

Rôle du bec sur l'harmonicité des fréquences de résonance

Mais pour placer le système excitateur (anche) il faut tronquer le cône, ce qui implique une rupture de l'harmonicité initiale des fréquences de résonance de ce dernier. Pour rattraper cela, il faut choisir un bec de volume adéquat, étant entendu qu'il intervient plusieurs phénomènes :

- 1) le volume lui-même, qui doit être proche du volume du cône manquant, prolongeant fictivement le corps de l'instrument conique ;
- 2) la variation de température le long de l'instrument dans les conditions réelles de jeu ; température à l'entrée voisine de 37°C, température à la sortie voisine de celle de la salle ;
- 3) les phénomènes visco-thermiques, c'est-à-dire surtout les phénomènes de frottement de l'air au voisinage des parois.

Les variations et les importances relatives de ces trois termes semblent assez clairs : ils s'équilibrent, pour atteindre en quelque sorte un "compromis d'inharmonicité moyenne minimale", afin de vérifier le mieux possible le postulat de Benade (cf. I^{re} partie, III.4). Mais espérer en déduire le volume du bec optimal est utopique, d'autant plus que l'instrumentiste sera amené à plus ou moins enfoncez son bec pour s'accorder et par conséquent à modifier légèrement l'inharmonicité de ses fréquences de résonance ! Ce dernier sait bien que la facilité ou la difficulté d'émission dans le grave varie peu en fonction de l'enfoncement relatif du bec.

A propos du rôle du matériau

Différence entre le bec métal et le bec ébonite : ce qui est le plus net, c'est *a priori* l'"agressivité" du bec métal. Les attaques sont plus brutales,

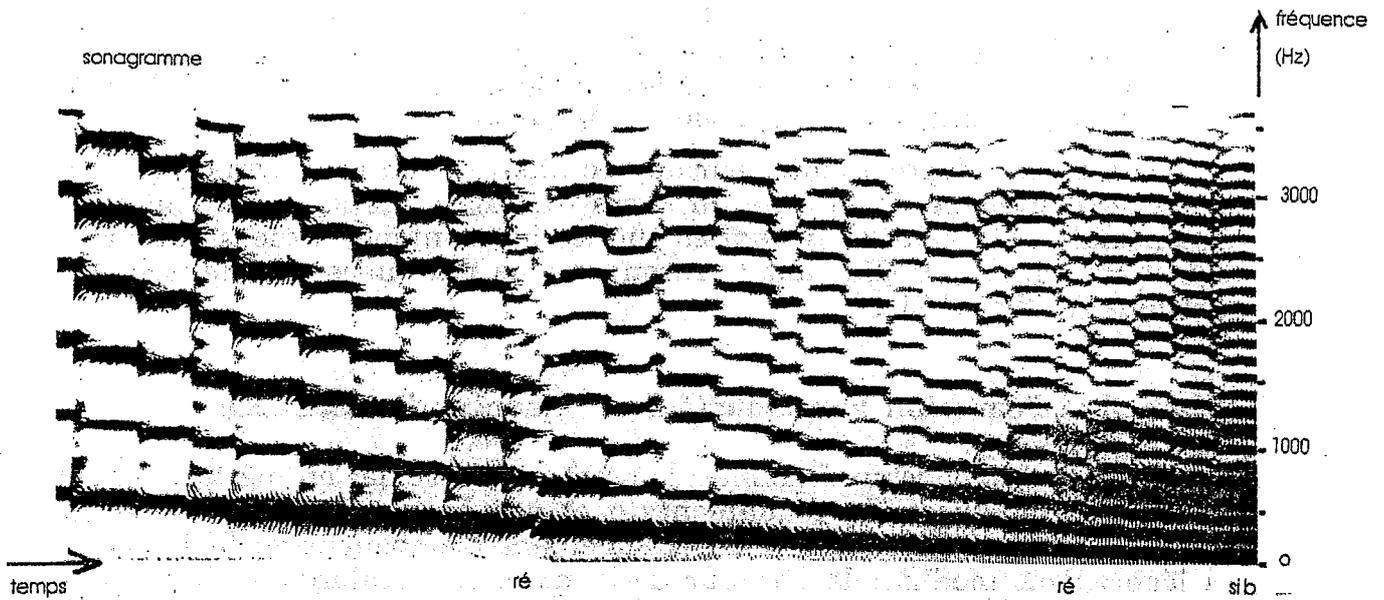


fig. n° 21
gamme chromatique descendante
(saxophone alto avec bec classique)

