

# COMPTE RENDU DES RECHERCHES 2002 - 2007

## 1. La recherche en acoustique musicale, une *nécessaire* mise au point.

Chaque fois que je suis interrogée sur mon activité de recherche je constate que mes interlocuteurs sont étonnés de découvrir que la réunion des deux mots, « acoustique » et « musicale », soit n'évoque rien pour eux, soit recouvre tout à fait autre chose que ce qu'ils imaginaient naïvement. Cet état de chose n'a pas beaucoup changé depuis une quarantaine d'années.

« L'acoustique est une science, la musique est un art » rappelait fréquemment Emile Leipp. Ces deux domaines, Musique et sciences ont pourtant eu d'étroits liens dans l'histoire à travers l'arithmétique et la mécanique.

La découverte dans l'Antiquité des proportions numériques entre les longueurs de corde correspondant à certains intervalles musicaux comme l'octave (2), la quinte (3/2), la quarte (4/3) et la tierce majeure (5/4), découverte attribuée à Pythagore, a fasciné les Grecs, puis a constitué la matière de l'enseignement de la « musique » dans le quadrivium des Art libéraux. De grands esprits philosophes et scientifiques – Descartes, Mersenne, Galilée fils, d'Alembert, Euler – se sont risqués à écrire un traité de musique et aujourd'hui encore paraissent régulièrement des ouvrages emplis de calculs tentant d'établir les rapports les plus exacts possibles entre les sons et les notes de musique. En 1701 Joseph Sauveur, mathématicien et académicien à qui nous devons le terme « acoustique », écrit un ouvrage intitulé *Principes d'acoustique et de Musique* dans lequel il développe un Système général des Intervalles des Sons, décrit un « échomètre », une règle fournissant les mesures des intervalles musicaux (en unités logarithmiques !), et des tempi par référence à un pendule. Sauveur propose aussi une méthode pour définir un son « fixe » (sorte de diapason de référence) ... et meurt ignoré des musiciens et sans véritable reconnaissance scientifique. Lorsqu'un musicien, comme Rameau, s'efforce de développer une théorie fondée sur les rapports « harmoniques » il doit, pour justifier les tonalités mineures, imaginer une série descendante, en miroir de la première, qui n'a pas de réalité physique. Faute de matérialisation le son n'est pas encore objet d'étude objective. Les écrits du grand physicien-physiologiste H. Von Helmholtz qui constituent le premier traité d'analyse de sons marqueront tout à la fois l'apogée et l'impasse d'une tentative de vouloir justifier les principes de la musique sur des données numériques. De telles constructions théoriques ne correspondent pas à la réalité musicale dont l'essence ne se situe justement pas dans l'exactitude des proportions numériques, mais dans l'écart, l'équivoque, dans les tensions et les détentes, dans la suggestion et le détournement.

**Musique et Arithmétique**

La recherche en acoustique musicale, une nécessaire mise au point.

### **Musique et mécanique.**

Le plus souvent il faut un « instrument » pour jouer de la musique. La plupart des instruments sont le fruit de l'expérience empirique, certains même, ont été inventés par des ingénieurs. Citons le premier orgue hydraulique inventé par le grec Ktésibios (II<sup>ème</sup> siècle A.JC), le Glass Harmonica (ou harmonica de verre) imaginé par B. Franklin (18<sup>ème</sup> siècle) et adopté par Mozart. Mais c'est surtout l'étude du fonctionnement mécanique des différentes parties des instruments qui a fait l'objet de recherches scientifiques dès le 17<sup>ème</sup> siècle. Loi des cordes vibrantes (Mersenne puis d'Alembert), loi des tuyaux sonores (Bernoulli), vibrations des plaques (Chladni puis Rayleigh). Créé par un chercheur luthier, Emile Leipp, le Laboratoire d'Acoustique Musicale a été accueilli en 1963 par le département de mécanique de la faculté des sciences auquel il est toujours rattaché. Aujourd'hui encore, la section « acoustique musicale » des congrès internationaux d'acoustique renferme principalement des recherches théoriques et expérimentales portant sur des structures vibrantes mécaniques nécessairement simplifiées dans leurs fondements, c'est à dire dépourvues des singularités introduites par les luthiers pour produire des sons complexes et intéressants à l'écoute.

### **Acoustique et Son : la perception**

Ce qui donna résolument une nouvelle orientation à la recherche en acoustique musicale, ce furent les possibilités d'enregistrement du son et l'analyse de Fourier, en particulier la FFT donnant accès à l'analyse des phénomènes transitoires, et d'une façon générale à la représentation de l'évolution temporelle des phénomènes sonores. Dès cette époque (années soixante), Emile Leipp a inlassablement « milité » pour la conception d'une recherche incluant les données de la perception sonore humaine, le plus souvent absente des recherches antérieures.

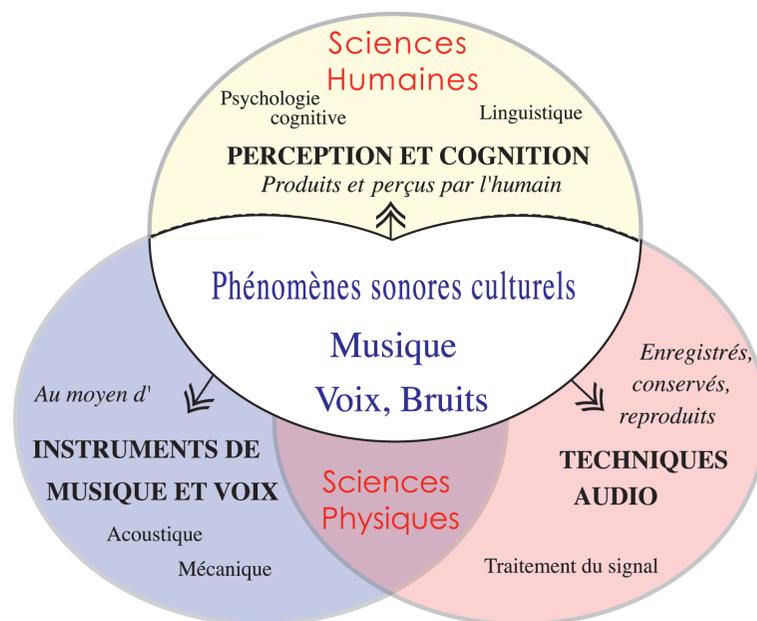
Pour présenter l'acoustique musicale empruntons l'expression d'Emile Leipp : « *ce qui est en cause, c'est l'Acoustique dans son sens le plus large, c'est à dire, la Science générale des sons perçus et intégrés par l'homme* »<sup>1</sup>. Il s'agit bien de Science (avec une majuscule dans le texte), mais d'une science qui doit prendre en compte l'humain. Tout au long de mes recherches je me suis efforcée de réunir dans une démarche cohérente l'acoustique physique des phénomènes sonores mécaniques, les données de la perception humaine et la musique telle qu'elle est jouée et perçue. Ou plutôt, prenant comme point de départ des interrogations nées de la musique, c'est à dire des singularités de ses instruments et des particularités de son écoute, je me suis efforcée de poser en termes acoustiques des problèmes de physique et de perception sonore.

Cette approche pluridisciplinaire favorablement accueillie au CNRS (Département SPI) et soutenue activement par la direction de la recherche du Ministère de la Culture, a pu se développer à l'Université Paris 6 grâce à la constitution d'une équipe de chercheurs et d'ingénieurs de formations diverses : physiciens (fluides et solides), chercheurs

---

1. Introduction de «Acoustique et musique», Masson, Paris, 1976.

en traitement du signal, luthier, et tout dernièrement grace à l'intégration de chercheurs en sciences humaines, en particulier Danièle Dubois, psycholinguiste. Chercheurs, stagiaires et doctorants sont aussi des musiciens!



**Figure 1** - Organigramme des recherches de l'équipe LAM, Institut Jean-Le-Rond d'Alembert.

Dans le cadre de la restructuration demandée par l'Université, l'UMR d'Acoustique Musicale devient l'équipe Lutheries Acoustique et Musique du nouvel Institut « Jean Le Rond d'Alembert » (IJLRA). Le programme de recherche en acoustique musicale, dans lequel s'intègrent mes recherches, a été présenté sous la forme du schéma ci-dessus où apparaissent les trois grands thèmes : Perception et cognition, Instruments de musique et voix, techniques audio, thèmes qui concernent ces phénomènes sonores culturels que sont la *Musique*, les *Bruits* et la *Voix humaine*.

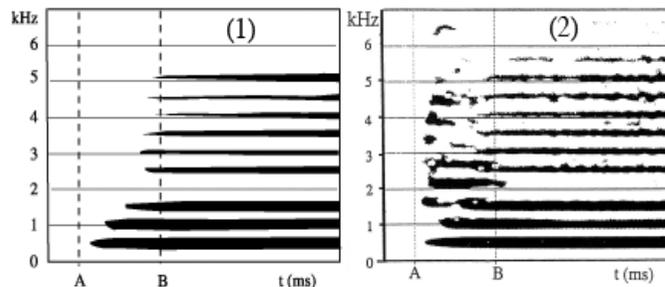
### Les trois thématiques du LAM

## 2. Le transitoire d'attaque : facteur de qualité des tuyaux à embouchure de flûte

Le transitoire d'attaque, ou portion d'établissement de la vibration d'une structure sonore, correspond dans les instruments à embouchure de flûte à la montée en pression dans la bouche du musicien ou dans la gravure du sommier d'un orgue, jusqu'au moment où s'établit le régime dit "stationnaire" qui produit la note émise par l'instrument. La plupart des modélisations permettent aujourd'hui de décrire assez correctement l'ordre d'arrivée des composantes du son stationnaire ainsi que leur montée en amplitude, en fonction de la vitesse de montée en pression et de la valeur de la pression nominale (du régime stable). L'analyse acoustique d'un tel transitoire est représenté figure 2 (gauche). Dans la réalité acoustique on observe généralement dans le transitoire, l'apparition fugace de fréquences et de bruits précédant l'établissement de la première composante (figure 2, droite). Ces composantes jouent un rôle important dans l'appréciation de la qualité sonore, mais ne sont pas prises en compte dans les modélisations.

### SON N°1

Son du tuyau d'orgue de la figure ci-contre, (1) privé du son de bouche, puis (2) normal. La séquence donne à entendre : (1) (2) (1) (2) puis (3), le son de bouche isolé extrait avec Audiosculpt, répété 2 fois et suivi à nouveau de (2). [MC]



**Figure 2** - (1) Analyse spectrotemporelle d'un transitoire théorique de tuyau d'orgue à embouchure de flûte. La partie AB délimite l'établissement des composantes harmoniques du tuyau. (2) Analyse d'un transitoire réel avec son de bouche comportant de nombreuses composantes inharmoniques et des bruits.

