

INTERPRETATION DE L'ÉVALUATION SUBJECTIVE DE LA QUALITÉ D'UN INSTRUMENT DE MUSIQUE PAR DES PARAMÈTRES PHYSIQUES OBJECTIFS

- Etude préliminaire
réalisée sur une série de trompettes en Ut -

REMARQUE : le document contient des mots en caractère double suivi d'un numéro qui renvoie à des notes développées en annexe dans le document intitulé "notes explicatives".

Présentation du projet

Le but du projet est de relier les appréciations subjectives d'un musicien sur la qualité d'un instrument de musique avec des grandeurs physiques mesurables sur l'instrument lui-même.

Il s'agit, en d'autres termes, d'essayer de définir de manière fiable un jeu de paramètres physiques caractéristiques permettant de comprendre à priori le comportement d'un instrument de musique.

Les travaux de recherche déjà accomplis dans ce domaine sont relativement peu nombreux. L'examen bibliographique met à jour deux publications qui rendent compte, d'une part, d'une étude effectuée au milieu des années 70 par deux chercheurs anglais¹ sur le trombone à coulisse et, d'autre part, de celle menée une dizaine d'années plus tard par un scientifique français² sur des jeux de cordes de guitares.

En outre, il est intéressant de noter que ce type de démarche est beaucoup plus fréquent en psycho-acoustique³ où l'on s'intéresse notamment aux mécanismes de perception du timbre⁴, mais également en acoustique architecturale⁵ où l'on élabore des modèles objectifs de caractérisation de la qualité acoustique d'une salle de concert.

Par ailleurs, deux chercheurs autrichiens⁶ ont privilégié une approche plutôt objective du problème en développant, pour les cuivres⁷, un système d'analyse informatisé qui fournit des résultats physiques issus de mesures acoustiques et qui esquisse des relations avec certaines appréciations de jeu.

L'étude que nous proposons s'inscrit dans la lignée de ces travaux mais fournit aussi des approches originales tant au niveau des tests subjectifs qu'au niveau de la recherche des grandeurs physiques caractéristiques.

I- La collecte et l'analyse de l'appréciation des instruments

I-a. les tests subjectifs

La première étape de l'étude consiste à recueillir les informations provenant de l'évaluation subjective des instruments.

Pour cela, une série de tests est effectuée pour confronter successivement des trompettistes⁸ - les sujets - avec un ensemble de trompettes en Ut⁸ de différentes marques - les objets - .

Le protocole du test⁹ et les questions posées aux sujets sont déterminés par le type d'analyse retenu pour traiter les résultats (exposé au paragraphe suivant).

Dans le cas présent, le test se déroule en deux parties : en premier lieu, une estimation chiffrée de la dissemblance¹⁰ entre les objets présentés par paire puis un essai plus informel de chaque trompette prise individuellement avec la possibilité pour les sujets de donner toutes leurs impressions perceptives sans aucune contrainte.

Des conditions expérimentales¹¹ spécifiques sont mises en place afin, d'une part, de placer les sujets dans un environnement acoustique familier mais aussi identique pour tous et, d'autre part, de limiter les effets de contexte liés au contact avec les objets.

I-b. l'analyse des données

Le choix de l'analyse dépend de la nature des résultats que l'on veut tirer de l'expérience; il paraît donc opportun, dans le cas présent, d'opter pour une analyse de type multidimensionnelle¹² plutôt que sémantique¹².

En effet, puisque l'on ignore tout a priori des critères que les sujets vont utiliser pour effectuer leur appréciation et que ce sont précisément eux que l'on cherche à interpréter objectivement, le jugement de dissemblance qui évite la contrainte de facteurs perceptifs imposés semble être la démarche la plus adaptée à notre problème.

A partir de ces données numériques, l'analyse multidimensionnelle élabore un espace perceptif dans lequel les valeurs des dissemblances sont converties en distances¹³ entre les objets et où chaque axe correspond à un critère subjectif d'appréciation.

La dimension de cet espace - c'est-à-dire le nombre d'axes - est définie de manière optimum grâce à des indices statistiques¹⁴ qui estiment l'erreur entre le modèle mathématique de représentation et l'espace réel. Dans le cas présent, la configuration optimale d'analyse¹⁵ possède trois dimensions.

En contrepartie, l'absence d'élément sémantique dans les données brutes de l'analyse empêche la résolution complète du problème dans la mesure où les axes perceptifs dégagés sont dépourvus de toute dénomination.

Cet aspect de l'analyse multidimensionnelle constitue l'un de ses principaux inconvénients¹⁶; il est en partie surmonté grâce aux éléments recueillis dans la seconde partie des tests.

En effet, les appréciations libres des sujets sur chaque trompette ainsi que des avis pris auprès de certains trompettistes fournissent suffisamment d'informations pour émettre des hypothèses tangibles sur la définition des axes en terme de critères perceptifs. C'est ainsi que les trois dimensions de l'espace mentionné précédemment peuvent s'illustrer respectivement par les notions de "largeur du son", "touche¹⁷" et "facilité de jeu" de l'instrument.

II- La caractérisation physique des instruments

II-a. approche géométrique

Des mesures géométriques sont effectuées en plusieurs points sur les deux parties les plus influentes de l'instrument : la branche¹⁸ avec l'embouchure et le pavillon¹⁸.

Les données directes¹⁹ (longueur, diamètre intérieur, épaisseur de métal) constituent un premier ensemble de grandeurs physiques spécifiques; ils permettent d'accéder à des paramètres plus complexes tels que le coefficient d'évasement du pavillon²⁰ qui rend compte de l'évolution de son profil.

II-b. approche acoustique

Des mesures acoustiques sont effectuées sur les instruments en considérant systématiquement toutes les positions de jeu²¹.

Les données directes se résument, pour cette première étude, aux mesures des impédances d'entrée²² dans le domaine fréquentiel; elles servent de base au calcul de plusieurs paramètres acoustiques²³. Dans le cadre de la poursuite du projet, d'autres mesures sont envisageables mais cette fois-ci dans le domaine temporel afin d'accéder à des paramètres liés à la réponse de l'instrument²⁴.

Par ailleurs, étant donné le nombre élevé de résultats obtenus dans certains cas pour un paramètre et une trompette donnés, un traitement statistique²⁵ simple est appliqué le cas échéant pour obtenir une valeur d'ensemble de la grandeur en question.

III- La mise en relation des deux ensembles de données

III-a. le procédé mathématique

L'objet de cette troisième phase de l'étude est d'évaluer le 'degré d'adéquation' entre les axes perceptifs obtenus dans la configuration optimale d'analyse et l'ensemble des paramètres physiques définis au cours de l'étape précédente.

On dispose pour cela d'une part, des coordonnées multidimensionnelles de chaque trompette dans l'espace considéré, et d'autre part des valeurs numériques des grandeurs mesurées ou bien calculées à posteriori.

L'outil mathématique qui permet de quantifier cette adéquation est le calcul de corrélation²⁶ qui s'effectue pour chaque couple { [coordonnées sur une dimension subjective] ; [valeurs d'un paramètre physique] }. Il fournit un coefficient compris entre 0 et 1, cette dernière valeur correspondant au cas idéal où il existerait une relation de proportionnalité exacte entre les deux ensembles.

III-b. résultats et commentaires

En réalité, les coefficients de corrélation trouvés à l'issue de l'étude préliminaire sont loin d'atteindre cette valeur extrême. Quelques couples de données possèdent néanmoins un coefficient de corrélation proche de 0.7 voire 0.8 pour certaines analyses partielles²⁷. De plus, la forme des résultats est telle qu'il est possible d'extraire un paramètre physique influent sur chacun des axes de l'espace perceptif.

Ainsi, les trois dimensions subjectives - "largeur du son", "touche" et "facilité de jeu" de l'instrument - corrélient de manière significative avec trois paramètres²⁸ relatifs respectivement au facteur de qualité²³ des pics d'impédance, à la géométrie de la branche et à l'harmonicité²³ du spectre de résonance²⁹.