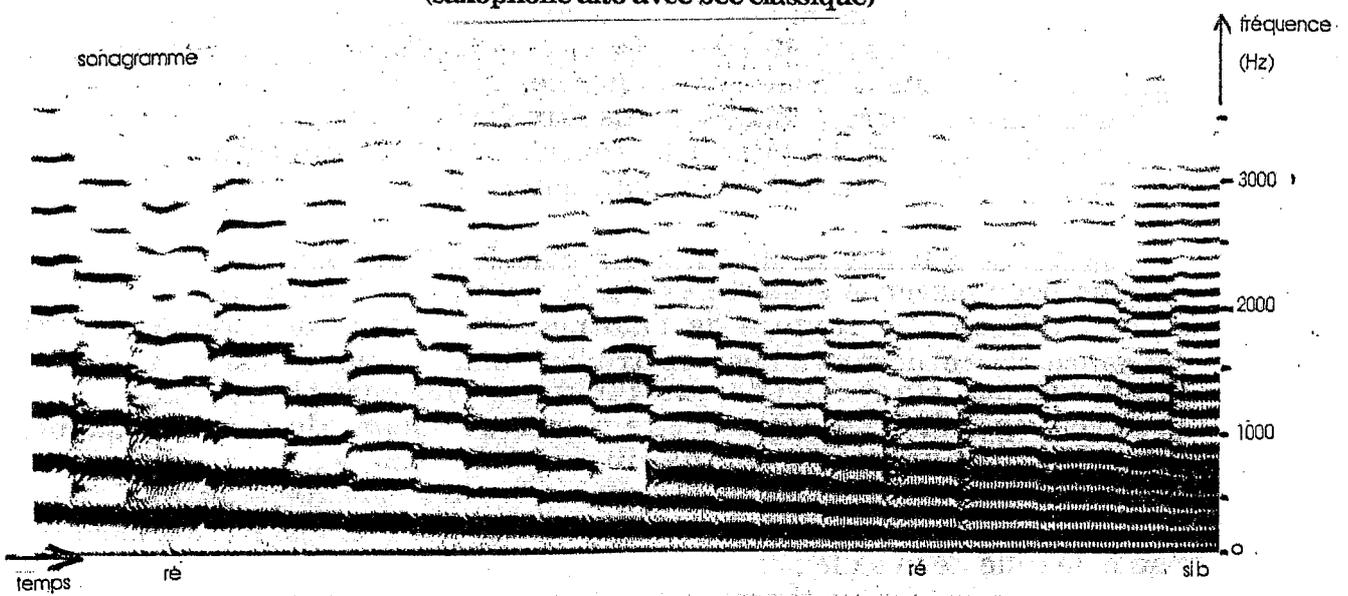


fig. n° 22
gamme chromatique descendante (saxophone alto avec bec
classique muni d'un tube à l'intérieur)

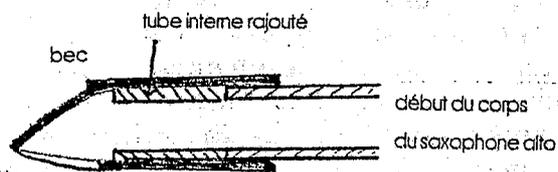


fig. n° 23
coupe longitudinale du bec muni d'un tube cylindrique
de rayon externe 8 mm et interne 6 mm

essentiellement à cause d'une expèce de choc qui se produit quand l'anche tape sur le bec à l'attaque et aussi un peu à l'extinction (cf. Kergomard [12]). Cette explication ne fait pas intervenir le matériau du bec.

Le rôle du matériau reste encore actuellement en grande partie inconnu: s'il est bien clair que la qualité acoustique d'un instrument à vent dépend avant tout de sa forme intérieure (perce), le matériau lui-même a une influence sur le timbre de l'instrument, en absorbant par vibration des parois plus ou moins bien certaines fréquences, modulant ainsi le spectre sonore interne (l'influence des parois tiendrait donc bien plus à l'absorption d'énergie acoustique qu'au rayonnement dans l'espace, négligeable devant celui des orifices).

II.3 Une petite expérience pour conclure

Nous avons prolongé scandaleusement le bec par un tube cylindrique (35 et 75 mm) de même rayon intérieur (8 mm).

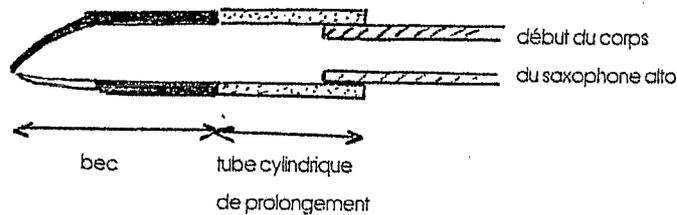


fig. n° 24
coupe longitudinale du bec rallongé par un tube cylindrique de prolongement

Le volume rajouté au corps de l'instrument est alors beaucoup trop grand et implique une très forte inharmonicité des fréquences de résonance (cf. [17bis], IV^e partie, I). Expérimentalement, les notes jouées par le saxophoniste sont abaissées (le tuyau sonore est rallongé), le registre aigu est faux (les trous de registre ne sont plus bien placés), et surtout, arrivé au do # grave, l'émission timbrée n'est plus possible. L'inharmonicité entre les fréquences de résonance est telle que l'émission est impossible (cf. Bouasse et Benade, I^{re} partie, III.4), le régime d'oscillation ne fait intervenir que quelque pics de résonance (les fréquences d'antirésonance au-delà de cette dernière n'interviennent plus) et par un compromis sur ces derniers l'émission est possible.

Remarque : par une émission dite "détimbrée" (en gênant la vibration de l'anche), le saxophoniste ne met pratiquement en jeu que le premier pic de résonance dans le régime d'oscillation, si bien que, quelle que soit l'inharmonicité des fréquences de résonance, toutes les notes sont jouables, même les notes graves au-dessous du do#. En découle une sonorité plus terne, car beaucoup moins riche en harmoniques aigus.

Dans le jeu dit "timbré", l'allongement excessif du bec implique un changement de sonorité dû en particulier au déplacement du formant causé par les dimensions du bec.

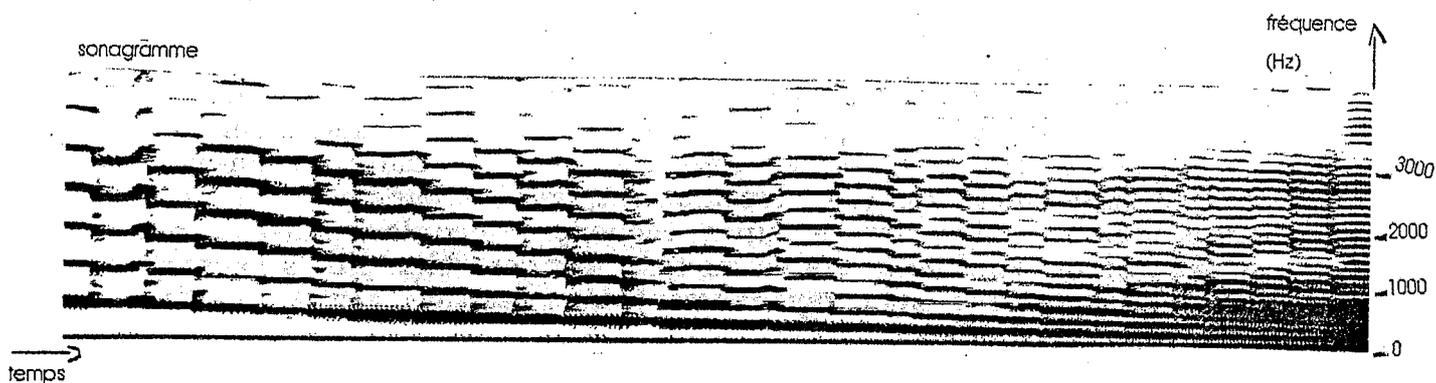


fig. n° 25
gamme chromatique descendante (saxophone alto avec bec classique)