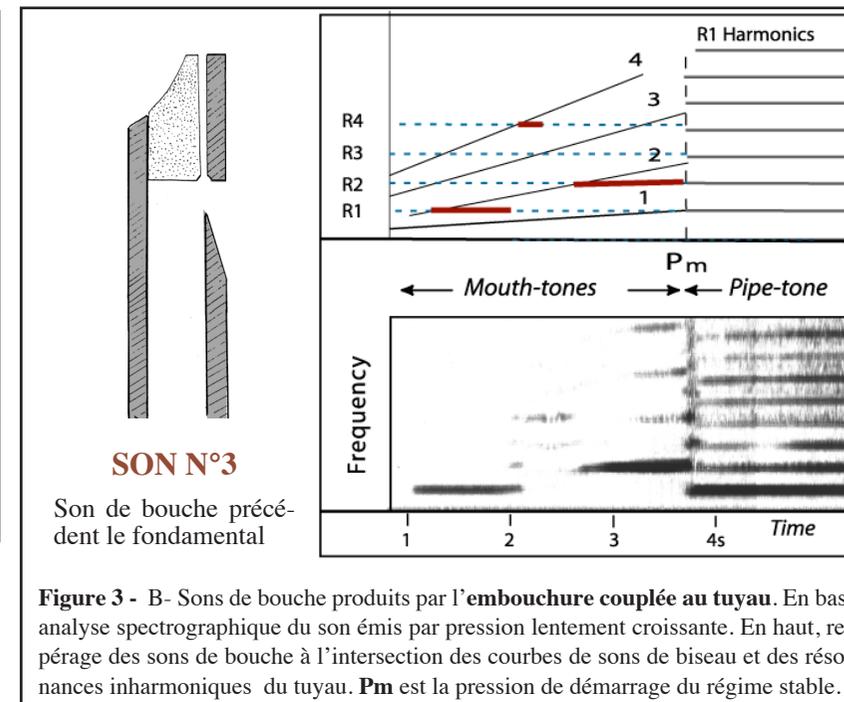
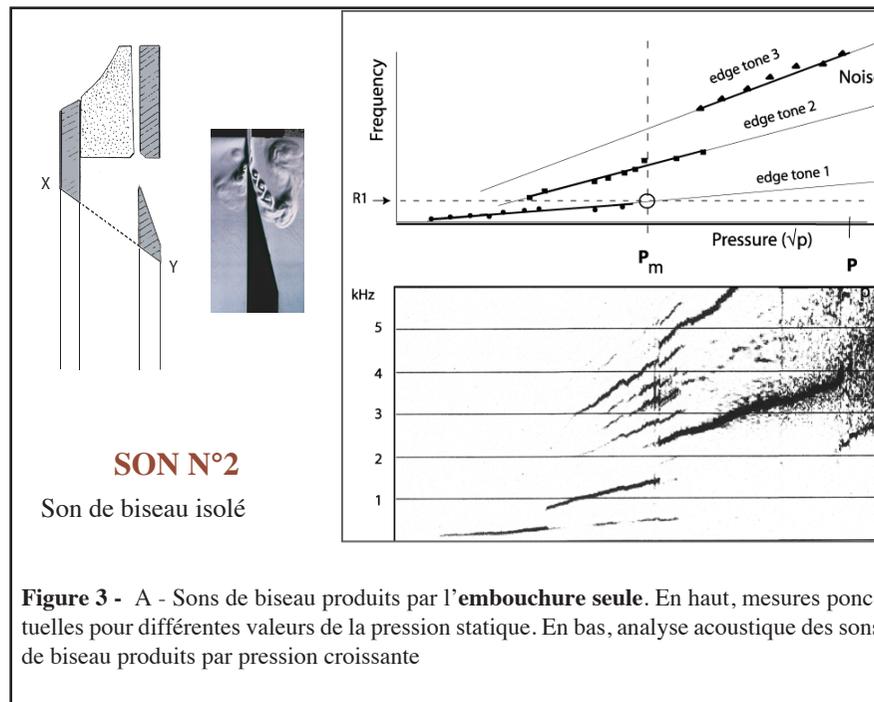
Les transitoires d'attaque sont des phénomènes extrêmement complexes qui varient à chaque attaque du tuyau, de façon apparemment incohérente. Pourtant il est possible de "démonter" la mécanique hydrodynamique qui se déroule pendant le temps très court du transitoire d'attaque. Les éléments en sont les sons de biseau, les modes propres du tuyau et la forme temporelle de l'établissement de la pression. Ce travail commencé au cours de la thèse (1976) a été repris en 1995, et a donné lieu à une nouvelle série de mesures présentées au congrès ISMA en 2004. Nous en donnons ici les principaux résultats.

Cg: 11. - 2004 - Castellengo M., - Flute-like instrument transients : An analytical study of mouth-tone production versus pressure rise time, Conférence invitée; Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics, Nara, Japan

### 2.1. Courbes des sons de biseau (figure 3A)

Séparée du tuyau de la flûte, l'embouchure est un instrument sonore produisant des sons dont la fréquence et l'amplitude croissent avec la vitesse de l'air à la sortie de l'embouchure. Les fréquences de ces sons, mesurées pour différentes valeurs stables de la pression, se situent sur un faisceau de courbes correspondant à différents régimes

hydrodynamiques. Voir la partie supérieure de la figure 3A (edge tone 1 à 3). L'analyse spectrographique du même système alimenté par une pression continûment croissante produit effectivement les fréquences mesurées de façon statique accompagnées respectivement de plusieurs harmoniques et de bruits de souffle.



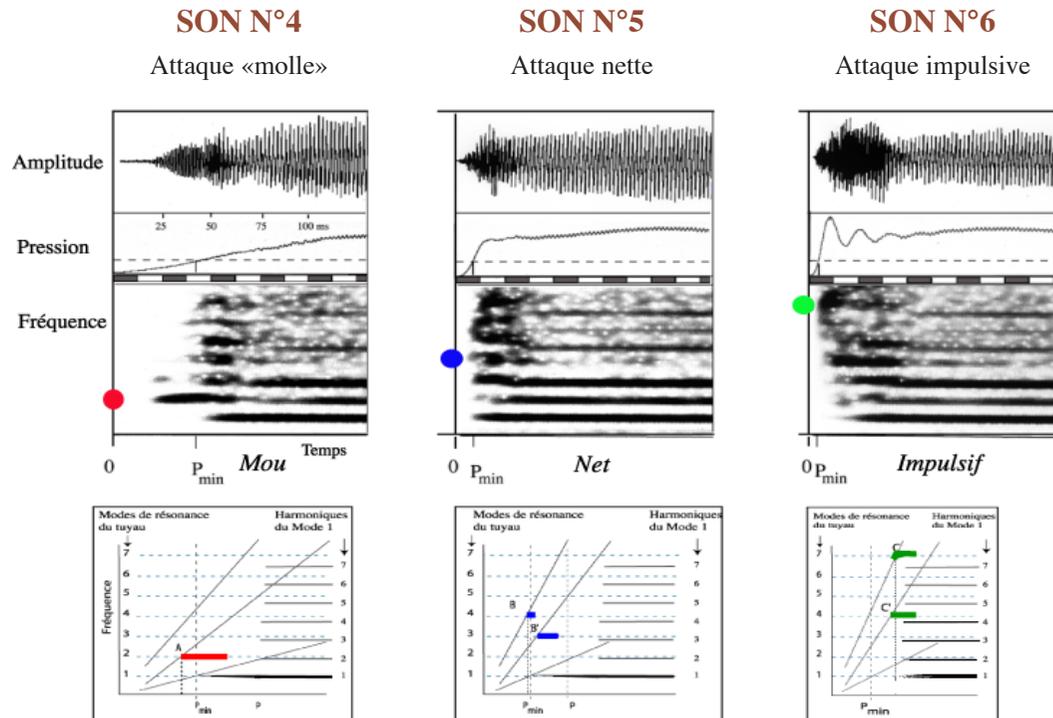
## 2.2. Sons de bouche : comportement quasi-statique (figure 3 B)

Lorsqu'on réunit l'embouchure au tuyau et que l'on produit à nouveau une montée très progressive de la pression d'alimentation pendant 4 secondes (partie inférieure de la figure 3B), on constate que trois sons de hauteur définie précèdent l'établissement du régime stable : l'un à la fréquence du fondamental, l'autre à la double octave, et le troisième qui est plus intense, à l'octave. Ces trois sons correspondent respectivement aux fréquences de résonance R1, R4 et R2 du tuyau (partie supérieure de la figure 3B). C'est tout d'abord la 2ème courbe de son de biseau qui croise

la première résonance du tuyau. L'oscillation du jet se stabilise pendant un court instant sur cette fréquence, puis saute à la 4<sup>ème</sup> courbe en accrochant la résonance R4 du tuyau, et finalement se stabilise sur la deuxième résonance, juste avant le démarrage du régime stationnaire pour la pression  $P_m$ . Les sons ainsi produits par couplage des sons de biseau avec les modes propres du tuyau sont appelés **sons de bouche**. Leurs fréquences, calées sur celles des modes propres du tuyau sont étrangères à la série des harmoniques du mode 1 entretenu pendant le régime dit «normal».

Il est important de préciser que la montée progressive en pression ici analysée ne peut en aucun cas être considérée comme un «transitoire ralenti». Elle représente le comportement quasi statique de la mise en régime d'un tuyau à bouche. Dans la réalité, la montée en pression se produit de façon variable, et généralement très rapide : entre 5 et 50 ms. Les sons de biseau ne présentant quasiment pas d'inertie, leurs fréquences augmentent très rapidement avec l'accroissement de la vitesse de l'air à la sortie du canal, si bien que **les sons de bouche apparaissent bien avant l'établissement du fondamental, dès les premières millisecondes**. Les fréquences des résonances accrochées sont plus ou moins aiguës selon la pente de la montée en pression. Le tuyau ne peut démarrer en régime "normal" que lorsque la pression atteint une valeur minimale  $P_m$  et lorsqu'un certain nombre d'aller et retours de l'onde interne a pu s'effectuer (environ une douzaine de périodes).