Ces premières observations sont encourageantes puisqu'elles permettent d'ébaucher un modèle objectif complet de caractérisation de l'instrument sous la forme du jeu des trois paramètres physiques décrits précédemment.

Cependant l'ensemble des résultats³⁰ montre également que ces trois grandeurs ne sont pas uniques et que plusieurs autres mesures physiques présentent aussi une assez forte corrélation avec l'une des trois dimensions de l'espace. Cette redondance de 'bons résultats' remet en question l'opportunité du choix des paramètres et donc la fiabilité du modèle proposé. En outre, le rôle d'une perturbation numérique - comme l'erreur de mesure³¹ - dans le calcul de la corrélation reste à être apprécié afin de mieux maîtriser la signification des valeurs de coefficients obtenus.

Conclusion temporaire et perspectives

L'étude qui est menée permet de tirer plusieurs enseignements :

Le traitement multidimensionnel semble bien adapté au type de résultats que nous voulons tirer de l'expérience, et ceci malgré la complexité des objets du test. De plus, l'approche sémantique complémentaire à l'analyse statistique proprement dite permet de mieux appréhender les processus d'appréciation en termes de critères perceptifs. Cela étant, les procédures expérimentales elles-mêmes demanderaient certainement à être davantage structurées³² afin de recueillir encore plus de données brutes.

Par ailleurs, les mesures physiques - aussi bien géométriques qu'acoustiques - qui sont effectuées aboutissent certes à un grand nombre de paramètres physiques mais pourraient être encore plus complètes et précises³³, notamment par rapport à la connaissance actuelle de la physique de l'instrument étudié.

Enfin, si les premiers résultats obtenus sont momentanément encourageants et permettent d'extraire des paramètres caractéristiques qui corrèlent correctement avec chacune des dimensions perceptives, il est indispensable de s'interroger sur la fiabilité et la représentativité³⁴ de nos interprétations.

Toutes ces remarques contribuent à replacer la présente étude dans le contexte général du projet entrepris.

Il s'agit en effet d'une amorce de recherche qui permet de fixer les procédures à mettre en oeuvre et les axes d'étude à développer pour rendre le travail plus complet et surtout plus probant dans ses résultats.

L'aboutissement - même partiel - d'un tel projet passe par des séries d'expériences mieux maîtrisées³⁵ au niveau de la variation des grandeurs physiques des objets testés et demande donc des moyens matériels plus importants et plus disponibles pour donner le champ libre à l'investigation scientifique.

Pour la facture instrumentale et ses dérivés - notamment la fabrication des embouchures, becs ou anches -, l'intérêt d'une telle démarche est double.

En premier lieu, la connaissance précise et fiable des paramètres physiques influant sur le comportement musical de l'instrument peut devenir une aide précieuse à la facture en permettant une évaluation de la qualité au cours de la fabrication ainsi qu'une appréciation finale basée sur des critères objectifs et systématiques.

A l'inverse, la mise à jour des liens entre facteurs perceptifs du jeu instrumental et grandeurs physiques mesurables sur l'instrument lui-même peut permettre de s'orienter vers une facture innovante en matière de comportement musical et, par application, de répondre aux attentes et aux interrogations des musiciens.

INTERPRETATION DE L'ÉVALUATION SUBJECTIVE DE LA QUALITÉ D'UN INSTRUMENT DE MUSIQUE PAR DES PARAMÈTRES PHYSIQUES OBJECTIFS

- Etude préliminaire
réalisée sur une série de trompettes en Ut -

NOTES EXPLICATIVES

1

- R. L. Pratt & J. M. Bowsher, *The subjective assessment of trombone quality* - Journal of Sound and Vibration 57(3), p. 425-435 (1978).

Résumé (traduction) :

« Un certain nombre d'expériences subjectives, destinées non seulement à évaluer les qualités de jeu et d'intonation de plusieurs trombones mais aussi à contribuer à l'interprétation de données objectives, sont décrites dans ce document. La quantification de facteurs multidimensionnels comme le timbre ou la qualité est généralement entreprise soit dans le cadre d'une échelle multidimensionnelle (MDS), soit dans le cadre d'une échelle sémantique différentielle (SDS), les avantages et inconvénients de chacune d'entre elles dans le cas présent étant brièvement passés en revue. Quoiqu'il en soit des informations complémentaires sont nécessaires soit (avec SDS) pour permettre de déterminer les échelles, soit (avec MDS) pour interpréter le résultat final de l'analyse [...].

Une expérience préliminaire, qui teste la capacité des sujets à évaluer le timbre du trombone en utilisant une échelle sémantique (SDS), a montré que la variance entre les sujets était très importante mais que les facteurs influençant le timbre du trombone étaient (i) l'instrument, (ii) l'instrumentiste et (iii) l'embouchure. Une seconde expérience montre que la tonalité et l'intensité ont une plus grande influence que l'instrumentiste, l'embouchure ou l'instrument sur le jugement de l'auditeur.

Les réactions des instrumentistes testés dans plusieurs autres expériences montrent que la reconnaissance des instruments, lorsque les indices sont éliminés, est rendue très difficile pour la plupart des musiciens, mais qu'un petit nombre d'entre eux s'avère être d'une remarquable capacité de reconnaissance aussi bien en utilisant une échelle multidimensionnelle

(MDS) que sémantique (SDS). Les résultats d'un instrumentiste de cette catégorie font apparaître clairement que le timbre est le facteur acoustique prédominant permettant la reconnaissance. »

• R. L. Pratt & J. M. Bowsher, *The objective assessment of trombone quality* - Journal of Sound and Vibration **65**(4), p. 521-547 (1979).

Résumé (traduction) :

« La qualité objective est un terme générique utilisé pour définir les caractéristiques physiques sensées régir la qualité objective d'un instrument, et ne dépend finalement que de la géométrie de l'instrument et de la composition du matériau. D'autres caractéristiques physiques (comme l'impédance acoustique) sont peut être aptes à influencer à la fois la qualité subjective et objective et cet article étudie dans quelle mesure l'impédance acoustique peut être utilisée comme indicateur de la qualité subjective. Fondées sur des travaux antérieurs, trois hypothèses simples sont émises et examinées à l'aide de tests subjectifs. Après des expériences effectuées sur des trombones ténors et basses à perce large, des trombones ténors à perce moyenne et un tube droit, on montre qu'aucune des hypothèses initiales ne peut être utilisée pour juger de la qualité subjective mais qu'une procédure fondée sur une évaluation de l'enveloppe de la courbe d'impédance de l'instrument peut être valable. Des observations sur divers paramètres tels que la propreté intérieure et la perce de l'embouchure sont mentionnées en vue de l'absence de publications sur la question. »

2

A. Chaigne, *Evaluation subjective des qualités sonores des cordes de guitares* - Acustica vol. 62, p. 16-29 (1986).

Résumé :

« On présente dans cet article les résultats d'un test subjectif mené auprès de 57 guitaristes professionnels résidant en France et destiné à évaluer la qualité sonore de 9 modèles de jeux de cordes d'usage courant.

Les jugements subjectifs portant sur 354 jeux de cordes sont analysés à l'aide de plusieurs méthodes statistiques qui montrent que la préférence dépend fortement de la brillance et du volume sonore, tandis que la plupart des guitaristes éprouvent des difficultés à se prononcer sur la justesse.

L'espace des préférences est construit à partir d'analyses factorielles qui fait apparaître l'existence de trois catégories différentes de cordes parmi les neuf modèles de jeux soumis aux participants.

La comparaison entre l'évaluation subjective et certains critères objectifs, comme le diamètre ou la masse linéique, rend possible la définition d'un jeu de cordes 'idéal' possédant un profil de tension et un profil de densité bien déterminés. »

3

J. Krimphoff, *Analyse acoustique et perception du timbre* - Rapport de stage D.E.A. (1993).

Résumé :

« Un espace de timbres multidimensionnel représente de façon géométrique l'organisation mentale des relations perceptives entre des événements sonores [...].

La distance qui sépare deux timbres au sein de l'espace correspond au degré de leur dissemblance perceptive. Les dimensions d'un tel espace tridimensionnel, établi par Krumhansl (1989) pour un ensemble de 21 timbres synthétisés, ont été analysées selon leurs caractéristiques acoustiques.