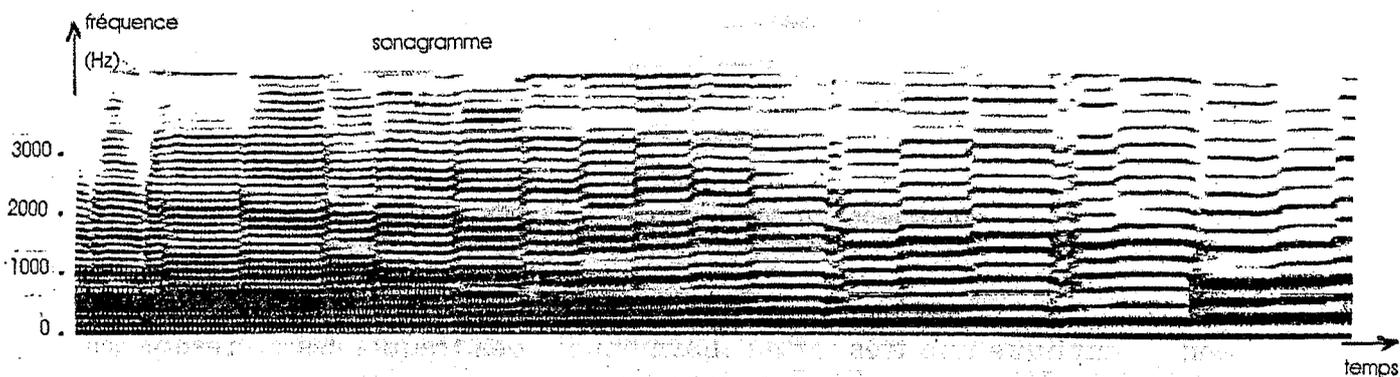


fig. n° 26
gamme chromatique ascendante (saxophone alto avec bec rallongé
d'un tube cylindrique de prolongement)

Comme nous l'avons montré dans la troisième partie de notre D.E.A. (cf. [17bis]), le bec rallongé implique un formant plus bas, 2000 hertz (cf. fig. n° 26), que dans le cas classique, 3000 hertz (cf. fig. n° 25).

A propos de multiphoniques ("sons multiples") : les fréquences de résonance peuvent être si inharmoniques qu'on peut atteindre des régimes d'oscillation "sommés" de plusieurs notes différentes (auditivement parlant).

Voici par exemple le doigté 1.2.3/4.5.C3  son multiple do # -mi :

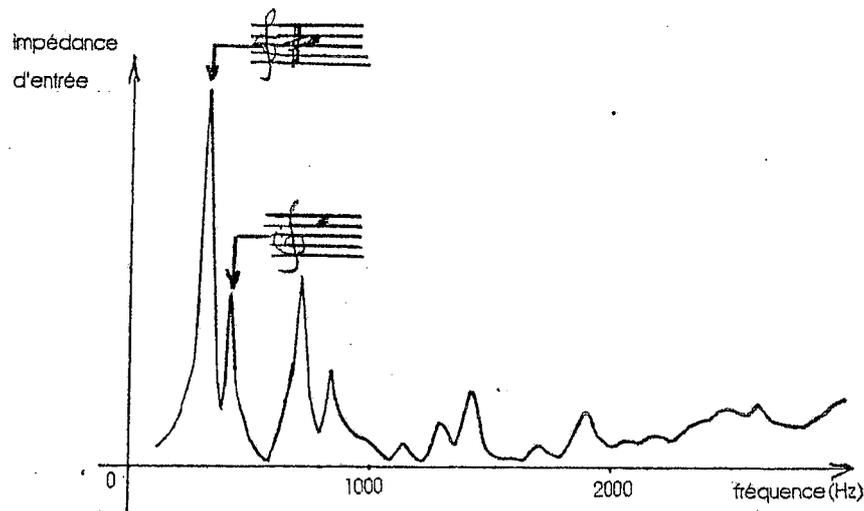


fig. n° 27
diagramme d'impédance d'entrée du saxophone alto pour le doigté multiphonique do # -mi (1.2.3/4.5.C3)

Pour une documentation précise sur les doigtés multiphoniques, consulter le traité de D. Kientzy [28].

Remarque : dans la petite expérience précédente ("bec rallongé"), pour les notes les plus graves on peut obtenir des multiphoniques à cause de la forte inharmonicité des fréquences de résonance.