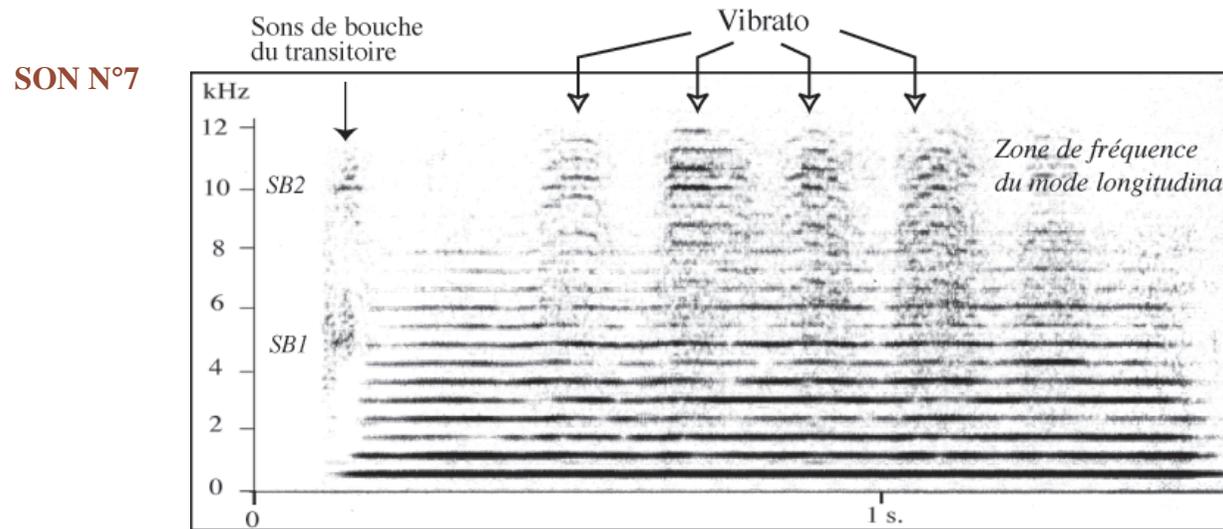
### 2.3. Analyse des sons de bouche d'un tuyau d'orgue pour trois attaques différentes.



**Figure 4** - Un tuyau d'orgue est joué avec trois montées en pression différentes produisant 3 transitoires qualifiés de «mou», «net» et «impulsif». A partir des courbes des sons de biseau et des fréquences de résonance du tuyau il est possible de prévoir quels sons de bouche vont se produire avant l'arrivée des harmoniques. On notera que la stabilisation du fondamental se fait plus rapidement pour le transitoire «net» que pour le transitoire très bref de type «impulsif», dans lequel l'accrochage par le son de bouche des modes 7 et 4 du tuyau gêne le démarrage du fondamental. Les ronds colorés du sonagramme repèrent la première composante du transitoire

La figure 4 montre à titre d'exemple l'analyse acoustique d'un même tuyau d'orgue dont la montée en pression varie de «mou» à «net» puis «impulsif». Dans les trois cas la pression nominale du régime stationnaire est la même. La composition spectrale du transitoire change de façon considérable. La partie inférieure représente l'analyse fonctionnelle des courbes des sons de bouche combinées avec celles des résonances du tuyau, ce qui permet d'expliquer le contenu fréquentiel du transitoire. Outre les fréquences des sons de bouche dus au couplage de sons de biseau avec les résonances du tuyau on remarque d'autres composantes qui sont des combinaisons non linéaires entre sons de bouche et fréquence fondamentale du régime 1. On notera que le régime stationnaire du tuyau s'établit plus rapidement pour la montée en pression intermédiaire (entre long et bref).

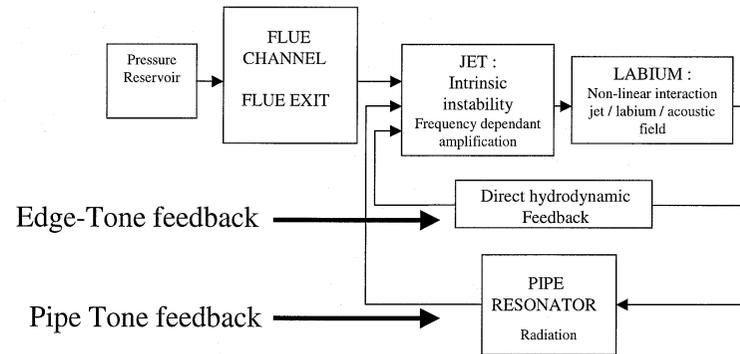
## 2.4. Transitoires d'attaque et modes transversaux : la flûte traversière.



**Figure 5 - - Flûte Traversière.** Les sons de biseau stabilisés sur le premier mode de résonance *transversal* du tuyau (10 kHz) sont modulés en fréquence par le vibrato du flûtiste (5/s). En interférant avec la fréquence fondamentale ils produisent un spectre variable inharmonique évoluant entre 8 et 12 kHz qui confère un caractère «grésillant» au jeu de ce flûtiste.

Le plus fréquemment les sons de bouche sont dus à l'accrochage des résonances *longitudinales* des tuyaux. Dans le cas de certaines flûtes comme la flûte traversière et le Shakuhachi japonais, instruments pour lesquels la vitesse du jet est plus grande, les sons de biseau peuvent atteindre des fréquences élevées et se stabiliser sur les modes *transversaux* du tuyau. L'exemple de la figure 5 en donne un exemple étonnant. On voit d'une part les deux composantes du son de bouche présent au transitoire, avant le régime stable, puis l'apparition de «colonnes» d'amplitude variable synchronisées sur le vibrato. Comme pour les tuyaux d'orgue du jeu de viola 4' étudiés en 1999 on a ici un cas de coexistence de deux régimes oscillatoires du jet qui interfèrent de façon complexe. Le jet subit le feedback de deux boucles d'asservissement en fréquence. Ce phénomène est longtemps passé inaperçu car habituellement les analyses spectrales acoustiques ne dépassent guère la limite de 6 kHz. C'est en cherchant à expliquer le caractère «sifflant et grésillant» du jeu de certains flûtistes que nous l'avons objectivé puis expliqué lors de notre recherche sur les transitoires d'attaque.

## 2.5. Conclusions



**Figure 6** - schéma montrant les deux systèmes contrôlant la fréquence du jet à l'embouchure d'un tuyau de flûte. Le feedback qui contrôle les sons de biseau intervient dès le début du transitoire. Le plus souvent il est supplanté par celui du tuyau, mais, comme on l'a vu figure 5 il peut aussi coexister avec ce dernier. (ICA 2001 - coll. B. Fabre).

niste d'articuler le phrasé musical malgré la réverbération du lieu. Par ailleurs les petites fluctuations de pression qui se produisent dans la gravure<sup>2</sup> du sommier d'orgue, qui sont sans incidence notable sur la hauteur fondamentale du tuyau, produisent au contraire d'importants changements dans les sons de bouche du transitoire d'attaque. Lorsqu'ils sont bien maîtrisés par le facteur, les sons de bouche donnent de la «vie» au son des tuyaux qui sans eux, pèchent par uniformité.

Enfin nous avons montré par cette recherche que les sons de bouche peuvent se combiner au son fondamental pendant le régime stationnaire et que ce phénomène peut prendre, dans le jeu de la flûte traversière, une importance non négligeable dans la qualité sonore perçue. L'ensemble des résultats a fait l'objet d'une conférence au congrès ISMA.

Cg: 11. - 2004 - Castellengo M., - Flute-like instrument transients : An analytical study of mouth-tone production versus pressure rise time, Conférence invitée; Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics, Nara, Japan

2. nom du conduit alimentant le tuyau en air comprimé.

### 3. Voix chantée : mécanismes laryngés, registres, voix mixte, Tahrir

#### 3.1. La voix humaine : une recherche pluridisciplinaire par excellence

Parmi les sources sonores la voix humaine tient une place particulière. Elle s'inscrit dans une chaîne complexe dans laquelle *l'instrument*, au sens de la facture, est entièrement sous le contrôle d'un sujet humain qui ajuste l'ensemble des mécanismes de production sur le retour perceptif qu'il en a par la boucle audiophonatoire. Cet « instrument » est un organe vivant qui s'adapte différemment selon les situations de communication, privilégiant tantôt les variations rapides de spectre (parole) et tantôt les variations de hauteur fondamentale et de qualité sonore (voix chantée). Pluridisciplinaires par nature les recherches sur la voix suscitent de nombreuses collaborations extérieures.

Dans la réalisation spécifique du chant la voix humaine représente assez emblématiquement, tout à la fois la richesse et les difficultés de notre recherche en acoustique musicale. Dans un programme de recherche on sépare logiquement l'étude de la structure vibrante instrumentale de celle de l'analyse acoustique des sons rayonnés, et de celle des qualités perçues par les auditeurs. Une telle distinction est inapplicable ici car « l'instrument » vocal est un tout incarné par un être vivant. Son étude présente plusieurs obstacles.

1/ **L'organe producteur des vibrations, la source vibratoire laryngée, est difficile d'accès.** Son observation relève de l'investigation médicale spécialisée : vidéostroboscopie laryngée, kymographie, radiographie et cinématographie ultrarapide nécessitent des moyens puissants, en particulier pour l'étude des transitions. Celle des cavités de résonance qui conditionnent la mise en forme spectrale du son-source nécessiterait des techniques d'imagerie 3D temporelles, encore inaccessibles aujourd'hui.

2/ **Le chanteur, hôte et pilote de l'organe vocal, a une perception globale complexe de ce qu'il effectue,** composée de sensations proprioceptives kinesthésiques et de retours acoustiques internes et externes. Le couplage fusionnel qui s'opère entre le ressenti corporel de la production et l'effet sonore perçu est le fondement d'un discours pédagogique souvent très précis, mais très personnel, difficile à décoder par un observateur externe.

3/ **En tant qu'art le chant s'inscrit dans une culture où les règles esthétiques conditionnent la production sonore dès l'enfance.** Si de jeunes Mongols (7 ans) peuvent produire une voix de contrebasse puissante, et à l'opposé, des hommes âgés une voix de soprano puissante et souple dans le théâtre traditionnel Chinois, ce ne sont pas des exceptions anatomiques. Tous les êtres humains, hommes et femmes, ont à leur disposition quatre mécanismes laryngés pour produire une collection de sons variés, mais le développement de ceux-ci et leur usage dépendent des con-

ventions sociales dans lesquelles ils évoluent. Le pression culturelle est telle qu'elle oriente aussi des études scientifiques sensées être objectives.

Une étude du *fonctionnement de l'organe vocal* nécessite donc une collaboration étroite avec des médecins ORL et des rééducateurs de la voix (phoniâtres, orthophonistes), avec des chanteurs et professeurs de chant, ainsi qu'avec des ethnomusicologues. La voix est l'instrument le plus universellement partagé entre les humains, et à travers la diversité de ses usages nous accédons à la totalité de ses potentialités.

L'étude de la *qualité vocale* est tout aussi complexe. La mise en relation des analyses acoustiques et des opinions des auditeurs passe par l'expression verbale. Ce n'est que par la collaboration avec des chercheurs en sciences humaines, et en particulier avec des psycholinguistes, que nous avons pu mettre en place un protocole de test pour analyser le discours des chanteurs, celui des professeurs de chant, celui d'auditeurs amateurs de chant, et relier ces divers résultats aux analyses acoustiques.