Plusieurs paramètres acoustiques liés aux attributs temporels et fréquentiels des timbres ont été dégagés. Leurs fortes corrélations avec les dimensions perceptives permettent de confirmer les interprétations précédentes sur le caractère qualitatif de deux dimensions perceptives et leurs attributs sémantiques et d'expliquer de manière quantitative les dimensions 'brillance' et 'enveloppe temporelle' respectivement par le centre de gravité du spectre et par le temps de montée en échelle logarithmique. La troisième dimension, initialement appelée 'flux spectral', correspond à la déviation des amplitudes des partiels par rapport à une décroissance exponentielle en fonction de leur fréquence et/ou par le rapport entre les amplitudes des harmoniques impairs et pairs, ce qui suggère une nouvelle interprétation sémantique comme la 'structure fine du spectre' en cohérence avec les résultats des analyses acoustiques. »

4

Le timbre est généralement défini comme "l'attribut de la sensation auditive suivant lequel un auditeur peut différencier deux sons présentés dans les mêmes conditions et ayant la même sonie - intensité subjective - et la même hauteur" [American Standards Association, d'après Plomp (1969)].

Sa perception fait intervenir plusieurs caractéristiques physiques prépondérantes qui dépendent notamment de la forme d'onde, du spectre, de la localisation des fréquences dans le spectre et des caractéristiques temporelles du son; c'est en cela que le timbre est considéré comme un attribut multidimensionnel, au contraire de la hauteur, par exemple, qui n'est reliée qu'à un seul facteur : la fréquence.

5

• C. Lavandier, *Validation perceptive d'un modèle objectif de caractérisation de la qualité acoustique des salles* - Thèse de Doctorat (1989).

Résumé :

« Afin de valider perceptivement certains critères objectifs utilisés pour caractériser la qualité acoustique des salles, des tests psychoacoustiques, portant sur l'écoute de configurations artificielles pour lesquelles les valeurs des critères étaient maîtrisées, ont été analysés par la méthode multidimensionnelle INDSCAL.

Les relations qui lient les facteurs perceptifs et les critères objectifs sont détaillées, permettant ainsi de sélectionner les critères objectifs pertinents. Les facteurs sur lesquels sont perçues les variations de ces différents critères, sont nommés à posteriori. Leurs importances respectives sont comparées en proposant une estimation quantitative des distances perçues pour des variations unitaires des critères objectifs correspondants. »

• E. Khale, *Validation d'un modèle objectif de la perception de la qualité acoustique dans un ensemble de salles de concerts et d'opéras* - Thèse de Doctorat (1995).

Résumé :

« Ce document a décrit les résultats et les analyses effectuées sur les données recueillies lors d'une campagne de mesures objectives et de tests d'écoute dans une dizaine de salles de concert et d'opéras en Europe.

Le but de ce document était de valider - ou d'infirmer - un modèle objectif de la perception de la qualité acoustique [...].

Dans cette étude, on a prouvé qu'il est en fait possible de recueillir des données fiables et exploitables en situation de concert. Par contre, on a vu que ces données nécessitent un soin particulier, surtout parce que plusieurs influences se trouvent mêlées.

Le projet principal de la première partie de cette thèse était de formuler et d'élaborer une méthodologie adaptée à ce genre de tests. L'intérêt de cette méthodologie et de ses applications sort du seul contexte des données analysées dans le cadre de cette thèse, et l'on espère que d'autres chercheurs s'en inspireront pour de futures analyses. En effet, la méthodologie nous semble parfaitement adaptée à tous les types de données issues d'une situation réelle peu contrôlée (et peu contrôlable).

[...]

En deuxième partie, [...], les réponses aux questionnaires et les mesures objectives ont été analysées, d'abord indépendamment les unes des autres, puis en étudiant la correspondance objectif/perceptif.

[...] »

6

• G. Widholm & W. Winkler, *Evaluation of musical instrument quality by computer systems. Examples of realisation* - Stockholm Music Acoustics Conference, Actes, p. 560-565 (1993).

Résumé (traduction) :

« Cet article présente le concept et la réalisation d'une station de travail de type PC, équipée d'un DSP, conçue pour l'évaluation de la qualité d'un

instrument de musique. Une courte discussion sur différents aspects de la 'qualité musicale' précède des suggestions à propos de la corrélation entre des données de mesures acoustiques et l'expérience de jeu.

Avec l'exemple de BIAS (Système d'Analyse des Instruments de type Cuivre - *Brass Instrument Analyzing System* -), on expose la réalisation d'un tel système à la fois au niveau de la station de travail (*hard*) que du logiciel (*soft*). A partir des données recueillies à l'issue de mesures d'impédance, on donne les méthodes de calcul et d'évaluation de paramètres de qualité comme l'erreur d'intonation, la réponse impulsionnelle et la qualité du son. »

• G. Widholm, *Brass wind instrument quality measured and evaluated by a new computer system* - Trondheim International Congress on Acoustics, Actes, vol. III, p. 517-520 (1995).

Résumé (traduction) :

« Pour le joueur d'instrument à vent de type cuivre, la qualité de l'instrument est principalement définie par trois paramètres : l'intonation, la réponse et le timbre. Le problème réside dans le fait qu'il n'existe pas de relation directe entre de tels critères de qualité définis par l'instrumentiste et les données obtenues par des mesures physiques. Cet article présente des méthodes d'obtention de résultats qui sont en accord avec l'expérience pratique de jeu et qui sont confirmées par des musiciens professionnels. L'acquisition et le traitement des données sont réalisés grâce à un logiciel récemment développé sous environnement *Windows* et utilisant une station de travail de type PC, équipée d'un DSP.

7

Le terme générique de 'cuivres' définit une classe de la famille des instruments à vent; il s'applique principalement aux instruments qui fonctionnent grâce aux lèvres du musicien - agissant comme une anche - et où celui-ci contrôle l'harmonique de jeu grâce à la pression de l'air et la tension des lèvres [*The new Grove dictionary of musical instruments*]. On y retrouve, entre autres, les trompettes, les trombones, les cors ... etc.

8

• Huit instrumentistes au total ont participé aux tests perceptifs. Outre deux trompettistes amateurs, les six autres sont des professionnels dont voici les noms et les références :

- Jean-Pierre Odasso, Orchestre Philharmonique de Radio-France;
- Dominique Koppe, orchestre symphonique;
- Guy Touvron, C.N.R. de Paris, soliste, essayeur SELMER;
- Antoine Curé, Ensemble Inter-Contemporain, essayeur YAMAHA;

- Clément Garrec, super soliste à l'Opéra de Paris;
- Bruno Nouvion, Orch. Phil. de Radio-France, essayeur COURTOIS.

• Les objets constituent un ensemble de dix trompettes en Ut qui était initialement composé de huit trompettes à pistons et deux trompettes à palettes :

- GANTER Munchen G3a, à palettes;
- BACH L229, branche Mallone MC1 (2);
- BACH 238G, pavillon 25H (3);
- CALLET, modèle symphonique (4);
- COURTOIS prestige 301, branche B5 (5);
- SELMER C700, pavillon démontable (6);
- SELMER ERA II (7);
- YAMAHA, à palettes;
- SCHILKE CX (9);
- STOMVI modèle Maurice André, pavillon argent (10).

Cet ensemble a été utilisé uniquement pour le premier test - effectué par J. P. Odasso - puis, du fait de leur trop grande disparité avec le reste des instruments, les trompettes à palettes ont été remplacées par deux trompettes à pistons :

- BACH L229, branche 25H (1);
- BACH ML229, branche 25H (8).

Les origines des instruments sont diverses, ils ont été prêtés soit par des magasins (Feeling Musique, l'Olifant), soit par des fabricants (COURTOIS et SELMER) ou bien encore par des musiciens (notamment D. Koppe, J. P. Odasso et P. Gillet).

9

Une consigne écrite est fournie au musicien en début de séance et, le cas échéant, des compléments d'informations sont donnés oralement en prenant soin toutefois de ne pas influencer le jugement du 'testeur'.