Bibliographie

Articles

- [1] BACKUS J., "Input impedance curves for the reed instruments", *JASA* 56, 1974, 1266.
- [2] BACKUS J., "Small vibration theory of the clarinet", *JASA* 35, 1963, 305.
- [3] BENADE A. H., BRUCE RICHARDS W., "Oboe normal adjustment via reed and staple proportioning", *JASA* 73, 1983, 1794.
- [4] BENADE A. H., GEBLER J. M., "Reed cavity and neck proportions in conical woodwinds", *JASA* 55, 1974, 458.
- [5] CAUSSE R., KERGOMARD J., LURTON X., "Input impedance of brass musical instruments. Comparison between experiment and numericals models", *JASA* 75, 1984, 241.
- [6] COLE J. E., "Sound propagation in a duct with axial sound speed variation : an exact solution", *Journal of sound and vibration* , 63(2), 1979, 237.
- [7] COLTMAN J. W., "Acoustical analysis of the Boehm flute", *JASA* 65, 1979, 499.
- [8] CUMMINGS A., "Ducts with axial temperature gradients : an approximate solution for sound transmission and generation", *Journal of sound and vibration* 51(1), 1977, 55.
- [9] DEAN AYERS R., ELIASON L. J., MAHGEREFTEH D., "The conical bore in musical acoustics", *JASA* 53, 1985, 528.
- [10] DEFOLLIER C., KERGOMARD J., LESUEUR J. C., LALOE F., "Propagation des ondes dans les tuyaux sonores percés de trous latéraux irréguliers", *Revue du Cathédéc ondes et signal* 79, 1984.
- [11] KERGOMARD J., "Prise de son : le cas des instruments à vent", *L'Audiophile* 4, 95 (avril 1978).
- [12] KERGOMARD J., "Le Saxophone : histoire d'une invention, technique et sonorité", *L'Audiophile* 7 (novembre 1978) et 8 (janvier 1979).
- [13] KERGOMARD J., "Ondes quasi stationnaires dans les pavillons avec pertes visco-thermiques aux parois : calcul de l'impédance", *Acustica* 48, 1981, 31.

- [14] KERGOMARD J., CAUSSE R., "Measurement of acoustic impedance using a capillary : an attempt to achieve optimization", *JASA* (à paraître).
- [15] LALOE S. et F., "La Clarinette", *Pour la science*, mai 1985, 73.
- [16] LURTON X., "Etude analytique de l'impédance d'entrée des instruments à embouchure", *Acustica* 49, 1981, 142.
- [16bis] BACKUS J., "The effect of the player's vocal tract on woodwind instrument tone", *JASA* 78, 1985, 17.

Mémoires de thèse et D.E.A.

- [17] DALMONT J. P., *Etude et réalisation d'un capteur d'impédance à capillaire. Application à l'étude d'un instrument de musique : le hautbois*, D.E.A., université du Maine, Le Mans, 1985.
- [17bis] GILBERT J., *Etude acoustique du saxophone (essai de vulgarisation). Etude théorique et expérimentale de l'influence du bec sur la courbe d'impédance d'entrée*, D.E.A., université du Maine, Le Mans, 1986.
- [18] KEEFE D. H., *Woodwind tone hole acoustics and the spectrum transformation function*, thèse, Case western University.
- [19] KERGOMARD J., *Champ interne et champ externe des instruments à vent*, thèse d'Etat, université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1981.
- [20] LURTON X., *Etude analytique de l'impédance d'entrée des instruments à embouchure*, thèse de 3^e cycle, université du Maine, Le Mans, 1979.

Ouvrages

- [21] Actes du colloque Recherche scientifique et factures d'instruments de musique, CENAM, Paris, 1985.
- [22] *Les Instruments de l'orchestre*, Bibliothèque pour la science, Belin, 1085.
- [23] BENADE A. H., *Fundamentals of musical acoustics*, Oxford U. P., 1976.
- [24] BOUASSE H., *Instruments à vent*, t. I et II, Delagrave, 1930.
- [25] BRUNEAU M., *Introduction aux théories de l'acoustique*, Publications de l'université du Maine, 1983.

- [26] HALL D. E., *Musical acoustics*, Wadsworth publishing Company, 1984.
- [27] KENT E. L., *Musical acoustics : piano and wind instruments*, Dowden Hutchinson and Ross Inc., 1977.
- [28] KIENZY D., *Les Sons multiples aux saxophones*, Salabert, 1987.
- [29] LEIPP E., *Acoustique et musique*, Masson, 1980.
- [30] MATRAS J. J., *Le Son*, PUF "Que sais-je ?", 1948.
- [31] NEDERVEEN C. J., *Acoustical aspect of woodwind instruments*, Amsterdam Frits Knuf, 1969.
- [32] PLOMP R., *Aspects of tone sensation*, Academic Press, 1976.
- [33] ZWICKER E., FELDTKELLER R., *Psychoacoustique (l'oreille récepteur d'information)*, Masson, 1981.

Divers

- [34] Logiciel RESONANCE (X. MEYNIAL et J. KERGOMARD).

Daniel Kientzy

LE JEU DU SAXOPHONE

HISTORIQUE

Comme nous l'avons vu, le couplage anche simple battante à large tuyau conique donne le plus grand champ de liberté qu'un instrument puisse espérer.

Ce champ de liberté permet à différentes cultures d'utiliser le saxophone à sa manière, de lui donner une voix qui correspond à son esthétique. Il ne faut pas plus de trois secondes pour différencier Charlie Parker de Marcel Mule ; mais il n'en faut pas plus pour faire la différence entre un saxophoniste de musique populaire roumaine, et un saxophoniste indien. En effet, il est important de savoir que l'utilisation de cet instrument est en train de continuer de se répandre sur tout le globe, et, chaque fois qu'il "s'installe" quelque part, il montre qu'il est le prolongement du corps, de l'âme du musicien. Que celui-ci soit Egyptien ou Chinois, il pourra utiliser le saxophone et s'exprimer sans trahir sa culture.

Cependant, il faut remarquer que chacune de ces utilisations "ethniques" (incluant aussi l'école classique française) utilise seulement une petite partie de ce grand champ de liberté. Et la variété des timbres de saxophone utilisés dans le jazz ne contredit pas cette constatation. On peut considérer dans ce cas que l'on a affaire à des sous-groupes ethnomusicaux. En effet, s'il y a une très grande différence entre Paul Desmond et Dave Sanborn, en écoutant attentivement la production musicale de chacun d'eux, on entend rapidement qu'ils labourent profondément, mais uniquement, une petite parcelle du fameux champ de liberté. Parcelle géographiquement différemment située, mais pas beaucoup plus grande que celle travaillée par l'"école française".

