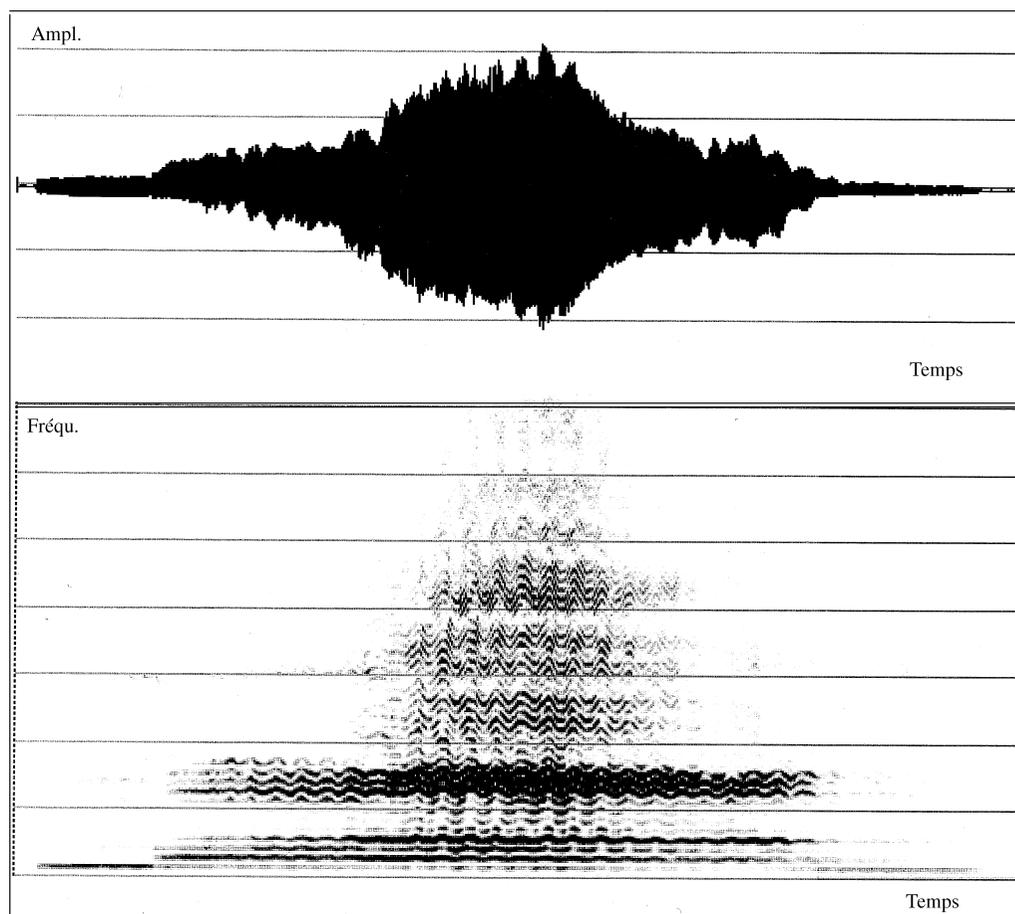


## 5 - LA VOIX HUMAINE : LES MECANISMES, LES VARIATIONS DE LA QUALITE VOCALE (1968-2001)



**Figure 5.1** -- Analyse acoustique d'un « son filé » chanté par un ténor (R. Miller). Transition entre deux registres résonantiels, « mixed voice et head voice ». En haut, courbe d'amplitude ; En bas, analyse spectrale. La limite supérieure de l'analyse est de 14 kHz.

## 1. Introduction

La voix humaine tient une place particulière dans la recherche acoustique.

Tout d'abord il s'agit d'un instrument de musique "vivant", faisant partie intégrante du corps humain, dont l'observation en cours de production sonore reste, aujourd'hui encore, difficile d'accès.