De 2002 à 2007 mes recherches ont porté principalement sur la caractérisation acoustique des mécanismes laryngés à travers leur emploi dans la voix mixte et dans le «tahrir» Iranien, ainsi que sur l'analyse des critères acoustiques rendant compte de la qualité vocale. Cette recherche bénéficie de nombreuses collaborations.

### **3.2. Mécanismes laryngés et registres des chanteurs.**

*Nathalie Henrich (CNRS), Bernard Roubeau (Hôpital Tenon), Sylvain Lamesch (doctorant), Robert Expert (chanteur), Christophe d'Alessandro et Boris Doval (LIMSI), Jean During (CNRS-Ethnomusicologue)*

#### *3.2.1. Prédominance des études du chant lyrique "occidental": le problème des registres.*

La grande majorité des études acoustiques sur la voix chantée a principalement trait à l'art vocal qualifié de lyrique, c'est à dire à la technique vocale des chanteurs d'opéra. Sur les bases d'une esthétique bien définie : appréciation d'une voix souple et puissante, capable de "passer" un orchestre de 100 musiciens, et pourvue d'un timbre homogène sur toute la tessiture, s'est constitué un ensemble de données techniques vocales masculines et féminines tendant à définir des critères normalisés du "beau" chant : son vibré, timbre riche avec le «formant du chanteur», ligne mélodique continue. Dans cette optique esthétique les chanteurs travaillent l'égalisation des registres vocaux en ignorant le plus souvent l'existence des mécanismes laryngés.

### 3.2.2. Registres et mécanismes : l'exemple de Garcia.

Dans la voix d'un chanteur donné on peut distinguer des zones différentes depuis le grave jusqu'à l'aigu. Chaque portion de la tessiture est un registre. Un registre correspond à un groupe de sons consécutifs donnant la sensation d'une qualité homogène (à la fois proprioceptive et acoustique). La notion de registre est complexe. Elle combine un type de production laryngée et l'adaptation des résonateurs.



— Le miroir à main dirige le rayon solaire contre le petit miroir guttural et reçoit de celui-ci l'image de la glotte.

La célébration du centenaire de la naissance de Manuel Garcia jr (1805 - 1906), chanteur de renom et auteur d'une méthode de chant dont les nombreuses éditions ont fourni la base de la pédagogie lyrique, a été l'occasion d'un congrès PEVOC<sup>3</sup> au cours duquel j'ai présenté un travail d'analyse historique sur les sources de l'incompréhension persistant actuellement entre artistes et scientifiques, au sujet des "registres" de la voix.

P4. - 2005 - Castellengo M. - Manuel Garcia jr, a clear-sighted observer of human voice production. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 30, p.163-170

Manuel Garcia est aussi le premier observateur des mécanismes laryngés. A l'aide d'un miroir incliné il a étudié le mouvement des cordes vocales pendant le chant et au cours du changement de mécanisme. Mais en employant un seul mot "**registre**" pour désigner, soit les diverses configurations du larynx (dans ses observations laryngoscopiques), soit les zones de tessiture de même qualité vocale des chanteurs (dans sa méthode de chant), il a été à l'origine de malentendus qui perdurent encore aujourd'hui. Depuis notre première publication en 1983, nous n'avons cessé d'insister sur la nécessaire rigueur du vocabulaire en voix chantée, c'est à dire sur l'emploi de *deux termes distincts* pour les deux niveaux d'élaboration du son vocal :

- **Les mécanismes laryngés pour le niveau du larynx**
- **Les registres pour l'ensemble larynx + résonateurs.**

*Les mécanismes laryngés sont au nombre de 4.* Nous les désignons par M0, M1, M2 et M3.

*Les registres vocaux sont en nombre variable* selon le type de voix. Leur dénomination change selon les tendances esthétiques : un même terme peut désigner des registres différents.

Cette question du vocabulaire a longtemps été un obstacle à une bonne coopération avec les chanteurs. Elle est la condition première d'un travail pluridisciplinaire lucide sur le plan scientifique et respectueux de l'art des chanteurs.

---

3. Pan European Voice Conference

### 3.2.3. Objectivation des mécanismes laryngés

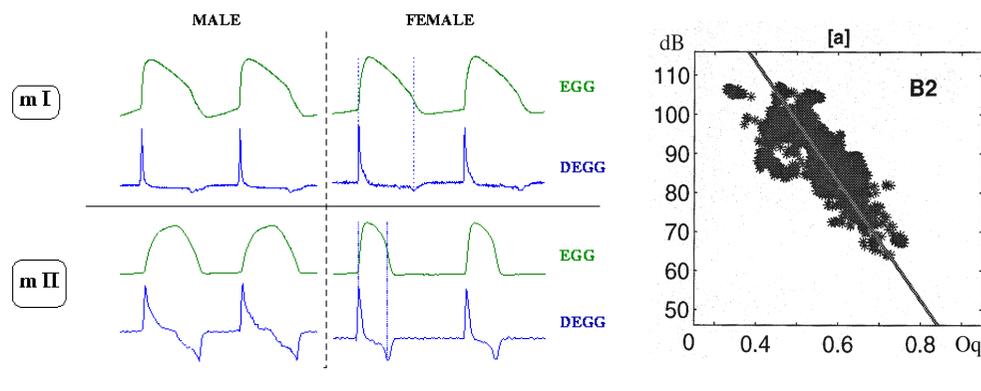
L'electroglottographie (EGG) permet une première objectivation des mécanismes laryngés, en particulier pendant les transitions (glissandi, changement de mécanisme sur une note tenue). Au cours de son travail de thèse, Nathalie Henrich a mis au point une méthode de mesure de la détection des pics d'ouverture et fermeture glottique sur les signaux dérivés de l'EGG, ce qui permet une détermination très fiable de la fréquence fondamentale  $f_0$  et du quotient ouvert  $Oq$  et une analyse des doubles pics du signal DEGG.

Nous avons ainsi pu reprendre et développer la caractérisation des mécanismes laryngés, base de toute production vocale. Invitée au premier congrès PAS<sup>4</sup> en Octobre 2002 j'ai eu l'occasion de présenter une synthèse des recherches développées au LAM depuis sa création, et en particulier d'insister sur la nécessaire étude des transitions pour identifier les mécanismes laryngés. Le texte Anglais et les exemples sonores de cette présentation sont toujours en ligne, à l'adresse : [http://www.med.rug.nl/pas/Conf\\_contrib/Castellengo/Castellengo\\_bio\\_touch.htm](http://www.med.rug.nl/pas/Conf_contrib/Castellengo/Castellengo_bio_touch.htm)

La caractérisation des transitions, visible sur l'EGG a été complétée par les mesures du DEGG et a donné lieu à une présentation à la conférence SMAC (Stockholm Music Acoustics Conference) en 2003.

Cg: 10. - 2003 - Henrich N., Roubeau B., Castellengo M. - On the use of electroglottography for characterisation of the laryngeal mechanisms. SMAC03, Stockholm.

### 3.2.4. Mécanismes laryngés et quotient ouvert ( $Oq$ )<sup>5</sup>



**Figure 7** - A gauche, formes d'ondes de l'EGG (en vert) et du DEGG (bleu) typiques du mécanisme 1 (MI) partie supérieure et du mécanisme 2 (MII) partie inférieure. Ces distinctions sont comparables chez l'homme et chez la femme. Sur le DEGG; les pics de fermeture et d'ouverture, repérés sur les tracés de la voix de femme, permettent de calculer le quotient ouvert.

**Figure 8** - Ci-contre, relation entre la valeur du quotient ouvert  $Oq$  et l'amplitude en dB. Thèse Nathalie HENRICH

4. 1st International Conference on Physiology and Acoustics of Singing
5. pour Open Quotient

La mesure du quotient ouvert  $Oq$ , rapport de la durée d'ouverture à la période totale de la vibration laryngée, s'avère un paramètre important pour caractériser les mécanismes laryngés. Une première publication décrit les avantages de l'algorithme adopté (DECOM) pour caractériser les instants d'ouverture et de fermeture glottique, ce qui permet de calculer le quotient ouvert.

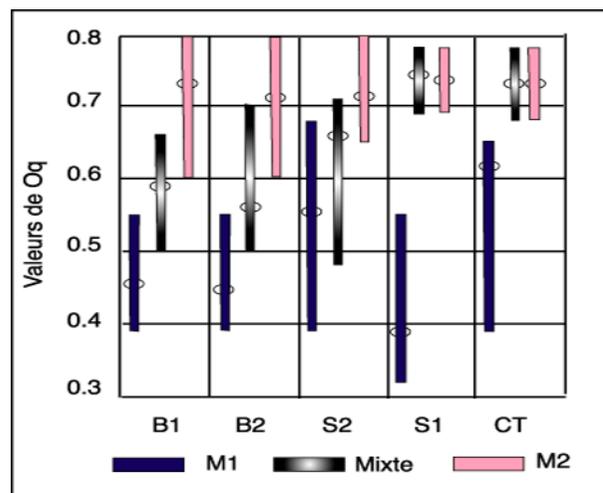
P2. - 2004 - Henrich N., d'Alessandro C., Castellengo M., Doval B. - On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of non-pathological voice phonation. *J.A.S.A.*, 115 (3), 1321-1332.

Dans une deuxième étude, les variations du quotient ouvert avec le mécanisme laryngé, l'intensité et la fréquence fondamentale sont analysés dans plusieurs sortes de productions vocales masculines et féminines.

P5. - 2005 - Henrich N., Castellengo M., d'Alessandro C., Doval B., - Glottal open quotient in singing : Measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency. *J.A.S.A.*, 117 (3) ; p.1417-1430

Un point important est la variation du quotient ouvert en mécanisme 1 (M1) avec l'intensité sonore (figure 8). Il va me permettre de caractériser sur une base objective un registre de chanteurs : la voix mixte

### 3.3. Etude de la voix mixte



**Figure 9** - Mesure des valeurs du quotient ouvert dans la production de 5 Chanteurs : deux barytons B1 et B2, deux sopranos S1 et S2, un contre ténor CT. Les valeurs du quotient ouvert  $Oq$  qui caractérisent les mécanismes permettent d'affirmer que pour S1 et CT la voix mixte est en mécanisme 2. Pour les trois autres chanteurs il s'agit d'une voix mixte en mécanisme 1, compte tenu du fait que l'intensité de la voix mixte baisse d'environ 10 dB, ce qui entraîne une augmentation de la valeur de  $Oq$  en mécanisme 1.