C'est de toute façon un phénomène très récent, datant des années 50 (puissant inconsciemment dans les pratiques des "futuristes" des années 20), que de vouloir, dans la musique occidentale, cultiver sur un instrument donné le plus grand champ possible de liberté.

Comment, à la vue des possibilités inouïes du saxophone, expliquer l'échec (en tout cas jusqu'à ces dernières années) de l'instrument dans la "musique savante", qui était le but principal de sa conception ?

Bien que Sax lui-même ait dépensé toute son énergie à faire entrer le saxophone dans les "musiques" militaire et paramilitaire, foisonnant à l'époque, donc financièrement plus rentables pour lui, la raison en est le conservatisme du milieu musical (compositeurs et instrumentistes). Conservatisme basé sur une pseudo-historicité ; en effet on utilise en 1900 des

flûtes ou des violons parce que Bach en utilisait déjà, sans se rendre compte que ces instruments n'ont avec la flûte et le violon de Bach qu'un rapport qu'on peut qualifier d'homonymique : la flûte est passée de conique à petits trous à cylindrique à gros trous ; le violon de Guarnerius a été saccagé par de nouveaux barrages, déplacement du manche pour installer des cordes en métal, etc.

C'est alors un milieu au raisonnement déficient, qui se pâme devant une interprétation de Couperin au piano, de Marin Marais au violoncelle, et qui s'insurge contre une interprétation de Mozart au saxophone ...

Au moment où le saxophone peut être joué par des musiciens compétents (vers 1860), l'orchestre s'est déjà quasiment pétrifié. La musique de chambre du moment est destinée aux piano et violon ... De toutes façons, cela se passe en France à une pauvre époque musicale.

Le saxophone a raté son entrée dans la musique savante, sur laquelle la bourgeoisie triomphante a mis depuis plusieurs années sa main figeante. Ce sera très long à rattraper.

Pourtant quelques occasions se présenteront, par exemple :

- à Vienne, avant la deuxième guerre mondiale, mais il n'y a pas de saxophoniste chez les amis des sériels ;
- en Allemagne entre les deux guerres, mais le principal saxophoniste de l'époque est juif (S. Racher) ; de toutes façons, l'instrument est assimilé à la culture juive ?!

Après la deuxième guerre mondiale, dans les années 50-60 la révolution musicale a lieu principalement en Allemagne ; et à Darmstadt il y a de géniaux flûtistes, pianistes, violoncellistes, hautboïstes... ils "rafflent" tout l'intérêt des créateurs, et font exploser leurs instruments.

Pendant ce temps-là, à Paris, le saxophone s'est fourvoyé dans un désuet pseudo-classicisme bêlant, qui fait fuir tous les vrais créateurs.

Cette dernière situation est d'autant plus regrettable que c'est à cette époque que se brisent les formes instrumento-musicales, et que le saxophone aurait pu s'infiltrer dans la musique de son temps.

Heureusement, il semble que depuis le début des années 80, la situation change radicalement, et qu'autour d'une nouvelle esthétique sonore, un répertoire à la pointe de la création soit en train de s'écrire pour les saxophones. Un répertoire enfin en phase avec la création.

En effet, qu'avait connu le saxophone, à quelques exceptions près, depuis sa création ?

1/ des sous-musiques de genre (apparemment suscitées par Sax lui-même, qui n'éditera que cela) ;

2/ des oeuvres academico-rétrogrades, dont se gargarisera l'école française, qui se délecte en 1950 avec le *Caprice en forme de valse* d'Eugène Bozza, alors qu'au même moment Pierre Schaeffer compose la *Symphonie pour un homme seul*, ou savoure en 1954 les pièces de Paul Maurice alors que Pierre Boulez écrit *Le marteau sans maître...*

Le nouveau répertoire, celui des années 80, couvre tous les champs de la création musicale, des oeuvres pour soliste au théâtre musical, en passant

par la musique électroacoustique. Bien qu'entré avec vingt à trente ans de retard, le saxophone a acquis sur la scène musicale contemporaine une place de tout premier plan, et à part celui de la flûte, c'est le répertoire du saxophone qui de tous les instruments s'enrichit le plus vite.

N'ayant pas de passé conséquent sur lequel s'appuyer, l'avenir du saxophone ne peut compter que sur un présent fort (qui seul peut devenir un passé solide...).

Un fort présent est un présent avant-gardiste ; il l'a enfin trouvé.

LA FABRICATION

Des centaines d'opérations sont nécessaires à la fabrication du saxophone, qui se compose de plus de trois cents pièces. Une petite partie seulement d'entre elles ont pu être mécanisées. Cela explique le prix relativement élevé de l'instrument, et plus encore qu'on ne puisse faire des instruments à bon marché pour l'étude. Ceux qui existent sont produits en Extrême-Orient par une main-d'oeuvre sous-payée, et mal conçus.

Le saxophone et la clarinette sont les deux derniers instruments pour lesquels la facture française a gardé une suprématie mondiale. Cela grâce au "flair" de ses concepteurs et par l'équilibre qu'ils ont su garder dans la fabrication entre le mécanique et le manuel.

. les tours automatiques fabriquent les petites pièces de révolution, telles que boules, supports, visserie spéciale, petites cuvettes... ;

. les tours revolvers, semi-automatiques, d'horlogerie ou à barre, réalisent les plus grosses pièces, viroles, emboîtures, tenons, colliers de serrage, grandes cuvettes... ;

. les clés ou gardes, pièces plates, sont, elles, découpées puis cambrées à la presse dans des plaques de laiton ;

. la fabrication du corps (corps principal, culasse, pavillon, bocal) demande un travail précis de chaudronnerie.