Ensuite, les signaux produits par la voix humaine sont dotés d'une très forte prégnance cognitive, et forment une catégorie perceptive qui se structure très tôt dans la mémoire auditive. S'inscrivant implicitement dans un schéma de communication impliquant au moins deux partenaires, ils activent alternativement deux attitudes d'écoute. La première est **l'écoute sémantique**, en quête de sens : identité du locuteur, signification des paroles prononcées, éventuellement signes sémantiques prosodiques; la deuxième est **l'écoute qualitative**, celle des variations esthétiques des paramètres sonores, mise en oeuvre lors de la production chantée.

Ces différents aspects de la voix m'ont préoccupée. Jusqu'en 1974, dans le cadre de la synthèse à l'icophoe, l'attention s'est mobilisée sur l'étude des caractéristiques acoustiques porteuses de l'intelligibilité de la voix parlée. Dans les années qui suivirent, c'est la variété des autres productions vocales parlées et chantées qui ont fait l'objet de mes recherches, certaines exploratoires, d'autres très approfondies.

De nombreux contacts ont été établis avec de médecins, des rééducateurs, des professeurs de voix et des artistes interprètes.

## 2. Intelligibilité de la parole dans le chant et portée de la voix des chanteurs.

### Son 38

Intelligibilité de la parole dans le chant. Une phrase chantée dans l'aigu (Ré5 =1170 Hz) est difficilement compréhensible. La même phrase est répétée sur le La4 (880 Hz) puis le Ré4 (585 Hz). Mme Ponthieu; LAM, 1969.

En tant que collaboratrice d'E. Leipp, j'ai contribué à enregistrer de nombreux chanteurs professionnels, soit au laboratoire soit au cours de représentations à l'opéra de Rouen ou de Paris. Deux points ont fait l'objet d'études systématiques.

Tout d'abord l'intelligibilité de la voix chantée, dont l'investigation faisait suite à nos études de parole. L'incidence de la tessiture, particulièrement critique pour la voix de femme, ainsi que les modifications vocaliques consécutives aux adaptations du conduit vocal à la production de sons aigus intenses ont été analysés. cf Ex **Son 38**.

Au: 35. - CASTELLENGO M., (1969), Intelligibilité de la parole dans le chant, Conférences des Journées d'Etude, Festival International du son, Chiron éd. - Paris.

Dans le même temps nous avons mis en évidence le formant caractéristique des chanteurs lyriques, situé dans la zone des fréquences les plus sensibles de l'oreille : aux environs de 3000 Hz pour les hommes et 4000 Hz pour les

femmes. Cette technique particulière d'adaptation à la zone sensible de l'oreille n'était pas pour nous surprendre puisque nous l'avions observée dans le spectre des sources mécaniques traditionnelles efficaces, employées sans amplification<sup>15</sup>. Une constatation si évidente ne nous a pas incité à produire une publication particulière, d'autant que nous étions alors entièrement absorbés par la synthèse de la parole. Ayant présenté spécifiquement ce point lors de la conférence de 1969, j'en ai repris les analyses pour la réunion du GAM de 1973.

Bul: 15. - Particularités acoustiques de la voix des chanteurs professionnels, Bulletin GAM 67 - Paris 1973

### **3. Voix pathologiques, techniques particulières.**

*S. Borel-Maisonny, Tran Van Khé, Tran Quang Hai.*

Le milieu des médecins et des rééducateurs de la voix ne disposant à cette époque d'aucun moyen d'analyse pour objectiver les productions de leurs patients, nous avons été sollicités à de nombreuses reprises pour analyser des productions vocales difficiles à caractériser à l'oreille. Nous avons étudié la voix oesophagienne, les insuffisances vélaires, les paralysies récurrentielles, les voix post-opératoires (papillomatose, trans-sexuels).

Nous avons entretenu une collaboration régulière avec Mme Borel-Maisonny fondatrice de l'orthophonie avec qui deux films ont été réalisés; l'un ciné-radiographique<sup>16</sup> à l'hôpital St Vincent de Paul, et l'autre en technique vidéo à la clinique du Centre Médico-chirurgical de la Porte de Choisy.