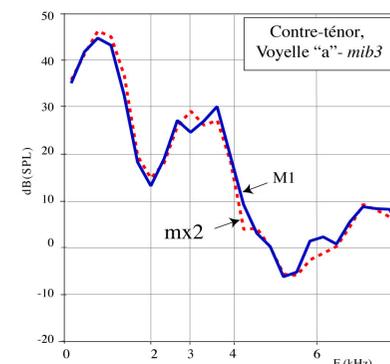
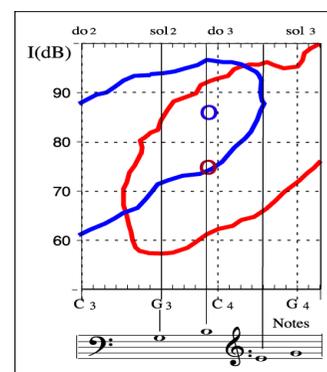
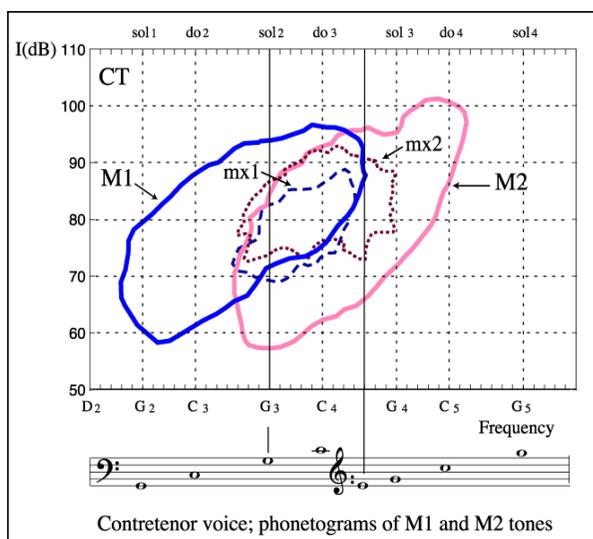
Le terme «Voix mixte» donne l'idée d'un mélange que beaucoup d'auteurs attribuent à un mécanisme laryngé intermédiaire qui serait une sorte de vibration laryngée combinant M1 et M2.

En 2000 Bertrand Chuberre, chanteur et étudiant en médecine, a effectué une première étude de la voix mixte dans le cadre de son mémoire de fin d'études de la Classe d'Acoustique Musicale du CNSM (Voir 5.3.3).

L'étude portait sur cinq chanteurs : deux barytons, un contre ténor et deux sopranos. Conscient de la double gestion laryngée et résonnante, Bertrand Chuberre avait enregistré simultanément l'EGG et le signal acoustique et montré

que la voix mixte était due principalement à des ajustements résonantiels. Toutefois, la dispersion des valeurs de  $O_q$  restait problématique. Le travail a été repris en 2004 sur la base des résultats de Nathalie Henrich et nous avons pu montrer que les variations des valeurs de  $O_q$  en M1 étaient directement liées aux changements d'intensité que le chanteur devait effectuer pour passer en voix mixte. Cette publication a clairement établi que **le registre «voix mixte» est toujours produit dans l'un ou l'autre mécanisme laryngé, qu'il n'existe pas de mécanisme mixte**, et qu'il y a donc lieu de distinguer deux sortes de registres de voix mixte selon le mécanisme utilisé : **Mx1** et **Mx2**.

Cg: 12. - 2004 - Castellengo M., Chuberre., Henrich N., - Is Voix Mixte, the Vocal Technique Use to Smooth the Transition across the two Main Laryngeal Mechanism, en Independent Mechanism ?; Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics, Nara, Japan



**Figure 10** - A gauche, phonétogramme de la voix d'un contre-ténor, dans les deux mécanismes laryngés, et dans les deux productions de voix mixte.

**Figure 11** - Ci dessus, un zoom sur la zone de recouvrement des deux mécanismes où s'effectue la voix mixte. Pour la note *mib* 3, le chanteur augmente l'intensité du son de M2 d'environ 6 dB pour produire un son en Mx2 afin que le spectre soit similaire à un son de M1, tel que le montre la figure de droite. Voyelle /a/

### SON N°8

Deux notes chantées en mixte2 (mx2) et M1 avec une égalisation d'intensité et de timbre remarquable. Voyelle /a/ (contre-ténor; R. Expert)

#### 3.3.1. Voix mixte et phonétogramme : simuler la qualité sonore de l'autre mécanisme.

Le phonétogramme permet de visualiser les potentialités d'une voix en termes d'étendue (axe des x) et d'intensité (axe des y). Dans l'optique que nous avons choisie il importe de différencier les phonétogrammes dans chaque mécanisme. Une étude effectuée sur 41 sujets des deux sexes, chanteurs, amateurs, non chanteurs a été publiée en 2004

P3. - 2004 - Roubeau B., Castellengo M., Bodin P., Ragot M.- Phonétogramme par registre laryngé, Folia Phoniatica, 56, p.321-333

L'étude montre qu'il existe une importante zone de recouvrement entre les mécanismes M1 et M2, zone à l'intérieur de laquelle les chanteurs peuvent travailler l'égalisation sonore du timbre et la continuité des transitions mélodiques, ou au contraire des ruptures comme celles du tahrir (voir ci-dessous). La voix mixte exploite cette zone de recouvrement. Mx1 se positionne vers la limite inférieure d'intensité de M1 et Mx2 se place dans la zone supérieure d'intensité de M2 (Voir figure 10). Les possibilités vocales diffèrent selon que le chanteur est en M1 ou en M2. Le travail de la voix mixte consiste à ajuster les cavités de résonance de sorte que le résultat sonore d'un Mx2 «sonne» comme un son de M1 et réciproquement, un son de Mx1 doit sonner comme un son de M2. L'exemple de la figure 11, partie droite, est particulièrement démonstratif : la courbe spectrale de Mx2 s'ajuste pratiquement sur celle de M1.

Les recherches ont donné lieu à deux publications

Cg: 23. - 2007 - Lamesch S., Expert R., Castellengo M., Henrich N. ; Investigating « voix mixte » : a scientific challenge towards a renewed vocal pedagogy. 3èmes Conférence Interdisciplinaire de Musicologie, CIM07, Tallin

Cg: 22. - 2007 - Castellengo M., Lamesch S., Henrich N. ; Vocal registers and laryngeal mechanisms, a case study : the french « voix mixte ». Conférence invitée, 19th I.C.A., Madrid

### 3.4. le «tahrir», ou l'art d'utiliser la rupture mélodique due au changement de mécanisme

#### SON N°9

Exemple sonore de la figure 12. Une note tenue (fa3) chantée avec la succession des sauts brefs en M2 qui constituent la technique d'ornementation du tahrir iranien. ( Chanteuse S. Badi)

Le tahrir, art vocal caractéristique de la musique d'Iran et d'Azerbaïdjan, est aux antipodes de celui du chant lyrique occidental. Lorsqu'on change de mécanisme sur une note tenue, dans la zone commune aux deux mécanismes, on peut produire une sorte de hoquet dû aux modifications d'ajustement des couches tissulaires impliquées dans la partie profonde de la corde vocale ainsi qu'aux variations de tension du thyroaryténoïdien. Cette recherche, menée en collaboration avec Jean During, Directeur de recherche au Laboratoire d'Ethnomusicologie du Musée de l'Homme, nous apporte un éclairage nouveau sur l'utilisation des mécanismes laryngés. L'étude EGG d'une chanteuse Iranienne a confirmé, par la mesure d'Oq, que l'ornement caractéristique de cette technique vocale était bien une alternance rapide M1-M2-M1 comme on peut le voir sur la figure 12.

Au: 39. - 2007 - Castellengo M., During J., The iranian tahrir : acoustical analysis of an ornamental vocal technique. 3èmes Conférence Interdisciplinaire de Musicologie, C.I.M., Tallin

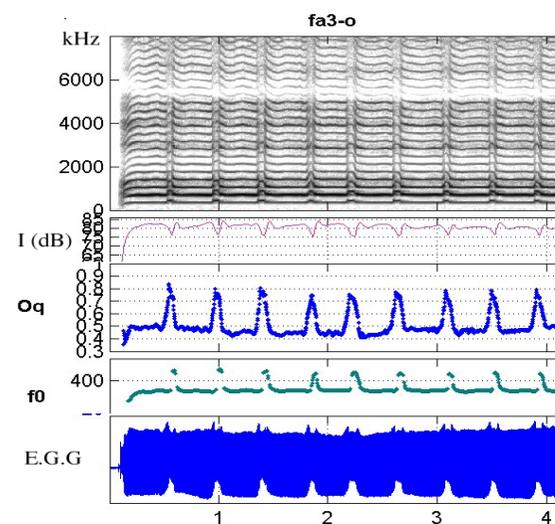
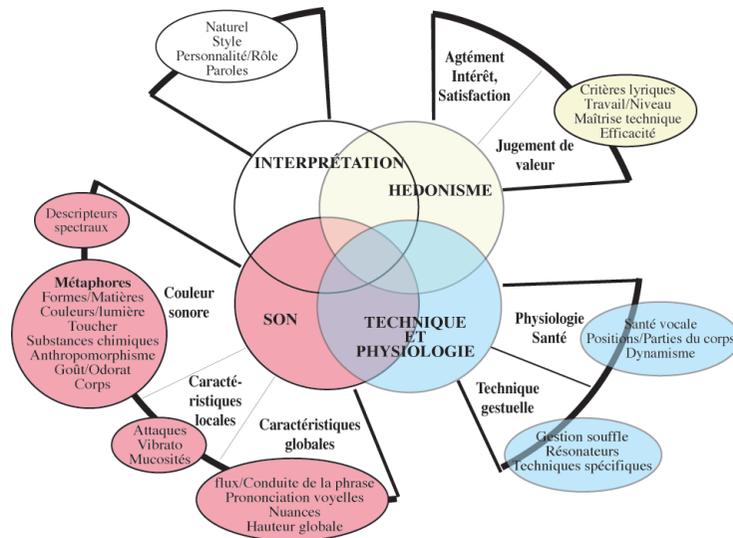


Figure 12 - analyse acoustique et électroglottographique d'une séquence de tahrir iranien.

### 3.5. Qualité vocale dans le chant lyrique : perception, verbalisations et corrélats acoustiques

Avec Danièle Dubois, Nathalie Henrich, Maeva Garnier, David Sotiropoulos (DEA), Sylvain Lamesch



Porter un jugement sur la qualité vocale d'un chanteur c'est apprécier de façon globale une prestation acoustique incluant divers aspects de technique de chant (physiologie, qualité du timbre, intelligibilité) et de style d'interprétation. En collaboration avec Danièle Dubois, psycholinguiste, une analyse des verbalisations produites par les chanteurs eux-mêmes ou par des auditeurs experts a été menée systématiquement afin d'identifier les termes les plus significatifs (sourd, nasal, timbré, clair) susceptibles de correspondre à des indices spectraux et temporels développés par ailleurs. La validation finale doit donner lieu des tests d'écoute.