Chacune de ces parties est réalisée à partir d'une plaque de laiton pré-cuit, découpée aux cisailles guillotines ou chantourneuses. Travillées au maillet sur des mandrins, ces plaques deviendront des "tuyaux coniques".

Lorsque les deux bords se seront rejoints, ils seront agrafés puis brasés.

Les autres parties du tuyau sont fabriquées de la même manière, puis "étirées" au plomb sur des mandrins afin d'éliminer les traces de bosselure laissées par les coups de maillet, mais surtout pour que le tuyau prenne intérieurement ses dimensions exactes.

Le cintrage des bocal est réalisé, à l'aide d'une glace spéciale qui leur garde au cours de l'opération leur juste conicité.

Les cheminées sont obtenues en étirant le métal avec des boules de métal, après avoir réalisé un avant-trou. La cheminée sera bien entendu parfaitement aplaniée, afin de recevoir les tampons (qui ont l'ambition de boucher hermétiquement ladite cheminée).

Toutes les pièces ainsi usinées vont pouvoir passer au montage qui, lui, se fait à la main, par une main-d'oeuvre hautement qualifiée.

Chaque monteur "pré-monte" lui-même un saxophone entièrement, en ajustant par retouches successives les pièces qui lui sont confiées.

Arrivé à un premier stade d'ajustement satisfaisant, l'instrument sera démonté, puis les clés, repérées par numérotage (afin de retrouver leur corps respectif), passeront au polissage puis au dégraissage (aux ultra-sons). Avant d'être remontées, elles seront soit vernies pour garder le brillant "or" naturel, soit trempées dans des bains d'argent.

A la fin du remontage, les tampons seront collés, puis on ajustera les lièges et feutres, ainsi que les correspondances. On vérifiera les levées de tampons, et surtout leur obturation.

Les instruments passeront ensuite chez l'essayeur, qui, le cas échéant, les renverra aux monteurs autant de fois qu'il sera nécessaire pour que l'instrument lui donne satisfaction.

Il est d'ailleurs à remarquer à ce sujet que, bien que la plus grande vente de saxophones se réalise sur le secteur "jazz", ce sont presque toujours des "classiques" qui sont essayeurs et conseillers des grandes maisons.

L'ENREGISTREMENT, L'AMPLIFICATION, LE CAPTAGE DU SON

Nous avons vu que le saxophone rayonnait à la fois par le pavillon et par les trous latéraux, que les fréquences émises par ces deux sources n'étaient pas du tout du même type, mais que c'est leur globalité qui constitue le son du saxophone.

Les problèmes soulevés par le captage du son diffèrent en fonction de la situation et du but :

- enregistrement du saxophone seul (en tous cas soliste) dans un local à l'acoustique "musicale" ;
- enregistrement du saxophone seul dans un local "mat" ou engendrant un son insatisfaisant ;
- amplification et/ou traitement électroacoustique en temps réel (voire différé).

Dans le premier cas on pourra, en plaçant le ou les microphones assez loin, capter plus ou moins ce que l'oreille entend dans le lieu, et pour jouer sur la présence, rapprocher, éloigner ou déplacer un microphone de l'axe du pavillon (même à 5 mètres, un microphone électrostatique, s'il est dans l'axe du pavillon, donnera un son nasillard).

Les deuxième et troisième cas posent des problèmes qui doivent se résoudre avec des solutions identiques. En effet, en ce qui concerne le deuxième cas, si le son du local n'est pas bon, il faudra post-traiter le son par des moyens électroacoustiques, ce qui demande que le son soit le moins possible coloré par les résonances du lieu dans lequel il a été capté. A cette fin, le captage devra s'effectuer de très près.

Pour le troisième cas, l'amplification demande des précautions particulières contre l'"effet Larsen", qui font que la solution la plus efficace est de capter très près, afin de ne demander qu'une faible sensibilité au microphone : celui-ci ne captera alors que les sources sonores situées très près de lui, "oubliant" les autres - par exemple, si le saxophone joue avec des instruments qui subissent des traitements contradictoires.

Pour capter le plus correctement possible de près le son des saxophones, il faut plusieurs microphones en tous cas au moins deux ; un sera affecté au pavillon (dans le cas des saxophones courbes, il pourra aussi capter les sources des trous " de la main gauche") ; un ou deux (voire cinq pour le contrebasse) seront nécessaires pour capter les sources "trous latéraux".

Tous les signaux captés devront être utilisés en "mono".

Dans certains cas de sonorisation ou "attaque" de module de transformation électroacoustique (flager, Wha-Wha, synthés...), une cellule de contact placée sur ou dans le bocal peut donner d'excellents résultats (après traitement), bien que le spectre capté manque sérieusement de fréquences aiguës, que l'on ne peut "trouver" qu'au sortir du pavillon.

N. B. : Que ce soit en prise de son rapprochée ou éloignée, les problèmes soulevés par le bruit de la cléterie sont à peu près les mêmes. En effet, si on éloigne le micro, on est obligé d'augmenter sa sensibilité.

NOUVELLE VIRTUOSITE

Ce n'est que depuis quelques années, et plus récemment encore pour le saxophone, que l'on peut employer ce terme sans abus de langage.

En effet, on demandait d'un point de vue technique aux saxophonistes, et d'une manière générale à tous les instrumentistes - ce que continue malheureusement de leur demander le Conservatoire -, de faire le plus de notes possibles en un minimum de temps, de jouer juste dans un "univers" de demi-tons tempérés ; d'avoir un timbre réglé une fois pour toutes au cours de leurs études au Conservatoire ; et cela sur un seul membre de la famille des saxophones : l'alto.

Actuellement, le saxophoniste (comme le flûtiste "contemporain", bien entendu) doit jouer de tous les membres de la famille, et passer de l'un à l'autre en quelques secondes, voire d'en jouer deux simultanément. Ceci demande une VRAIE maîtrise de l'embouchure.