La première partie du test consiste en une évaluation de dissemblance chiffrée entre 0 et 10. Pour que le trompette se familiarise avec cette notion (voir point 10), on lui fait essayer préalablement quelques échantillons jugés à priori représentatifs par d'autres musiciens. Puis les trompettes sont présentées par paire et chaque changement est précédé d'une annonce du type "paire n° ". Pour effectuer leur jugement, les musiciens n'ont aucune contrainte - ni sur la méthode, ni sur la durée - exceptée celle d'essayer d'utiliser la pleine échelle des valeurs de dissemblance.

En second lieu, le trompette teste les instruments l'un après l'autre et donne de manière tout à fait libre les impressions qu'il perçoit sur chacun d'entre eux. Les observations sont prises en note et cette seconde partie de

l'expérience est entièrement enregistrée sur bande afin de pouvoir la consulter à volonté ultérieurement.

Une fois l'expérience terminée, le musicien remplit une fiche de renseignements qui permet de connaître, entre autres, sa formation musicale, ses principaux emplois mais aussi les trompettes et embouchures qu'il utilise le plus souvent. Ces informations peuvent s'avérer utiles pour expliquer un résultat d'analyse difficile à interpréter ou tout simplement confirmer des hypothèses.

Par ailleurs, il est important de noter que l'ordre des présentations qui interviennent dans les deux parties expérimentales du test est modifié aléatoirement d'une séance sur l'autre.

10

La dissemblance est, par définition, le « manque de ressemblance ». C'est une notion qualitative, donc à priori non quantifiable; malgré cela, elle est souvent utilisée dans les expériences de psycho-acoustique et de perception car elle permet de définir la sensation de proximité ou d'éloignement entre des objets qui peut, quant à elle, être exprimée plus facilement par un sujet sur une échelle numérique. Le jugement de dissemblance permet donc d'obtenir des données chiffrées relatives à une perception, pouvant ultérieurement être traitées par des analyses statistiques adéquates.

Dans le cas présent, les objets sont présentés par paire et la dissemblance est jugée entre 0 ("très proche") et 10 ("très éloigné"). La précision de jugement s'impose d'elle-même pendant le test et la plupart des sujets utilise une échelle graduée de 1 en 1, voire plus rarement, de 0.5 en 0.5 mais jamais en deçà.

11

Avant le début du test, toutes les trompettes sont accordées au LA 440 à la température de la salle et disposées sur une table hors de la vue du sujet.

En outre, le lieu d'expérience est choisi en fonction des habitudes de travail des musiciens professionnels qui évoluent le plus souvent dans des environnements acoustiques de type 'salle de concert'. De ce fait, l'auditorium de l'I.R.C.A.M. ("l'espace de projection") est retenu pour pratiquer les tests. Malheureusement, la disponibilité restreinte de cet espace ajoutée à la difficulté de réunir les dix trompettes au même moment nous ont conduit à effectuer la seconde moitié de la campagne dans un endroit différent, une salle beaucoup plus petite dont l'acoustique est sensiblement plus mate; à première vue, ceci n'a pas semblé gêner les trompettistes concernés.

Enfin, la nature même des tests perceptifs mis au point impose des conditions expérimentales spécifiques; car, contrairement aux tests de perception classiques qui confrontent des auditeurs et des stimuli sonores diffusés, le contact entre les sujets et les objets induit ici des effets de contexte qu'il faut éliminer au maximum pour limiter les biais de jugement. Ainsi, tout au long de la séance, le musicien a les yeux bandés et porte des gants de coton. De plus, des éléments caractéristiques de chaque trompette (anneaux, embouts

de piston) sont enlevés ou camouflés en prenant soin toutefois de ne pas altérer la tenue générale de l'instrument.

Ceci étant, malgré toutes les précautions prises, on constate que, lors des tests, la plupart des trompettistes a reconnu la majorité des trompettes avec une relative facilité.

12

Un test perceptif peut se définir de manière très générale par la confrontation entre des sujets et des objets. Les sujets doivent, au cours du test, répondre à un questionnaire dont la forme est déterminée par la manière de traiter ensuite les données recueillies. Pour cela, il existe deux grands types d'analyse qui correspondent chacun à un concept très différent :

- l'analyse sémantique qui utilise des tests où les sujets évaluent les objets sur des critères fixés à l'avance par l'expérimentateur. Les dimensions de l'espace perceptif sont donc imposées et chacune d'elles est définie par une échelle sémantique que l'on balise par deux adjectifs antinomiques placés aux extrémités (par exemple, "son fermé/son ouvert", "faible dynamique/forte dynamique" ... etc.).

Cette démarche présente l'inconvénient majeur de décider à priori des critères perceptifs de jugement et peut donc occulter des facteurs importants ou, au contraire, en introduire d'autres qui ne sont pas réellement significatifs.

- l'analyse multidimensionnelle où les tests consistent en une évaluation de la dissemblance entre les objets. Ces derniers sont, en général, présentés soit par paire, soit par triplet et, dans ce cas, le sujet détermine la paire la plus semblable et celle qui est la plus dissemblable.

Les résultats sont ensuite arrangés sous une forme matricielle $D(i, j)$ qui donne directement accès à la valeur δ_{ij} de la dissemblance entre les objets i et j et qui constitue les données d'entrée du logiciel d'analyse.

Puis des algorithmes de calcul permettent d'obtenir un espace géométrique où les objets sont positionnés en fonction de leurs dissemblances mutuelles (voir point 13). Pour construire cette représentation mathématique, la théorie de l'analyse suppose l'existence d'une relation monotone entre les valeurs expérimentales de dissemblance et les distances calculées afin de conserver une cohérence dans la variation des deux ensembles. En d'autres termes, lorsque deux objets sont jugés éloignés, le modèle les écarte d'une distance en rapport avec cette perception et suit cette même logique avec deux objets jugés très proche.

Pour illustrer le principe général de cette démarche, prenons l'exemple suivant : à partir d'une carte géographique sur laquelle sont mentionnées plusieurs villes, on obtient facilement, par mesure directe, la table des distances entre chaque ville. Par contre, le problème inverse qui consiste à construire la carte géographique à partir de la table des distances inter-villes n'admet pas de solution immédiate et triviale et peut typiquement se traiter par l'analyse multidimensionnelle.

Il existe plusieurs procédures d'analyse multidimensionnelle qui se distinguent par le principe utilisé pour construire le modèle de représentation et notamment exprimer la distance entre deux points de l'espace. Les trois principales versions sont, dans l'ordre croissant de complexité :

- le modèle MDSCAL où la distance d_{ij} est euclidienne et se calcule grâce aux projections x_i^n et x_j^n des objets i et j sur les N dimensions de l'espace, suivant la formule :

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_i^n - x_j^n)^2} .$$

On introduit parfois dans ce modèle la notion de spécificité qui permet de mettre en évidence des caractéristiques particulières sur les objets (par exemple, le poids des instruments) :

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_i^n - x_j^n)^2 + S_i + S_j} \quad \text{où } S_i \text{ est la spécificité de l'objet } i.$$

- le modèle INDSCAL qui inclut dans son code de calcul des pondérations propres à un sujet et une dimension. En fait, par l'intermédiaire de coefficients de pondération $w_n^{(s)}$, cette approche tient compte de l'importance perceptive que le sujet s attribue à la dimension n (par exemple, si le musicien est particulièrement sensible aux effets de justesse, à la sonorité du son émis par l'instrument ... etc.); et l'on définit, pour le sujet s , la distance sous la forme :

$$d_{ij}^{(s)} = \sqrt{\sum_{n=1}^N w_n^{(s)} \cdot (x_i^n - x_j^n)^2} .$$

- le modèle EXSCAL qui est une extension du précédent en incluant la notion de spécificités décrite à propos de MDSCAL. On exprime alors les distances comme suit :

$$d_{ij}^{(s)} = \sqrt{\sum_{n=1}^N w_n^{(s)} \cdot (x_i^n - x_j^n)^2 + v^{(s)} \cdot (S_i + S_j)},$$

où $v^{(s)}$ est également un facteur de pondération qui peut se définir par l'importance perceptive que le sujet s a attribué aux spécificités.