Figure 13 - - Recensement des termes employés dans la verbalisation des auditeurs évaluant la qualité vocale de chanteurs (Maeva Garnier)

#### Publications :

- Cg: 13. - 2004 - Garnier M., Dubois D., Poitevineau J., Henrich N., Castellengo M. ; Perception et description verbale de la qualité vocale dans le chant lyrique. Journées d'Etudes sur la Parole, Fez.
- Cg: 16. - 2004 - Garnier,M., Dubois D., Poitevineau J., Henrich N., Castellengo M. Description verbale et acoustique de la qualité vocale dans le chant lyrique. ICVPB (International Conference on Voice Physiology and Biomechanics), Marseille

## 4. Perception sonore et catégorisation

### 4.1. A l'écoute des sons

La perception auditive des sons est certainement le point focal de mes recherches. C'est à l'oreille que j'ai réalisé, de 1964 à 1971), le dictionnaire des éléments phonétiques de l'icophone sur la base duquel a été développée une synthèse de **parole** entièrement automatique. Cette expérience m'a permis de concrétiser la notion de *forme acoustique sémantique* comme unité perceptive anamorphosable échappant à la visée paramétrique dominante, notion proche de celle du *prototype* défini en catégorisation perceptive. Dans l'étude des tuyaux à embouchure de **flûte**, c'est l'attention portée à la perception des transitoires d'attaque par les facteurs d'orgue et de flûte à bec qui m'a orientée sur la description et la formalisation de la séquence complexe des éléments mis en jeu au moment de l'établissement du son. De même, les études de *caractérisation de la qualité sonore* d'un grand **orgue** classé Monument Historique qui nous ont été confiées par la Direction du Patrimoine pour évaluer l'incidence d'une restauration sur l'identité sonore d'un l'instrument nous ont conduit à développer une méthode de test originale impliquant des organistes professionnels, des musiciens et des facteurs d'orgue, afin de compléter les mesures physiques habituellement employées. Les recherches que nous avons développées en **voix chantée** sont fondées sur une interaction permanente entre l'écoute des réalisations vocales exploitant la transition entre les deux mécanismes laryngés principaux (de la rupture recherchée dans le yodel tyrolien et le tahrir iranien à l'égalisation de timbre et de hauteur travaillée par les chanteurs d'Opéra lyrique) et la caractérisation objective de ces réalisations par différentes techniques d'exploration : EGG, phonétogrammes, analyses spectrales. Enfin il est un domaine, celui de la sensation de **hauteur**, pour lequel j'avais une sensibilisation toute personnelle<sup>6</sup>, qui m'a conduite à m'intéresser successivement à la «note» des cloches, aux sons multiphoniques, aux ambiguïtés perceptives du vibrato et du trille vocal, ainsi qu'à la fameuse «quintina» des chanteurs de Sardaigne.

Il fallait pouvoir intégrer toutes ces recherches apparemment disjointes, dans une vision globale de la perception sonore humaine.

Dès 1986, lors de la rédaction d'un chapitre d'ouvrage sur les techniques du son, j'avais proposé de discriminer, dans l'analyse acoustique du «timbre», ce qui d'une part permet de reconnaître l'instrument producteur du son, et ce qui d'autre part constitue les caractéristiques de qualité sonore proprement dite. Cette distinction était absente des re-

---

6. ayant l'oreille dite «absolue». Ce terme, quelque peu abusif, désigne l'aptitude (développée dans la petite enfance) à entendre les «noms des notes» de façon quasi-réflexe.

cherches de psychoacoustique car les expérimentateurs utilisaient pour leurs tests des sons de laboratoire, sans véritable identité instrumentale.

Le développement de ces idées a pu s'effectuer grâce à Danièle Dubois, psycholinguiste, contactée à l'occasion de la thèse que j'avais proposée en 1993 à F. Guyot : *Etude de la perception sonore en termes de reconnaissance et d'appréciation qualitative : une approche par la catégorisation*. Une collaboration s'est établie qui nous a permis de développer de nouvelles recherches sur la perception sonore. En particulier, l'étude de la perception des bruits environnementaux a mis en évidence l'incidence du *sens* que les signaux sonores représentent pour les auditeurs, sur les jugements de confort ou d'inconfort qu'ils formulent. Ceci permet de comprendre qu'à niveau sonore égal, certains sons puissent être beaucoup plus gênants que d'autres. Depuis 2003 Danièle Dubois et ses collaborateurs ont rejoint l'équipe du LAM. Cette chance exceptionnelle nous permet à présent de pratiquer au quotidien une pluridisciplinarité qui s'approfondit de jour en jour.

#### 4.2. De la psychoacoustique à la sémacoustique : Bottum-up et top-down

La psychoacoustique concentre la majorité des recherches sur la perception des sons. Dans cette discipline le sujet percevant est un récepteur qu'il s'agit de caractériser de la façon la plus rigoureuse possible afin d'établir des relations entre les variations des paramètres du signal physique et les réponses de ce récepteur. Le schéma général de l'exploration, de type ascendant, **bottom-up**, pose que le signal chemine depuis l'entrée de l'oreille jusqu'aux centres supérieurs où il sera interprété. Pour espérer obtenir des résultats mesurables, définir des unités perceptives (sonie, tonie, rugosité, brightness), il faut que les stimuli soient des sons parfaitement contrôlables, ce qui exclut d'emblée les sons réels musicaux qui ont pour caractéristique principale d'être toujours variables dans le temps et de comporter une part importante d'imprévisibilité. Les psychoacousticiens s'efforcent ainsi d'établir des liens entre les signaux sonores et leur traitement neurophysiologique, à toutes les étapes de leur progression et de leurs transformations. Les sciences cognitives, qui intègrent le traitement par les hémisphères cérébraux s'inscrivent dans le même schéma.

Lorsque l'objet de la recherche concerne la perception des sons de la musique, les bruits de l'environnement, et les évaluations qu'en donnent les auditeurs, il importe en priorité de travailler avec les sons réels et d'effectuer des tests dans une situation de réception la plus proche possible de la réalité vécue, une situation dite «*écologiquement valide*». Notre point de départ est le sujet, ou plutôt un groupe de sujets car la diversité des réactions nous importe. Il s'agit donc d'une démarche descendante, **top-down**, qui intègre dès le départ la complexité des données individuelles mémorisées au cours des expériences antérieures, et qui nous conduit à rechercher ensuite dans le signal acoustique les éléments, les indices qui font sens pour les auditeurs, d'où le terme de «*sémacoustique*».

L'organigramme général de la méthode et des étapes du déroulement des tests est présenté dans le chapitre 07. Ces tests font une large place à la catégorisation libre qui ne fait pas d'hypothèse initiale sur les traitements perceptifs. Dans un second temps, la verbalisation des sujets, recueillie dans son intégralité et analysée à l'aide de méthodes décortiquant les modalités d'expression en langue, nous permet d'accéder aux différentes relations s'opérant entre le sujet et les stimuli sonores. Cette méthode permet, en préservant la complexité perceptive, d'interpréter les relations sujet-son dans des situations perceptives complexes où les seules mesures acoustiques échouent : comme la gêne aux bruits faibles, les jugements de qualité sonore de voix, d'instruments de musique, certains aspects de la sensation de «confort».

**Conséquences empiriques et applicatives**

*partir des*

- descriptions **langagières** et matérialités symboliques = des données objectives (rendues publiques) des représentations (psychologiques)  
*pour dans un second temps*
- identifier des corrélats décrits par les **sciences physiques**  
*afin, dans un troisième temps de*
- pouvoir intervenir et contrôler certains des paramètres (physiques) de la situation.

**=> pluridisciplinarité Sciences humaines - Sciences physiques**

CFA Dubois Castellengo Tours 2006 35

Une synthèse de notre position a été présentée au congrès de la SFA en 2006. La figure ci-jointe en est extraite.

Cg: 20. - 2006 - Dubois D., Castellengo M., Du signal acoustique aux significations. Psycho-acoustique et recherches cognitives. C.R. du Congrès de la SFA, Tours.

### 4.3. Sémantique des objets sonores

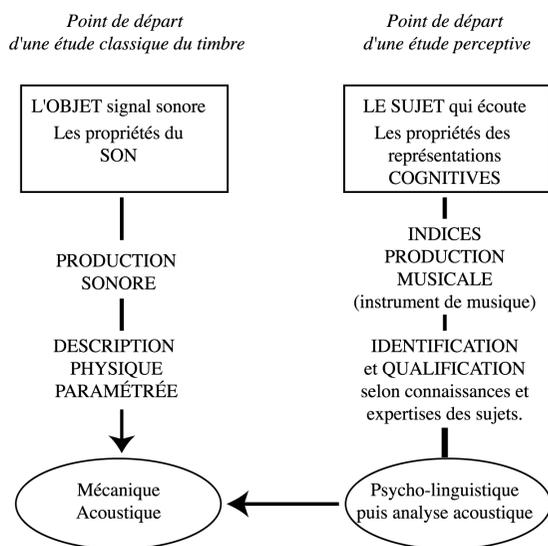
*Avec Danièle Dubois*

#### 4.3.1. Projet STIC : 2003-2005

Ce programme de recherches, coordonné par D. Dubois, soutenu par le département STIC du CNRS a rassemblé 10 participants : J.D. Polack et M. Castellengo (LAM); M. Davy et G. Hégron (FR2488, Physique et images de la

ville); F. Poisson et M. Mzali (SNCF, Service de la recherche); M.A. Morel (1483, Univ.P3); A. Rialland (UMR 7018, Univ. P3); G. Sabah (LIMSI-CNRS). L'intitulé : *Sémantique et Objets Sonores (S.O.S), Paroles, musiques et bruits* a permis aux participants de mettre en commun leur expérience du traitement sémantique par les auditeurs, «d'objets sonores» aussi différents que la voix, le langage sifflé, les sons musicaux, l'ambiance sonore des gares. J'ai pu au cours des réunions de travail, présenter différentes expériences d'écoute sur le renversement temporel de sons puisés dans l'environnement et de signaux musicaux, expériences qui ont confirmé la primauté du processus d'identification de la source sonore sur celui de sa qualification. La diversité des approches et la richesse des discussions ont joué un rôle important dans la maturation de la collaboration que je souhaitais développer avec Danièle Dubois et nous avons pu rédiger deux textes en commun. L'un sur le double aspect de la perception du «timbre», l'autre sur l'incidence des aspects sémantiques du son dans la perception de la musique.