D'un point de vue de "virtuosité digitale", un autre bouleversement s'est produit: la pratique du jeu en microtonie. Pour le réaliser, l'instrumentiste devra utiliser des doigtés d'une extrême complication. Par exemple, on peut considérer que, pour un saxophoniste, l'exécution d'une oeuvre entièrement en microtonie peut l'amener à un changement "digital", par rapport à un jeu "normal", changement bien plus considérable que s'il devait jouer une étude de Ferling au hautbois, instrument qu'il prendrait pour la première fois.

D'autre part, en ce qui concerne le timbre et l'enveloppe, il est obligé à un contrôle inconnu dans les techniques "classiques". En effet, les compositeurs ayant, grâce à l'électroacoustique, décortiqué, puis recréé le son, ils commencent à demander aux instrumentistes ce qu'ils n'attendaient dans les années 50/60, que des "machines de studio".

CARACTERISTIQUES GENERALES, MODES DE JEU

Le(s) saxophone(s) consomment, selon la nuance, le registre et le membre de la famille, des quantités d'air très variables. Un son fff dans

l'extrême grave du contrebasse, pourra ne durer que cinq secondes, alors qu'un **pp** dans le haut médium de l'alto, pourra durer une minute.

Bien entendu, dans la plupart des situations, le souffle continu est possible, et en théorie rend quasiment illimitée la durée d'une note... En tous cas, des sons correspondant à la durée de plusieurs expirations sont possibles.

N. B. : La pratique du souffle continu consiste à respirer par le nez, pendant que l'on expulse une quantité d'air qui aura été préalablement emmagasinée dans la bouche.

L'étendue "normale" des saxophones est de deux octaves et une sixte mineure. Il est possible, grâce à des doigtés spéciaux, de l'étendre d'une sixte.

N. B. : Le baryton peut facilement l'augmenter d'une octave.

Au-delà, l'extension dans le suraigu demande d'utiliser un matériel (bec, anche) trop dur, comparable à celui de l'"école classique", qui empêche la plupart des modes de jeux nécessaires à l'interprétation de la musique contemporaine, et transforme la souplesse de jeu et d'expression du saxophone, en une ridicule rigidité pseudo-sérieuse.

Le saxophone est conçu pour jouer en demi-tons tempérés. Cependant, grâce à des doigtés spéciaux, il peut sur presque toute son étendue, jouer en **MICROTONIE**, abusivement nommée gamme en quarts de ton. En effet, les hauteurs qu'il émet entre les demi-tons ne sont jamais à équidistance de la note supérieure et inférieure.

Il faut noter que le jeu en microtonie est très difficile, du point de vue des doigtés, et que le timbre est altéré par les fourches que l'on crée pour abaisser le son.

C'est le plus souvent en abaissant la note immédiatement supérieure que l'on obtient les micro-intervalles.

Ex. : Mi s'obtient à partir du Fa $123/4$ abaissé avec la clef $6:123/4$ 6.

C'est dans ses possibilités de nuances et d'accents que le saxophone possède les moyens d'expression les plus originaux. Bien que le penchant naturel du saxophone soit d'être maigre dans l'aigu et grossier dans le grave, il est possible à un instrumentiste sérieux de jouer **fff** dans l'aigu et s'il pratique le détimbré, de jouer **ppp** dans l'extrême grave.

Le **DETIMBRE** consiste à enserrer le couple anche/bec plus près du bout, et à ne pincer qu'avec la "force" des lèvres, sans s'aider de la pression de la mâchoire inférieure. Ce mode de jeu permet dans l'extrême grave les nuances les plus tenues que l'on puisse imaginer. Sur les gros saxophones (du baryton au contrebasse), on peut obtenir, dans l'extrême grave et une bonne partie du grave, un résultat similaire, en plaçant, pendant le jeu, la langue à plat sous l'anche pour empêcher de vibrer pleinement : c'est l'**ETOUFFÉ**.

Le **LIE** est le mode de jeu le plus aisé sur les saxophones, principalement le lié ascendant.

Comme les **ATTACHES DETACHEES** peuvent être très variées dans leur douceur ou leur vivacité, les attaques peuvent même, grâce au slap, se rapprocher des caractéristiques de cordes pincées. On peut d'autre part, sur

une grande partie de la tessiture, pratiquer le double ou triple détaché.

Les sons peuvent enfin naître sans avoir d'attaque de début audible.

Le SLAP est le type d'attaque le plus extraordinaire qui soit. Il peut aussi être le plus court détaché. Il ne fonctionne "réellement" que sur l'harmonique 1. Cependant, si le son est entretenu à la suite du slap, il est possible de slaper dans le médium (harmonique 2), et on aura l'illusion que le slap a eu lieu à la hauteur de la note tenue. Il est à remarquer que si le saxophoniste ouvre la bouche une fraction de seconde, immédiatement après avoir slapé, le son émis sera plus haut que le son résultant d'un jeu normal avec le même doigté. Dans l'extrême grave, le doigté de si b donne un si un demi-ton au dessus; vers la limite supérieure du registre grave, le do# donne approximativement un mi (3^{ce} au-dessus), le tuyau fonctionnant là en tuyau ouvert.

Le slap s'obtient en plaquant l'anche contre le bec, tout en créant un phénomène de ventouse sous le battant, puis en retirant la langue brusquement. L'anche s'écartera plus que d'habitude du bec, et reviendra cogner/claquer à son premier contact contre celui-ci.

Après un silence principalement, il est possible d'utiliser le bruit provoqué par le choc du tampon sur la cheminée, pour faire des ATTAQUES DE CLEFS.

En soufflant assez fort, sans serrer les lèvres, si on "projette" la langue à plat sous l'anche, cette dernière plaquera violemment contre le bec, et sans vibrer elle-même, provoquera un court ébranlement de la colonne d'air définie par le doigté choisi. Nous obtiendrons ainsi un TONGUE RAM BEC qui ne fonctionne que sur le régime 1.