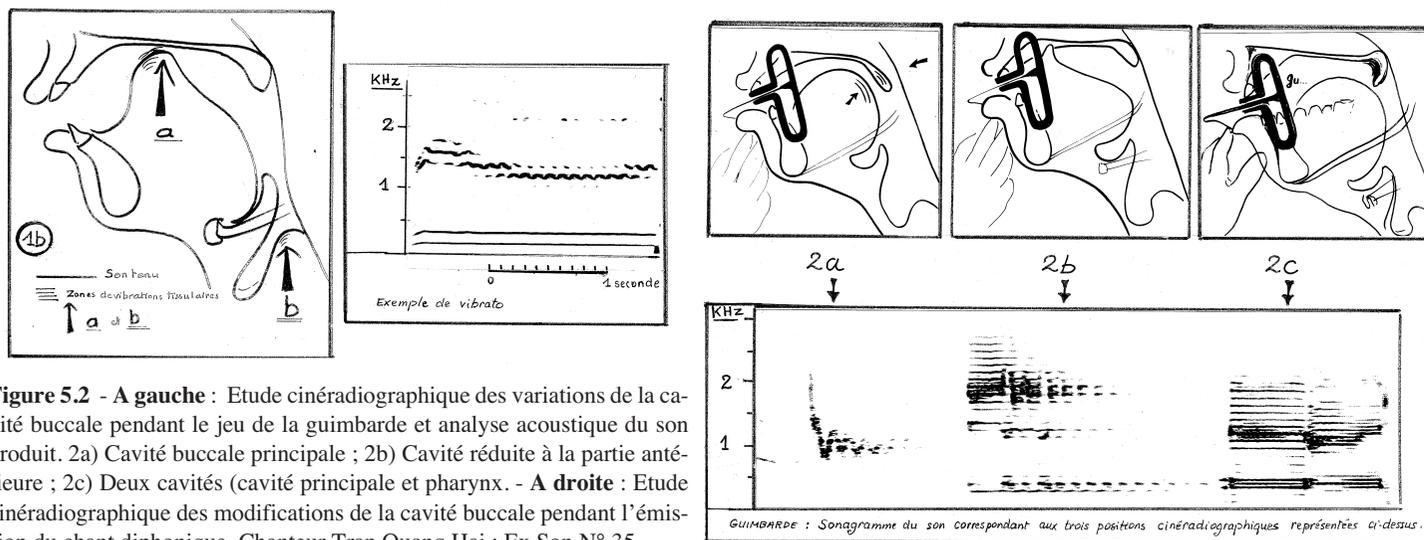
---

15. Citons entre autres le "formant" à 3000 Hz des vièles asiatiques, celui des phonographes mécaniques ou des récepteurs du téléphone.

16. Le premier film, argentique, s'accompagnait de l'enregistrement séparé du son sur un magnétophone. J'ai réalisé la délicate post-synchronisation sonore de ce document.

Son 39

Exemple de chant diphonique sur une note tenue, puis même exemple ralenti et transposé à l'octave inférieure. Tran Quang Hai, 1976. cf figure Figure 5.2 de radiographie. LAM



**Figure 5.2 - A gauche :** Etude cinéradiographique des variations de la cavité buccale pendant le jeu de la guimbarde et analyse acoustique du son produit. 2a) Cavité buccale principale ; 2b) Cavité réduite à la partie antérieure ; 2c) Deux cavités (cavité principale et pharynx). - **A droite :** Etude cinéradiographique des modifications de la cavité buccale pendant l'émission du chant diphonique. Chanteur Tran Quang Hai ; Ex Son N° 35.

Ces documents nous ont permis d'observer les mouvements des organes phonatoire pendant la production de deux techniques vocales très spécifiques : la voix de fausset masculine des acteurs du théâtre Viet Namien, et le **chant diphonique**. Figure 5.2 et Ex **Son 39**. Nous avons également pu identifier la contribution des résonateurs buccaux dans le jeu de quelques instruments : **guimbarde** (figure 5.2 à droite), flûte à bec (articulation des coups de langue) et clarinette. Nous avons incidemment découvert la participation du mouvement des cordes vocales pendant le jeu instrumental.