#### 4.4. Etude du timbre

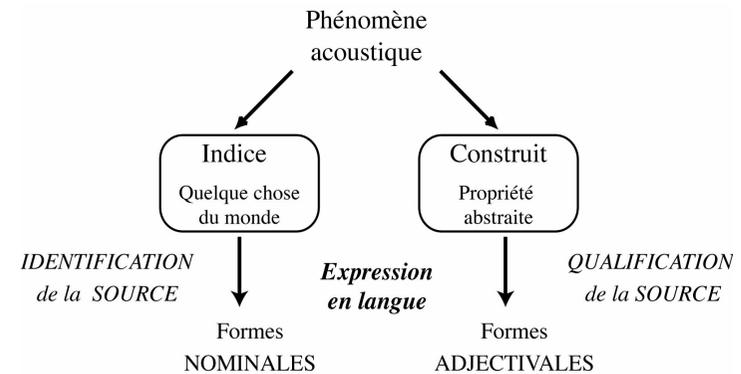


**Figure 14** - - Schéma comparatif des deux paradigmes d'étude de la notion de timbre.

Dans le cadre général de pensée exposé plus haut en collaboration avec Danièle Dubois, j'ai repris l'étude de la notion de «timbre» en musique. La tradition psychophysique «bottom-up» pose implicitement que les caractéristiques du timbre sont tout entières contenues dans le signal, et qu'il s'agit de les identifier au cours d'expériences croisant les analyses acoustiques et des tests d'évaluation par des sujets. Notre approche «top-down» postule que le timbre est une notion construite par le sujet, certes sur la base acoustique des sons perçus, mais dépendant de l'expérience d'écoute des sujets et plus particulièrement de leurs motivations. La construction de cette notion implique la prise en compte des deux comportements d'écoute que nous avons déjà mentionnés : **l'identification de la source sonore**, comportement auditif humain le plus fondamental (qu'est-ce que c'est? qu'est-ce qui a produit ce son?) et en second lieu, **la qualification des sons** entendus au moment de l'expérience d'écoute par comparaison aux sons de même origine entendus antérieurement (comment ça sonne? quel effet celà me fait?).

A l'aide d'une expérience d'écoute très simple, le renversement temporel d'une séquence musicale, nous avons pu confirmer que l'identification de l'instrument jouant la musique était la préoccupation première des auditeurs.

L'analyse linguistique des verbalisations des sujets a permis ensuite d'accéder aux représentations cognitives de trois groupes différents de sujets. Destabilisés par l'incapacité d'identifier l'instrument, les musiciens professionnels les plus chevronnés se sont attachés à décrire la structure de la musique, les étudiants en acoustique à analyser les «bidouillages» opérés sur le signal sonore; les étudiants d'écoles d'ingénieur à décrire les effets et les émotions ressenties à l'écoute de cette étrange séquence sonore. Nous avons proposé d'adopter deux termes pour différencier ces deux constructions cognitives du timbre : le timbre «causal» qui renvoie à la source sonore, et la «couleur sonore» construite comme une dimension abstraite des sources, comme le sont les catégories de couleurs.



**Figure 15** - - Relations entre les verbalisations et les deux modalités de perception du son : identification ou qualification de la source.

La communication présentée au congrès CIM05 a été sélectionnée pour être publiée dans la revue de la Société Québécoise de Recherche en Musicologie

Cg: 17. - 2005 - Castellengo M., Dubois D. - Timbre ou Timbres ? Propriété du signal, de l'instrument, ou construction cognitive ? C.R. 2ème Conférence Interdisciplinaire de Musicologie(CIM05), Montréal.

P6. - 2007 - Castellengo M., Dubois D.,- Timbre ou timbres ? Propriété du signal, de l'instrument, ou construction(s) cognitive(s)? Journal de la Société Québécoise de Recherches Musicales, 9 (1-2), 25-38.

#### 4.5. Timbres et musiques.

Dans le même ordre d'idées nous avons abordé l'étude des difficultés de réception des musiques créées avec un matériau sonore nouveau, différent des instruments habituels de l'orchestre. L'introduction de «bruits» dans la composition musicale, qu'il s'agisse des bruiteurs futuristes (1913) ou des sons naturels enregistrés (P. Schaeffer, 1948) a provoqué initialement le scandale, principalement en raison de l'écoute indiciaria, causale, événementielle à laquelle

les auditeurs étaient renvoyés malgré eux. Lorsque les compositeurs ont pu travailler le matériau sonore pour lui faire perdre son identité causale (indice d'un objet du monde), la nécessité est apparue de réinscrire la nouvelle collection de sons dans une grille de référence, d'inventer un nouveau solfège. L'étude du développement des courants musicaux du 20<sup>ème</sup> siècle et de leur réception par les auditeurs montre bien que l'écoute musicale, qui est essentiellement de nature qualitative, ne peut pleinement se développer que dans un cadre catégoriel sonore défini et partagé par les auditeurs. Un article de 24 pages a été soumis à la revue *Intellectica*.

2007 - Castellengo M., Dubois D., - Sémantique des objets sonores : timbres et musiques. Soumis à *Intellectica*.

#### 4.6. Qualité des instruments de musique

*Collaboration Danièle Dubois, Charles Besnainou, Maeva Garnier, Cosmin Gherghinoiu*

Le questionnement des facteurs d'instruments de musique est récurrent : **quelle méthode adopter pour qualifier de manière objective la qualité des instruments de musique afin d'améliorer leur production ?**

Les défauts dus à des imperfections de construction sont en général assez aisément identifiables. Pour un fabricant de haut niveau, le problème est celui des aspects «subjectifs» de la qualité sonore, ceux qui font la différence entre un très bon instrument et un instrument exceptionnel. De la même façon que pour le timbre, c'est en partant des auditeurs que la question peut être abordée. Nous avons appliqué cette méthode à l'étude de la qualité de la voix chantée et à celle du piano. Dans les deux cas plusieurs groupes de sujets se sont exprimés : des musiciens (chanteurs, pianistes), des auditeurs amateurs et des experts (professeurs de chant et facteurs de piano). L'analyse des discours a permis de mettre en évidence à la fois la pertinence des avis exprimés et les difficultés de communication entre musiciens et facteurs dues à la polysémie des termes employés. Par exemple un adjectif comme «clair» peut, selon le contexte grammatical, exprimer des évaluations de sens opposé (désagréable lorsque clair=sec, ou au contraire agréable lorsque clair=lumineux.)<sup>7</sup>. Les analyses mettent aussi en évidence les différentes motivations d'écoute des auditeurs. Par exemple, en voix chantée, les auditeurs qui écoutent et commentent la qualité vocale, se réfèrent généralement à quatre catégories : l'interprétation, la technique et la physiologie vocale, l'hédonisme et les qualités intrinsèques du signal sonore. Voir figure 13 plus haut.

---

7. Dans nombre d'études dites «linguistiques» les auteurs s'en tiennent à des échelles sémantiques opposant deux termes, comme par exemple clair et sombre, ce qui suppose implicitement que les mots auraient un sens univoque!

En résumé, l'appréciation de qualité sonore inclut non seulement les paramètres du signal sonore, mais aussi la relation du musicien à l'instrument à travers toutes les modalités sensorielles, et en particulier son ressenti personnel proprioceptif. Nous avons présenté nos recherches au cours de rencontres professionnelles organisées par l'ITEMM<sup>8</sup> et le Conservatoire National Supérieur de Musique de Paris,

Au: 32. - 2005 - Castellengo M., Dubois D., Du témoignage des musiciens à l'analyse sémantique, comment qualifier la qualité des instruments de musique ? Invitation pour exposé et table ronde, Colloque sur la qualité des instruments de musique organisé par l'ITEMM au CNSM de Paris.

et au congrès de l'association européenne d'acoustique:

Cg: 19. - 2005 - Gherghinoiu C., Besnainou Ch., Castellengo M. ; Comparative study made on timbre perception, EAA Forum Acusticum Conference, Budapest.

---

8. Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique. site , <http://www.itemm.fr/site2/index.php>

## **5. Publications 2002-2007 et activités diverses**

### **5.1. Introduction**

Durant cette période d'éméritat je me suis efforcée de valoriser certains travaux antérieurs en publiant dans des revues internationales, JASA, Journal of Voice, et Logopedics, Phoniatics, Vocology, ce que mes responsabilités antérieures ne m'ont pas permis de faire pendant les dix dernières années. Le texte initialement rédigé en Français pour assurer une expression la plus complète possible de la pensée est ensuite traduit en Anglais. On dispose ainsi de deux versions pour une publication en ligne.

Je suis toujours très sollicitée pour des donner des conférences car les sujets que je développe sont attrayants et intéressent les musiciens (instrumentistes, chanteurs etc). Bien que ce soit pour moi un travail toujours conséquent car je renouvelle sans cesse mes présentations, il s'avère que de telles sollicitations sont extrêmement stimulantes. Elles obligent à présenter de façon synthétique et claire des recherches quelquefois très subtiles. C'est aussi l'occasion d'effectuer des comparaisons transversales entre différents thèmes souvent étanches, et de de faire émerger de nouvelles idées.

On notera l'importance les publications et des conférences sur la voix chantée. Avec Nathalie Henrich avec qui la collaboration se poursuit, avec Bernard Roubeau, les chanteurs Robert Expert, Bertrand Chuberre, Charles Barbier, Salomé Haller, et maintenant avec le nouveau doctorant Sylvain Lamesch, les sujets se multiplient d'autant plus agréablement que je peux faire des recoupements fructueux entre diverses approches (glottographie, spectrographie, perception complexe soit formantique, soit timbrale, étude de la fréquence fondamentale). J'ai encore de nombreux projets en perspective, particulièrement avec des ethnomusicologues comme Suzanne Fürniss (CNRS-LMS) pour les polyphonies vocales AKA et Jean During (CNRS-Musée de l'Homme) pour les techniques vocales Iraniennes.

## 5.2. Publications : 2002-2007

*P* pour Publications dans revues à referee

*O* pour Contributions à ouvrages

*Cg* pour Congrès avec actes (dont invitations)

*Au* pour Autres activités : Conférences pluridisciplinaires, séminaires, Manifestations publiques

### 5.2.1. Publications dans revues à referee

- P1. 2003 - Henrich N., Sundin G., Ambroise D., d'Alessandro Ch., Castellengo M., Doval B.- Just noticeable differences of Open Quotient and Asymmetry Coefficient in Singing Voice. *Journal of Voice*, **17** (4), p. 481-494
- P2. 2004 - Henrich N., d'Alessandro C., Castellengo M., Doval B. - On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of non-pathological voice phonation. *J.A.S.A.*, **115** (3), 1321-1332.
- P3. 2004 - Roubeau B., Castellengo M., Bodin P., Ragot M.- Phonétogramme par registre laryngé, *Folia Phoniatrica*, **56**, p.321-333
- P4. 2005 - Castellengo M. - Manuel Garcia jr, a clear-sighted observer of human voice production. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, **30**, p.163-170
- P5. 2005 - Henrich N., Castellengo M., d'Alessandro C., Doval B., - Glottal open quotient in singing : Measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency. *J.A.S.A.*, **117** (3) ; p.1417-1430
- P6. 2007 - Castellengo M., Dubois D.,- Timbre ou timbres ? Propriété du signal, de l'instrument, ou construction(s) cognitive(s)? *Journal de la Société Québécoise de Recherches Musicales*, 9 (1-2), 25-38.
- P7. 2007 - Gaillard P., Castellengo M., Dubois D. ; Variabilité temporelle et perception des transitoires d'attaque. *Journal de la Société Québécoise de Recherches Musicales*, 9 (1-2), 39-48..