La terminaison des sons peut être elle aussi finement contrôlée. Le son peut disparaître SANS FIN audible. Le son peut s'achever sur une TERMINAISON BLOQUEE. Le son peut se clore sur un subit renforcement d'intensité: SON JETE. Il est possible en combinant la terminaison bloquée et le son jeté, d'imiter la diffusion d'un son par une bande qui défilerait à l'envers: c'est le SON A L'ENVERS.

Un grand nombre de notes ont plusieurs possibilités de doigtés quasi synonymes. En les alternant, on peut réaliser des TIMBROLODIES (mélodies de timbres).

Le FLATTEMENT était aux XVII^e et XVIII^e siècles, un ornement très utilisé sur les instruments à vent (à trous latéraux). Il consistait à "battre" le bord du trou immédiatement situé après le premier ouvert. Cet ornement est possible sur la plus grande partie de l'étendue.

Le FLATTERZUNG s'obtient en plaçant la langue comme pour prononcer le RR français (comme dans teRRorisme).

Si on utilise, à l'attaque, cette possibilité d'infléchir vers le grave la hauteur, grâce au relâchement de la pince, et qu'aussitôt après on rétablit la hauteur "réelle", on obtient un SMEAR.

D'autre part, il est possible, à l'intérieur de l'ambitus réalisable sur un seul régime (soit le premier, soit le second...), de réaliser des GLISSES DE CLEFS en levant celles-ci très progressivement et en accompagnant ce mouvement d'une modification adéquate de la pince.

Si l'instrumentiste chante à l'unisson approximatif (ou à l'octave approximative) sur un son de saxophone plutôt timbré, il obtient le GROWL, son extrêmement saturé. Pour réaliser une polyphonie (qui ne pourra toutefois être qu'élémentaire), il est préférable que la voix soit superposée à un son instrumental détimbré.

La BIPHONIE consiste à jouer en même temps (dans la même bouche) de deux saxophones. Les contraintes ergonomiques entraînent deux groupes de possibilités :

- le jeu sur pédale cornemusien,
- le jeu contrapuntique.

Deux saxophones joués simultanément par la même bouche ont un son absolument original, inimitable par deux saxophonistes qui joueraient chacun une des parties.

Les deux groupes de possibilités biphoniques ont des contraintes communes :

- les nuances des deux instruments évoluent parallèlement à l'intérieur d'un champ qui va du **mp** au **ff** ;
- les accents, articulations, vibrato, smear, glissés de bouche, sont parallèles ;
- le flatterzung colore les deux instruments simultanément ;
- les deux instruments doivent commencer en même temps, et il ne peut y avoir de silence dans une partie, pendant que l'autre continuerait.

Il est possible d'utiliser le CLIQUETIS, malheureusement inhérent à l'instrument, à des fins musicales, principalement en le traitant électroacoustiquement.

Il est aussi possible d'exploiter les PERCUSSIONS DE TAMPONS pour créer des "mélodies" de sons très brefs (et peu sonores). Pour que les hauteurs correspondent aux doigtés (sur le registre 1 uniquement), il faut que le bec soit fermé. Bec ouvert, le son des percussions de clés est transposé d'un demi-ton dans le grave des possibilités, à une quarte dans l'aigu.

JEU EOLIEN : les possibilités de mélange contrôlé de souffle et de son sont très limitées aux saxophones. *Grosso modo*, il faut choisir entre le souffle ou le son, et dans tous les cas, le souffle n'est jamais très puissant. Cependant, amplifié, il donne d'excellents résultats. On a donc la possibilité de commencer par le son soufflé et passer progressivement dans une nuance **p** ou **mp** au son "normal", jouer ce dernier dans la nuance que l'on veut, revenir au souffle avec une nuance toujours **p** ou **mp**. Cette opération peut se faire sur un son tenu ou un mouvement mélodique.

Pour un puissant son de souffle aux saxophones, il faut enlever le bec, et jouer en FLUTAGE au bord du bocal. Les sons de souffle ainsi obtenus sont mélodisables dans une gamme complètement détempérée par le raccourcissement (absence du bec) et le fait que le tuyau est ouvert des deux côtés. De toutes façons, les hauteurs sont difficilement "identifiables" et se définissent principalement les unes par rapport aux autres.

Les SONS DE TAUREAU se font en soufflant directement à l'extrémité du bocal, en pinçant les lèvres de façon à ce qu'elles ne vibrent pas de façon

cohérente ; on obtient une sorte de bruit blanc que l'on peut moduler de façon aléatoire avec les doigtés.

Le TONGUE RAM est un son très bref, précédé d'une courte traînée de souffle. Il s'obtient (sans bec) en projetant violemment la langue dans l'orifice du bocal, ce qui a pour effet, après avoir produit un souffle, de boucher parfaitement le bout du tuyau, et de faire résonner la colonne d'air délimitée par celui-ci.

Toujours en l'absence du bec, on peut jouer en mode OPHICLEIDE, les lèvres vibrant sur l'orifice du bocal en anches lippales. L'absence de bec, raccourcissant là aussi le tuyau, entraîne une échelle détempérée.

Dans la catégorie "instruments préparés", à laquelle on peut rattacher flûtage, son de taureau, langue ram et ophicléide, il faut aussi noter que l'on peut utiliser à des fins musicales l'ensemble BEC + BOCAL SEULS, qui disposent d'un ambitus d'une quarte environ, et le BEC SEUL (avec son anche) qui a un ambitus d'une quinte.

Bibliographie

CHAUTEMPS J. L., KIENTZY D., LONDEIX J. M., *Le Saxophone*, Paris, J. C. Lattès / Salabert, septembre 1987.

LONDEIX J. M., *Musique pour saxophone*, vol. II, Paris, Roncorp.

KIENTZY D., *Les Sons multiples aux saxophones*, Paris, Salabert, 1981.