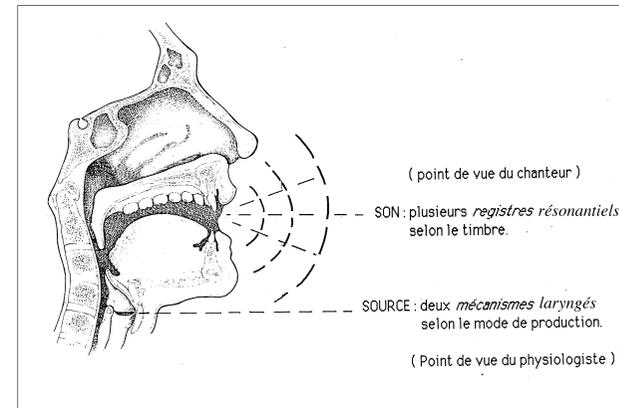
Bul: 18. - Etude radiographique des mouvements de l'appareil pharyngo-buccal pendant la parole et le jeu de quelques instruments (coll. S. BOREL-MAISONNY), Bulletin GAM 86 - Paris 1976

J'ai assuré l'encadrement de plusieurs mémoires d'orthophonie (voir tableau 1980-1982). Le dernier, celui de B. Roubeau a été le point de départ d'une étude complète des mécanismes vocaux

## 4. Etude des mécanismes de production de la voix humaine

*Collaboration : Bernard Roubeau.*

Avec le renouveau des "musiques anciennes" qui se développent dans les années 80, renaît la pratique de voix partiellement tombées en désuétude comme celles des contre-ténor et haute-contre. Ces voix posent clairement le problème de la gestion du "passage" entre mécanismes. Les professionnels de la voix avec lesquels nous sommes en contact nous fournissent les explications les plus contradictoires sur le type de production de ces chanteurs. Nous découvrirons par la suite que la confusion existe depuis au moins deux siècles, et qu'elle se poursuit aujourd'hui encore. Elle est due pour partie aux difficultés d'observation de l'appareil phonatoire, mais surtout aux divergences de point de vue entre les chanteurs qui se fient à leurs sensations proprioceptives et à leur oreille, les physiologistes qui limitent leur champ d'observation aux seuls mouvements du larynx, et les pédagogues qui affirment avec force l'existence d'un nombre variable de registres (1 à 5 selon les auteurs) sans autre preuve que la réussite de la technique vocale qu'ils défendent. Quand aux acousticiens spécialistes de la voix parlée, ils font à cette époque l'impasse totale de la notion de registre vocal, que ce soit dans les mesures ou dans les modèles.



**Figure 5.3** - Les deux points de vue de l'étude des registres vocaux. Au niveau de la source, 2 mécanismes laryngés principaux; au niveau de la qualité sonore, de 3 à 5 registres résonnants selon le sexe et selon la technique vocale.

### 4.1. Les quatre mécanismes vibratoires de la voix humaine.

Nous avons défini une méthode d'étude objective associant l'analyse acoustique de productions vocales bien définies (glissandos sur toute la tessiture; changement de mécanisme dans la zone commune) à l'enregistrement simultané du signal Electrolottographique (EGG).

Son 40

Glissando ascendant partant du mécanisme 0 (fry), et faisant entendre les mécanismes 1,2 et 3 (sifflet). MC 1982.