### 5.2.2. Contributions à ouvrages

Ouv: 8. 2003 - Castellengo M.- Acoustique musicale, in Dictionnaire de la musique du XIX<sup>e</sup> siècle, Ed Fayard, Paris

### 5.2.3. Congrès avec actes

- Cg: 9. 2002 - Castellengo M., The human voice and its registers : the value of interdisciplinary collaboration. Conférence invitée , *Ist International Conference on the Physiology and Acoustics of Singing (PAS)*, Groningen (Pays-Bas). [http://www.med.rug.nl/pas/Conf\\_contrib/Castellengo/Castellengo\\_bio\\_touch.htm](http://www.med.rug.nl/pas/Conf_contrib/Castellengo/Castellengo_bio_touch.htm)
- Cg: 10. 2003 - Henrich N., Roubeau B., Castellengo M. - On the use of electroglottography for characterisation of the laryngeal mechanisms. *SMAC03*, Stockholm.
- Cg: 11. 2004 - Castellengo M., - Flute-like instrument transients : An analytical study of mouth-tone production versus pressure rise time, Conférence invitée; *Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics*, Nara, Japan
- Cg: 12. 2004 - Castellengo M., Chuberre., Henrich N., - Is Voix Mixte, the Vocal Technique Use to Smooth the Transition across the two Main Laryngeal Mechanism, en Independent Mechanism ?; *Proc. of the International Symposium on Musical Acoustics*, Nara, Japan
- Cg: 13. 2004 - Garnier M., Dubois D., Poitevineau J., Henrich N., Castellengo M. ; Perception et description verbale de la qualité vocale dans le chant lyrique. *Journées d'Etudes sur la Parole*, Fez.
- Cg: 14. 2004 - Polack JD, Castellengo M, Maffiolo V., Vogel C., Guastavino C., Katz B ., Soundfield reproduction : the limits of the physical approach, *Joint congress CFA/DAGA*, Strasbourg,
- Cg: 15. 2004 - Castellengo M. ; Problématique de l'étude de la qualité sonore des instruments de musique. Conférence invitée donnée au COST du Pôle national d'innovation des métiers de la musique; *Musique et technique*, N° 0, p 25-30
- Cg: 16. 2004 - Garnier, M., Dubois D., Poitevineau J., Henrich N., Castellengo M. Description verbale et acoustique de la qualité vocale dans le chant lyrique. *ICVPB (International Conference on Voice Physiology and Biomechanics)*, Marseille
- Cg: 17. 2005 - Castellengo M., Dubois D. - Timbre ou Timbres ? Propriété du signal, de l'instrument, ou construction cognitive ? C.R. *2ème Conférence Interdisciplinaire de Musicologie (CIM05)*, Montréal.

- Cg: 18. 2005 - Gaillard P., Castellengo M., Dubois D., - L'apport de la catégorisation à l'étude du transitoire d'attaque du steeldrum ; contribution à la définition du timbre causal. *C.R. 2ème Conférence Interdisciplinaire de Musicologie (CIM05)*, Montréal.
- Cg: 19. 2005 - Gherghinoiu C., Besnainou Ch., Castellengo M. ; Comparative study made on timbre perception, *EAA Forum Acusticum Conference*, Budapest.
- Cg: 20. 2006 - Dubois D., Castellengo M., Du signal acoustique aux significations. Psycho-acoustique et recherches cognitives. *C.R. du Congrès de la SFA*, Tours.
- Cg: 21. 2006 - Henrich N., Lortat-Jacob B., Castellengo M., Bailly L., Pelorson X. ; Period-doubling occurrences in singing : the « bassu » case in traditional Sardinian « ATenore » singing. *International Conference on Voice Physiology and Biomechanics*, Tokyo.
- Cg: 22. 2007 - Castellengo M., Lamesch S., Henrich N. ; Vocal registers and laryngeal mechanisms, a case study : the french « voix mixte ». *Conférence invitée, 19th I.C.A.*, Madrid
- Cg: 23. 2007 - Lamesch S., Expert R., Castellengo M., Henrich N. ; Investigating « voix mixte » : a scientific challenge towards a renewed vocal pedagogy. *3èmes Conférence Interdisciplinaire de Musicologie*, CIM07, Tallin

#### *5.2.4. Conférences pluridisciplinaires, séminaires, manifestations publiques.*

- Au: 24. 2002 - Castellengo M, Besnainou Ch., Musique et acoustique. Conférence pilote (*invitée*) pour le lancement de l'Espace des Sciences de l'ESPCI, Paris.
- Au: 25. 2003 - Castellengo M , Henrich N., Roubeau B., Production et perception de la voix chantée : les recherches du Laboratoire d'Acoustique Musicale ; *conférence invitée* au *Congrès de la Société Française de Phoniatry* ; Toulouse, 2003
- Au: 26. 2003 - Castellengo M., Heinrich N., Chuberre B., - La voix mixte. Conférence à l'*AFPC* (association Française des Professeurs de Chant), Paris,
- Au: 27. 2003 - Castellengo M., - Caractéristiques acoustiques du vibrato vocal, *journée d'étude Société Française d'Acoustique*, Le Mans

- Au: 28. 2003 - Castellengo M., Henrich N., Roubeau B., - De bouche à oreille : des mécanismes laryngés à l'art vocal. *Conférence générale à l'Université Pierre et Marie Curie.*
- Au: 29. 2004 - Castellengo M., Henrich N., - Vibration et Perception : l'Alchimie de la voix chantée; *Conférence invitée à l'Espace des Sciences de l'ESPCI.*, Paris.
- Au: 30. 2004 - Castellengo M., Catégorisation acoustique des sources sonores : écoute causale et écoute qualitative ; et conférence ouverte au public sur la voix chantée ; *Ecole « Science et Musique »*, Cargèse.
- Au: 31. 2005 - Castellengo M., Des sons à la musique ; *journée SFA : Indexation automatique et perception.* Télécom-Paris.
- Au: 32. 2005 - Castellengo M., Dubois D., Du témoignage des musiciens à l'analyse sémantique, comment qualifier la qualité des instruments de musique ? Invitation pour exposé et table ronde, *Colloque sur la qualité des instruments de musique* organisé par l'ITEMM au CNSM de Paris.
- Au: 33. 2005 - Réalisation d'un diaporama sur nos études acoustiques relatives à la restauration des orgues classés Monuments Historiques, pour le stand de l'UPMC au *Salon du Patrimoine*, Paris.
- Au: 34. 2005 - It's been more than a century and a half since Garcia did his first studies on the production of the sung voice ; today's recent research confirms his ingenious views. *The world year of physics*, *Conférence invitée*, Ambassade de France, Washington D.C.
- Au: 35. 2005 - Participation aux tests de perception et commentaires des résultats pour le film « le mystère de Stradivarius », diffusé sur ARTE.
- Au: 36. 2006 - Un pionnier de la recherche en voix chantée : Manuel Garcia junior, *Conférence invitée* au *Congrès annuel de la Société Française de Phoniatrie*, Paris.
- Au: 37. 2006 - De la perception aux modèles physiques, Séminaire au LMM (*fête de la Science*). Paris.
- Au: 38. 2007 - Le timbre des instruments de musique, et Les « couleurs » des voix . Deux *Conférences publiques* à *Radio-France*, Semaine du Son, Paris
- Au: 39. 2007 - Castellengo M., During J., The iranian tahrir : acoustical analysis of an ornamental vocal technique. *3èmes Conférence Interdisciplinaire de Musicologie*, C.I.M., Tallin

### 5.3. Autres activités

#### 5.3.1. Participation à l'enseignement

**Ecole des Mines** : depuis Novembre 2002 ; Semaine européenne « Science, Musique, Histoire ». MP12 du parcours Athens. Deux demi-journées sur l'acoustique musicale et plus particulièrement la perception sonore.

**Atiam Master 2 UPMC** (15 h), enseignement de perception sonore s'articulant en particulier avec la rédaction d'un ouvrage.

**CNSM**, Classe d'acoustique musicale : temps complet jusqu'en septembre 2003. Depuis, interventions ponctuelles dans la classe de Ch Besnainou (cours sur la perception, sur l'acoustique de la flûte et de l'orgue), environ 23h/an

**Ethnomusicologie**. Dans le cadre d'un partenariat recherché avec le laboratoire d'Ethnomusicologie (UMR 8574) trois séminaires-cours sur les fondements de la perception sonore et sur les méthodes d'analyse acoustique applicables en ethnomusicologie ont été donnés. 2004-2005

#### 5.3.2. Encadrement de stages de DEA, mastères.

- 2003 - Garnier Maeva - Approche de la qualité vocale dans le chant lyrique: perception, verbalisation et corrélats acoustiques. DEA-Atiam
- 2004 - Sotiroupolos David - Analyse Acoustique et Catégorisation d'un Ensemble de Qualités Vocales Pertinent pour la Description de Voix Lyriques Masculines. DEA-Atiam
- 2006 - Lamesch Sylvain - Analyse Acoustique et Catégorisation d'un Ensemble de Qualités Vocales Pertinent pour la Description de Voix Lyriques Masculines. Mastère 2

#### 5.3.3. Mémoires de la classe d'Acoustique du Conservatoire National Supérieur de Musique de Paris.

La formation en acoustique musicale du Conservatoire National Supérieur de Musique de Paris est destinée à des musiciens de haut niveau : interprètes, compositeurs, chefs d'orchestre, musicologues. Créée en 1989 la classe s'est rapidement développée. Entre 2002 et 2003, sept mémoires ont été soutenus. Quatre d'entre eux s'inscrivent dans le nouveau cycle d'études intitulé Diplôme de Formation Supérieure en Acoustique musicale (DFS).

- 2002 - NAVINER Jean -Yves - L'entretien du son sur les instruments à percussion.
- 2002 - RATSIMANDRESY Nadia - Etude de la perception des timbres et de la sonorité de l'Onde Martenot
- 2002 - PRINCIPAUD Nicolas - Etude de la dynamique de jeu au piano : précision et reproductibilité
- 2002 - TRELCAAT Anne - Le luthéal .
- 2003 - EXPERT Robert - Les Voix d'Alto
- 2003 - GUEANT Gregory - Le voyage acoustique à Bayreuth
- 2003 - WEISSER Stéphanie - Etude acoustique des sons de la Bagana, lyre d'Ethiopie