C'est précisément cette version très complète de l'analyse que l'on utilise pour notre étude. Toutefois, le logiciel permet d'activer ou d'inhiber plusieurs options de calcul et notamment celles concernant d'une part, les spécificités et

d'autre part, les pondérations. Ceci nous permet d'exécuter de nombreuses analyses et de travailler sur plusieurs configurations intéressantes au sens des indices statistiques (voir point 14).

14

L'exécution de l'algorithme d'analyse délivre un ensemble de résultats correspondant aux coordonnées de chaque objet calculé pour un espace de représentation à 1 dimension puis 2, 3 ... jusqu'à N_{\max} qui est défini comme paramètre d'entrée de l'analyse (en l'occurrence $N_{\max} = 6$). Outre cela, EXSCAL fournit également la valeur de trois indices statistiques : le Logarithme de Vraisemblance, le AIC et le BIC.

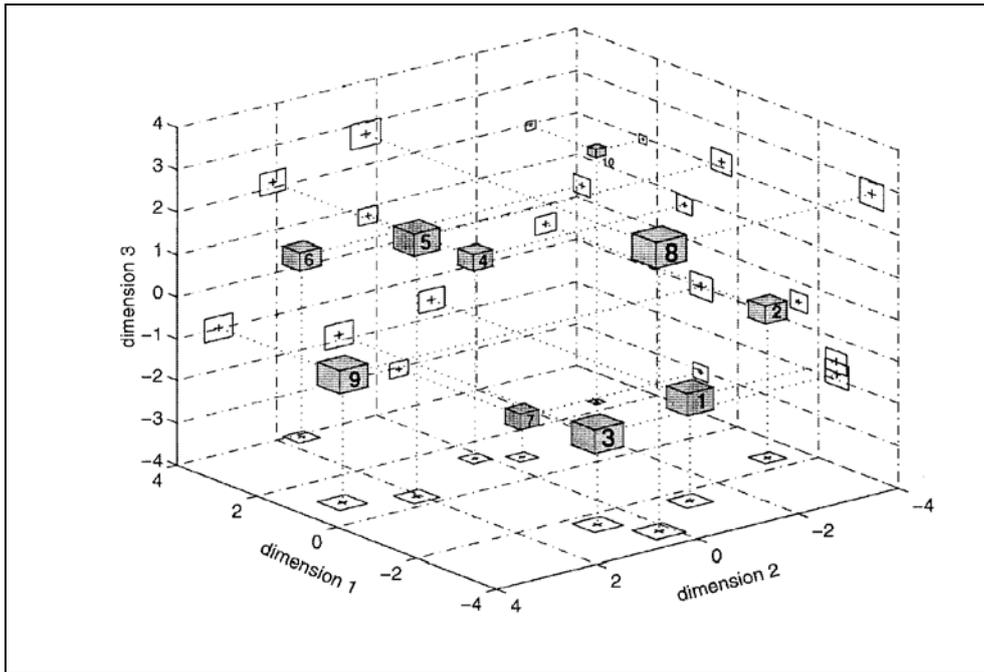
Le premier d'entre eux, noté LogL , représente l'écart entre les distances calculées et les distances perceptives réelles - les dissemblances - ; il permet donc d'évaluer l'erreur que l'on commet en utilisant le modèle mathématique de représentation. De fait, cette fonction d'erreur décroît lorsque le nombre de dimensions de l'espace modélisé augmente et l'étude de sa variation permet de localiser une zone de décroissance rapide qui correspond à une situation optimale pour l'analyse considérée.

On peut néanmoins atteindre cette zone directement en utilisant les deux indices restants, AIC et BIC, calculés à partir de LogL . En effet, leur valeur minimum donnent le nombre de dimensions optimal pour l'espace de représentation avec malgré tout la nuance suivante : le AIC donne le modèle le plus riche alors que le BIC donne celui le plus économique, en terme d'axes perceptifs.

15

La meilleure configuration d'analyse déterminée pour notre étude délivre un modèle de représentation à 3 dimensions calculé en prenant en compte les pondérations mais en écartant les spécificités (voir point 13). On peut alors représenter l'espace d'analyse - où les trompettes sont numérotées de 1 à 10 - de la manière suivante :





16

L'absence totale d'élément sémantique dans les résultats de l'analyse multidimensionnelle constitue son inconvénient majeur car elle rend difficile l'interprétation des axes perceptifs obtenus; outre cela, ce type d'analyse engendre également d'autres problèmes.

En effet, on peut observer de la part des sujets testés des phénomènes d'oubli d'échelle ou de changement de stratégie qui sont inhérents à la nature numérique des jugements mais aussi au nombre de présentations imposées. Par ailleurs, une forte différence entre les objets peut masquer toutes les autres disparités plus fines et réduire ainsi les résultats à une unique dimension.

Enfin, d'un point de vue pratique, les tests présentent l'inconvénient d'être assez longs : un ensemble de M objets présentés par paires non ordonnées - les paires (a,b) et (b,a) sont considérées identiques - nécessite $M \cdot (M - 1) / 2$ présentations. Dans le cas de notre étude qui porte sur dix trompettes, en évaluant le temps moyen de jugement par trompettiste à une minute, il faut donc environ 45 minutes à chaque musicien pour effectuer la première des deux phases du test. Il va sans dire que la longueur du test entraîne la fatigue du 'testeur' et altère ses capacités d'appréciation, c'est pourquoi des pauses sont souvent prévues en cours d'expérience.

17

La "touche" est une notion perceptive à laquelle se réfèrent très souvent les trompettistes. Il s'agit en fait de la sensation d'être près de l'instrument - ou d'en être éloigné, si la touche est mauvaise - qui dépend fortement de la

réponse de l'instrument dans des phases de jeu caractéristiques telles que le *staccato* où le contrôle du son est rapide et précis.

18

Mis à part les trois pistons et leur dérivation respective (qui permettent d'allonger la longueur totale du tube), la trompette est principalement composée de deux éléments :

- la branche qui reçoit l'embouchure et s'étire jusqu'au piston n° 3;
- le pavillon qui prend naissance au piston n° 1 et débouche sur une partie fortement évasée.

En outre, ce dernier constitue avec la partie initiale de la branche (celle située avant la première coulisse d'accord) des éléments à section continûment variable modélisés généralement par des troncs de cône successifs et que l'on nomme, par extension, parties coniques de l'instrument (même si la partie terminale du pavillon ne répond en aucun cas à la définition mathématique du cône - voir point 20).

19

Les mesures géométriques sont effectuées dans l'atelier de mécanique de l'I.R.C.A.M. , elles comportent :

- la mesure du diamètre intérieur en 6 points de la branche ainsi que la mesure de celui de la perce en sortie du mécanisme des pistons, de l'épaisseur moyenne de métal et de la longueur de branche directe, c'est-à-dire avant la première discontinuité (exceptée celle due à l'embouchure).
- la mesure du diamètre extérieur en 16 points du pavillon sur une longueur totale de 43 centimètres et en prenant soin de concentrer les points de mesure à l'endroit où la courbure est la plus grande.

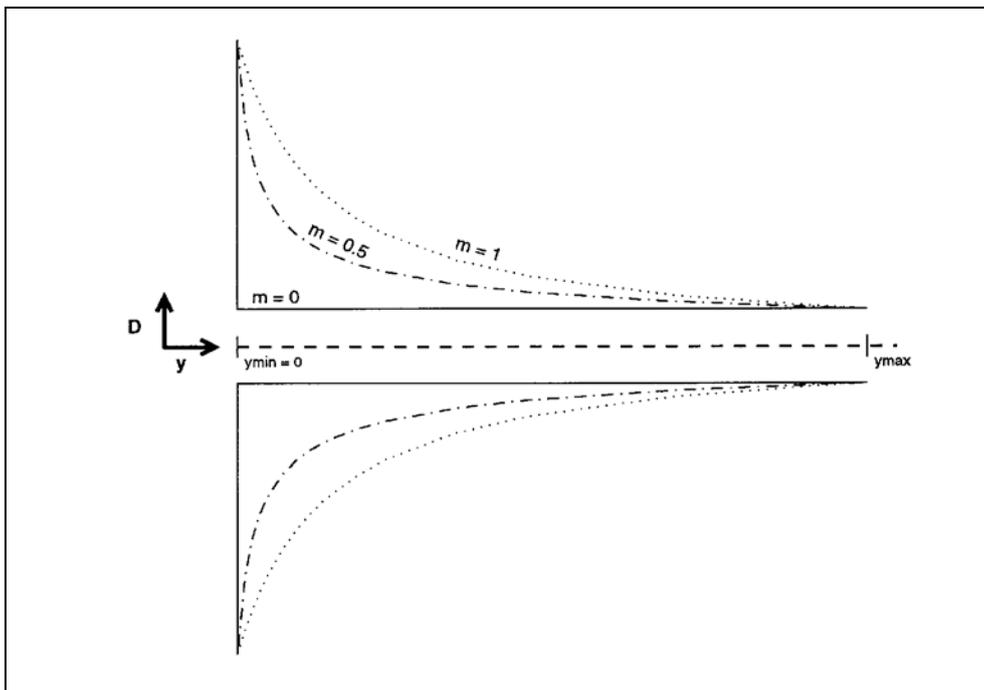
20

Le coefficient d'évasement du pavillon m est calculé en considérant que la trompette fait partie de la famille des instruments à pavillon du type Bessel ce qui permet d'utiliser l'expression reliant le diamètre du pavillon D en un point et la distance y entre ce point et l'origine située à l'ouverture (voir fig. page suivante) :

$$D = B/(y + y_0)^m \quad ,$$

où B et y_0 sont définis par les conditions aux limites ($y = y_{\min}$, $y = y_{\max}$).

Ainsi, à partir des mesures géométriques, un algorithme d'optimisation permet d'obtenir avec précision le coefficient d'évasement pour chacune des trompettes de l'expérience.



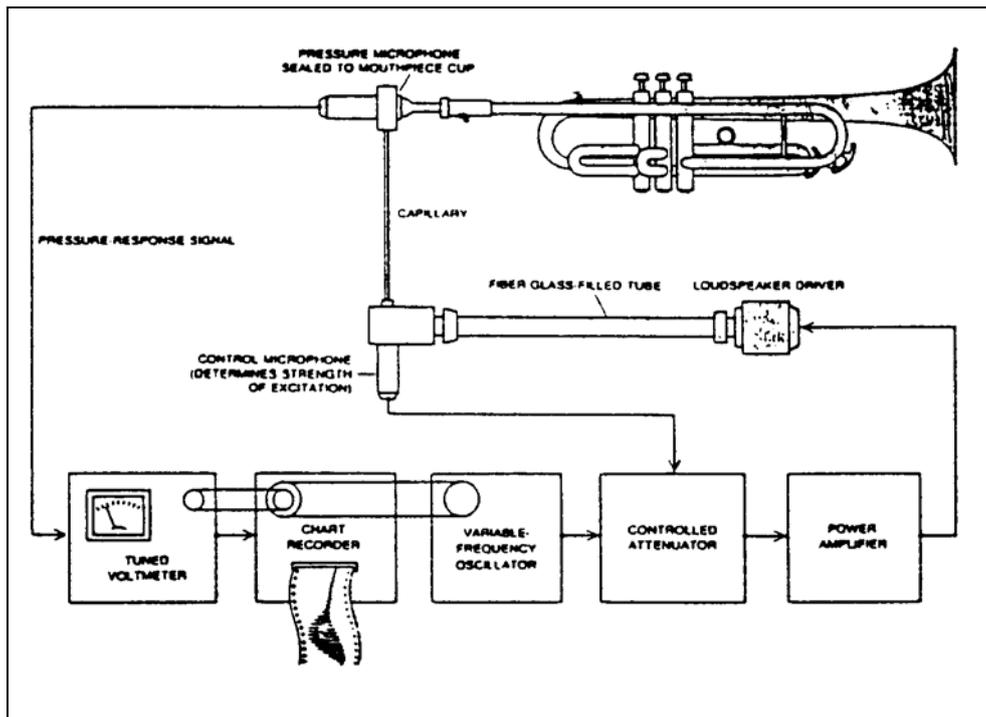
21

Le jeu musical sur la trompette s'effectue grâce à sept combinaisons de pistons; lorsqu'elles sont énumérées dans l'ordre, ces positions correspondent à des longueurs de tube croissantes et permettent d'évoluer chromatiquement à partir de la position 'à vide' qui est celle où aucun piston n'est enfoncé.

22

Les courbes d'impédance d'entrée sont mesurées par un procédé décrit par A. H. Benade [*Fundamentals of musical acoustics*, New-York, Oxford University Press (1976)] et amélioré par R. Caussé, J. Kergomard et X. Lurton [*Input impedance of brass musical instruments - Comparison between experiment and models*, J. Acoust. Soc. Am. **75**, 241-254 (1983)].

Dans cette technique, on fait varier la fréquence d'une excitation sinusoïdale à l'entrée de l'instrument. A cet endroit précis, la présence d'un tube capillaire de forte résistance permet de maintenir la vitesse acoustique constante, en imposant la pression constante à l'autre extrémité. Cet asservissement est réalisé par un système à boucle constitué d'un microphone à l'entrée du tube capillaire qui récupère une tension que l'on renvoie dans le circuit de compression d'un oscillateur (voir fig. ci-dessous). La pression, mesurée avec un microphone à l'embouchure, est alors directement proportionnelle à l'impédance d'entrée de l'instrument.



23

Les mesures acoustiques (voir point 22) sont effectuées, pour les sept positions de jeu, dans la chambre anéchoïque de l'I.R.C.A.M. afin d'isoler l'expérience des bruits environnants. Chaque résultat se présente sous la forme d'un spectre (voir fig. ci-dessous) qui met en évidence la fréquence et l'amplitude des pics d'impédance - ou partiels - correspondant aux résonances de l'instrument (voir point 29). Ces informations permettent de calculer plusieurs paramètres acoustiques :

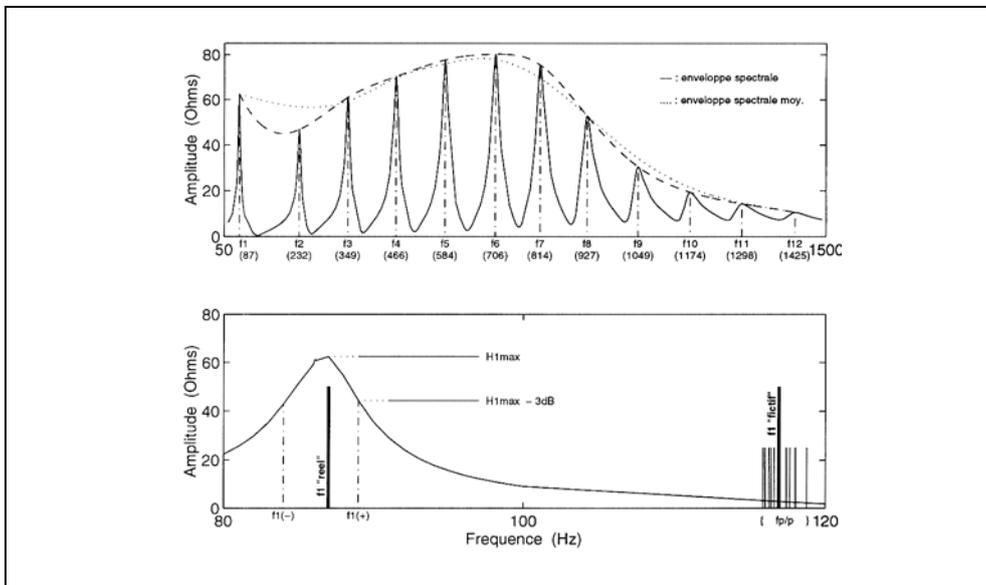
- les fréquences réduites : $\tilde{f}_p = f_p/p$, où f_p est la fréquence centrale du pic d'impédance situé au rang p dans la série des partiels numérotés à partir du premier d'entre eux, le fondamental f_1 (voir fig. ci-dessous).

Ce paramètre est un indicateur de l'harmonicité car il représente, pour chaque rang, le fondamental de la série harmonique auquel le partial considéré appartient. En conséquence, si la série étudiée est parfaitement harmonique,

toutes les fréquences réduites sont confondues avec le fondamental car, dans ce cas, les fréquences f_p sont multiples de f_1 (tel que $f_2 = 2 \cdot f_1$, $f_3 = 3 \cdot f_1$... etc.). Mais en réalité, on observe une certaine dispersion des fréquences réduites autour du fondamental; en fait, il s'agit même d'une dispersion autour d'un 'fondamental fictif', proche de f_1 , car la trompette possède la caractéristique spectrale d'avoir son fondamental fortement décalé par rapport à la série quasi-harmonique que constitue le reste des partiels.

- pour la position 'à vide', le facteur de qualité de chaque pic qui a pour expression : $Q = f_p / (f_p^{(+)} - f_p^{(-)})$, où $f_p^{(+)}$ et $f_p^{(-)}$ sont les valeurs de l'impédance d'entrée mesurée à -3 dB en dessous du maximum d'impédance du pic p (voir fig. ci-dessous).

Ce facteur fournit des informations sur la largeur des pics d'impédance à savoir, par exemple, qu'un coefficient de qualité élevé correspond à des pics fins et serrés.



Les deux paramètres suivants sont inspirés par des études sur la perception du timbre et s'appliquent donc initialement aux données spectrales du son rayonné des instruments. Cela étant, leur définition est générale et l'on peut concevoir de les utiliser avec un spectre de résonance issu d'une mesure d'impédance acoustique (voir point 29); il s'agit :

- du centre de gravité spectrale : $CGS = \sum_{p=1}^P p \cdot H_p / \sum_{p=1}^P H_p$, où H_p est l'amplitude du partiel p et P le nombre total de partiels pris en compte, qui décrit quantitativement assez bien la notion de brillance du son.

- de la déviation du spectre : $DEV = \sum_{p=1}^P |H_p - (H_{p-1} + H_p + H_{p+1})/3|$ obtenue à partir de l'écart à une enveloppe spectrale moyenne (voir fig. page

précédente) calculée en moyennant les amplitudes de trois partiels adjacents $\{H_{p-1}, H_p \text{ et } H_{p+1}\}$, et qui rend compte plus précisément de la structure fine du spectre.

24

Pour une étude acoustique, la démarche complémentaire à celle qui s'effectue dans le domaine fréquentiel est une approche temporelle qui fait appel à un autre type de procédures expérimentales.

Dans cette optique, la réponse impulsionnelle mesure la réponse de l'instrument à une excitation brève - une impulsion - et examine la génération et la propagation de l'onde de pression. Le résultat expérimental d'une telle mesure permet également d'analyser les réflexions engendrées, en premier lieu, par le pavillon mais aussi par toutes les discontinuités de section et les 'inhomogénéités' de la paroi interne du corps de l'instrument. En outre, connaissant la vitesse de propagation du son dans ce milieu, il est possible de repérer géographiquement - avec une précision relativement élevée - les points où naissent ces réflexions partielles qui jouent un rôle dans le mécanisme de production du son et donc implicitement dans le jeu de l'instrumentiste.

25

Les opérations statistiques effectuées sur les mesures sont :

- la moyenne qui, pour la variable A prenant successivement K valeurs a_k , s'écrit sous la forme : $\bar{X}(A) = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K a_k$.

On définit également une moyenne pondérée : $\bar{X}(A) = \frac{1}{\sum_{k=1}^K w_k} \cdot \sum_{k=1}^K w_k \cdot a_k$, où

les w_k sont les coefficients pondérateurs.

- la variance qui rend compte de l'écart à la moyenne pour chaque valeur de a_k et dont l'expression est (avec les mêmes notations que précédemment) : $\text{var}(A) = \frac{1}{K-1} \cdot \sum_{k=1}^K \left[(a_k - \bar{X}(A))^2 \right]$.

Il est important de noter que cette formule donne, en fait, une estimation sans biais de la variance en considérant A comme une variable statistique aléatoire; par ailleurs, plus K est grand, plus cette estimation converge vers la valeur réelle de la variance qui serait accessible uniquement si l'on connaissait la loi statistique de variation de A .

26

Le calcul de corrélation s'applique à deux variables aléatoires A et B qui décrivent chacune un ensemble de valeurs, respectivement $\Omega^A = \{a_1, \dots, a_k, \dots, a_K\}$ et $\Omega^B = \{b_1, \dots, b_k, \dots, b_K\}$.

Dans ce cas, outre les variances relatives à chacune des variables prises séparément que l'on note $s_A^2 = \text{var}(A)$ et $s_B^2 = \text{var}(B)$ (voir point 25), on définit également une nouvelle grandeur statistique, la covariance, qui réunit les deux variables et mesure leur aptitude à être reliées par une relation linéaire (ou relation de proportionnalité) :

$$C_{AB} = \frac{1}{K-1} \cdot \sum_{k=1}^K [(a_k - \bar{X}(A)) \cdot (b_k - \bar{X}(B))]$$

Puis, à partir de cette expression on aboutit à celle du coefficient de corrélation par la relation :

$$R_{AB} = \frac{C_{AB}}{s_A \cdot s_B},$$

qui permet d'interpréter la corrélation entre deux variables comme une covariance normalisée par la variance individuelle de chacune d'elle.

A titre d'exemple, dans le cadre de notre étude, on peut poser $A = X^{\text{II}}$, coordonnée des objets sur le deuxième axe de l'espace et $B = \Phi$, valeur d'un paramètre physique dont on veut étudier la concordance avec cette dimension subjective; on a alors $\Omega^A = \{x_1^{\text{II}}, \dots, x_{10}^{\text{II}}\}$ et $\Omega^B = \{\phi_1, \dots, \phi_{10}\}$. Par ailleurs, si l'on pouvait atteindre le cas de corrélation parfaite $R_{AB} = 1$, il serait possible de prédire exactement la coordonnée x_{11}^{II} d'une onzième trompette connaissant la valeur du paramètre physique correspondant ϕ_{11} puisqu'il existerait une relation de proportionnalité entre ces deux ensembles.

27

Des analyses partielles sont réalisées en cours d'étude pour isoler certains sujets et/ou certains objets afin d'examiner leurs résultats de manière plus précise. On effectue, notamment, une analyse entre un trompettiste et l'ensemble des trompettes qui aboutit à un modèle à 2 dimensions, sans spécificités ni pondérations (voir point 13).

Dans cette configuration il est intéressant d'essayer de rapprocher les résultats individuels avec les commentaires du 'testeur' correspondant, répertoriés dans un document de synthèse regroupant les informations

recueillies au cours de la seconde partie des tests subjectifs. On peut ainsi concevoir cette démarche comme un moyen d'interpréter de manière sémantique les axes subjectifs obtenus. Et ceci d'autant plus que, en l'occurrence, les paramètres physiques qui corréleront le mieux avec chacune des dimensions s'avèrent être sensiblement les mêmes que ceux dégagés de l'analyse globale (voir point 28).

28

Les trois paramètres physiques qui ressortent du calcul de corrélation sont respectivement (dans l'ordre croissant des dimensions) :

- $\text{var}(f_n/n)$, pour la position 'à vide' des pistons;
- le diamètre moyen de la branche;
- le facteur de qualité du 2^{ème} pic d'impédance, également pour la position 'à vide' des pistons.

29

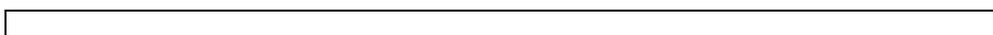
Le spectre de résonance est le résultat de la mesure d'impédance d'entrée dans le domaine fréquentiel (voir point 22). Il met en évidence les résonances de l'instrument c'est-à-dire les zones fréquences pour lesquelles l'énergie acoustique est importante.

Le rôle de ces résonances est fondamental dans le mécanisme de production du son. En effet, en schématisant le principe, les lèvres du trompettiste 'voient' l'instrument comme son impédance d'entrée et donc, suivant la note jouée, la fréquence de vibration des lèvres va naturellement se 'caler' dans une zone de forte énergie : une résonance. On conçoit donc aisément que les caractéristiques des pics d'impédance (amplitude, largeur, écartement ... etc.) sont en étroite relation avec le jeu sur l'instrument.

Dans le même ordre d'idée, le spectre de résonance détermine également le spectre du son émis par l'instrument (obtenu à partir de la pression acoustique mesurée à la sortie du pavillon) même si ce dernier subit des modifications dues notamment au pavillon (effet de filtre).

30

Les résultats de l'analyse multidimensionnelle, dans la configuration optimale (voir point 15), sont rassemblés dans un tableau où les coefficients de corrélation supérieurs ou égaux à 0.5 sont mis en évidence afin de faire apparaître les différents paramètres physiques influents :



<u>var(fn/n):</u>			
pos.1	-0.045	0.415	-0.689
pos.2	-0.150	0.285	-0.366
pos.3	-0.003	0.205	-0.260
pos.4	0.069	0.039	-0.171
pos.5	-0.165	-0.250	-0.156
pos.6	-0.357	-0.345	0.087
pos.7	-0.328	-0.384	0.042
moy7pos.	-0.257	0.024	-0.362

<u>var(fn/n)*pond1: var(fn/n)*pond2:</u>						
pos.1	0.067	0.351	-0.596	0.115	0.215	-0.473
pos.2	-0.119	0.206	-0.269	-0.065	0.099	-0.128
pos.3	-0.003	0.132	-0.197	0.013	0.047	-0.139
pos.4	0.072	-0.060	-0.077	0.076	-0.111	-0.022
pos.5	-0.132	-0.279	-0.081	-0.131	-0.279	-0.047
pos.6	-0.333	-0.341	0.163	-0.311	-0.340	0.250
pos.7	-0.300	-0.359	0.213	-0.252	-0.295	0.373
moy7p	-0.161	-0.004	-0.229	-0.096	-0.078	-0.094

<u>Centre de Grav. Spect.:</u>			<u>Deviation spectrale:</u>			
pos.1	-0.370	-0.556	0.003	0.092	-0.242	-0.408
pos.2	0.187	-0.197	0.110	-0.138	-0.424	0.668
pos.3	0.378	-0.342	-0.063	-0.371	-0.032	0.053
pos.4	-0.197	-0.210	-0.056	-0.328	0.282	0.409
pos.5	-0.421	0.124	-0.166	-0.204	-0.136	0.049
pos.6	-0.066	-0.320	0.317	-0.468	-0.142	0.037
pos.7	-0.249	-0.271	-0.138	-0.198	-0.098	0.026
moy7p	-0.184	-0.236	0.010	-0.265	-0.221	0.119

<u>Q - position 'a vide':</u>			
pic 1	-0.117	-0.035	-0.499
pic 2	0.686	-0.102	0.132
pic 3	-0.197	0.152	-0.661
pic 4	0.505	0.113	0.094
pic 5	-0.277	0.126	0.152
pic 6	-0.693	-0.046	0.126
pic 7	0.078	0.343	-0.388
moy7pics	-0.164	0.187	-0.146
pic_max	0.511	-0.105	0.241

<u>Geometrie:</u>			
m (coef.evas.)	0.531	0.026	0.089
diam.moy. Branch.	-0.179	-0.736	-0.290
diam.moy. Pavil.	0.493	0.206	0.153

En ce qui concerne les données géométriques, la tolérance des mesures, obtenues au pied à coulisse numérique, est de l'ordre du 1/100^{ème} de millimètre. En réalité, cette précision est moins bonne car les diamètres intérieurs utilisés pour définir certains paramètres physiques sont déduits des mesures extérieures en considérant une épaisseur moyenne de métal.

Par ailleurs, la mesure acoustique de l'impédance d'entrée s'effectue grâce à un système d'acquisition développé sur des moyens analogiques (voir point 22). Sa précision est relativement bonne en fréquence : les valeurs de la fréquence centrale des pics d'impédance sont lues, en cours de manipulation, directement sur l'appareil de mesure; par contre, elle s'avère beaucoup moins satisfaisante pour les amplitudes qui sont lues, en différé, sur l'imprimé du relevé de mesure (il faut noter toutefois que la lecture directe des amplitudes est également possible mais n'a pas été effectuée ici essentiellement pour des raisons de temps et d'inertie expérimentale).

32

La forme des tests subjectifs utilisés dans cette étude préliminaire semble correcte mais leur contenu pourrait encore être amélioré.

On peut concevoir, par exemple, de limiter le temps de présentation d'une paire pour pouvoir augmenter le nombre d'objets testés, mais aussi d'introduire plusieurs fois la même paire (a,b) - ou la paire inversée (b,a) - afin de tester d'une part, la répétabilité de jugement du musicien, et d'autre part, l'influence de l'ordre de présentation à l'intérieur d'une même paire.

Par ailleurs, dans la seconde phase du test, des directions plus précises au niveau sémantique pourraient être proposées - mais en aucun cas imposées - dans le but d'obtenir, sur l'ensemble des objets, une cohérence des informations recueillies rendant ainsi leur exploitation beaucoup plus riche d'enseignements.

33

L'accroissement du nombre des données objectives et l'amélioration de leur qualité passent, sans aucun doute, par la réalisation de la mesure des réponses impulsionnelles des trompettes (voir point 24) mais aussi par l'acquisition numérique - et non plus analogique - des impédances d'entrée dans le domaine fréquentiel en prenant soin de récupérer les données de manière exhaustive, c'est-à-dire en amplitude et en phase.

Par ailleurs, en s'inspirant des expériences de perception menées sur le timbre, il peut être important de posséder également des données concernant le son rayonné qui caractérise précisément 'ce que l'on entend' de la trompette et qui permet d'accéder à des attributs auditifs tels que 'brillance' ou 'qualité d'attaque'.

Enfin, la problématique des mesures géométriques doit être résolue pour obtenir les cotes importantes des instruments de manière directe et également pour augmenter le nombre de données sur une même grandeur surtout lorsque celle-ci est utilisée ensuite sous la forme d'une moyenne.

34

La remise en question de la fiabilité des coefficients de corrélation passe en premier lieu par l'examen de la table de Wallace qui, en fonction du degré de liberté de l'ensemble des objets, fournit un pourcentage d'erreur par rapport au cas idéal ($R = 1$); en d'autres termes, cet indicateur renseigne sur la probabilité de se tromper en considérant une relation de proportionnalité exacte entre les deux variables considérées.

Dans le cas présent, les 10 trompettes de l'étude forment un ensemble à 9 degrés de liberté et la table de Wallace affirme que pour que la probabilité décrite précédemment soit inférieure à 1% - respectivement 10% -, le coefficient de corrélation doit être au moins égal à 0.735 - respectivement 0.521 -. Il est intéressant de noter, à ce propos, que la valeur seuil de ces coefficients de corrélation est de l'ordre de celles obtenues par notre analyse.

35

La maîtrise de l'évolution des grandeurs physiques sur les instruments donne une grande latitude à la recherche et à l'examen des paramètres objectifs puisqu'elle permet d'étudier l'influence sur la perception d'une seule grandeur.

On peut, par exemple, concevoir une série de tests avec des trompettes identiques sur tous les points mais dont seul le profil de pavillon varie régulièrement entre le 'très fermé' et le 'très ouvert'. Cela permet alors d'examiner le résultat des jugements subjectifs sur un ensemble d'objets dont on connaît à priori les paramètres physiques significatifs, sachant que la variation d'une grandeur physique peut modifier plusieurs paramètres physiques indépendants : en l'occurrence, l'ouverture variable du pavillon va certes directement modifier le coefficient d'évasement (voir point 20) mais peut aussi influencer sur la position des pics d'impédance donc sur la valeur des fréquences réduites (voir point 23) - et donc sur l'harmonicité -, ou encore sur le timbre de l'instrument (voir point 4).