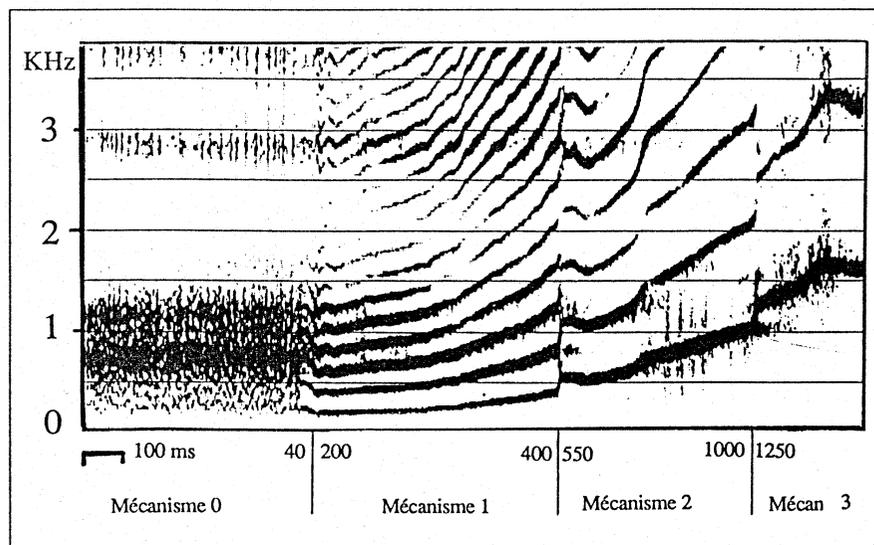


Figure 5.4 - Analyse acoustique d'un glissando vocal, depuis le son le plus grave jusqu'au son le plus aigu. Voix féminine. Le changement de mécanisme est marqué par une discontinuité de fréquence. Ex *Son 40*

Nos premiers résultats sont:

- - Description des quatre mécanismes fondamentaux, identifiables au niveau laryngé, communs à l'homme, la femme et l'enfant.
- - Les mécanismes sont repérés par une numérotation non ambiguë distincte des termes employés par les praticiens (chanteurs, phoniâtres, historiens et pédagogues).
- - Etude de l'étendue de chaque mécanisme et des zones de recouvrement en fréquence : établissement de pho-

17. dont nous avons déjà eu connaissance lors de l'étude de la voix de théâtre Viet Namien, avec Tran Van Khé et Mme Borel-Maisonny.

18. mis au point en France et développé aux Pays Bas, est absent des travaux de recherches américains de cette époque.

Ce domaine de recherche se révèle être d'une grande richesse. La majeure partie des recherches établies portent sur la voix masculine et le chant classique. L'étude des haute contre révèle les qualités de la voix dite de "fausset"<sup>17</sup> registre aussi riche en possibilités que le registre dit de poitrine, ...pour peu qu'il soit travaillé. L'étude parallèle de la voix de femme montre rapidement que les mécanismes fondamentaux sont communs aux deux sexes, malgré un vocabulaire différencié et des descriptions très divergentes.

L'EKG<sup>18</sup> donne une information objective et fiable du changement de mécanisme en émission continue, surtout lorsque celui-ci est habilement masqué par le chanteur, et donc indiscernable à l'oreille. Nous explorons un grand nombre de voix différentes, professionnelles ou non.

nétogrammes.

- - Etude systématique des caractéristiques acoustiques de la transition entre mécanismes. Ex *Son 41*.
- - Proposition d'un vocabulaire permettant la distinction entre les niveaux d'observation du fonctionnement laryngé ou de la qualité acoustique de la voix. Registres laryngés et registres résonantiels. Cette terminologie permet d'inclure tous les points de vue, et de généraliser l'étude quelque soit le sexe ou la technique vocale.

Une première synthèse des recherches est présentée au cours d'une réunion du GAM (1983) et au SMAC

Cg: 38. - CASTELLENGO M., ROUBEAU B., VALETTE C., (1985) Study of the acoustical phenomena characteristic of the transition between chest voice and falsetto, Stockholm Music Acoustic Conferences, Stockholm.

### Son 41

Changement de mécanisme sur une note tenue. Successivement, voix féminine sur Sol3, voyelles I et O; Voix masculine sur Ré3, voyelles I et O. MC et B. Roubeau, 1982

## 4.2. La transition des deux premiers mécanismes dans les musiques du monde.

La transition entre deux mécanismes, au cours de laquelle se modifient les propriétés mécaniques des différentes couches tissulaires constituant la corde vocale, se traduit par différentes pertes de contrôle des paramètres vocaux : saut de fréquence, modification du spectre, changements dans le vibrato, variations d'intensité. Ces manifestations sont plus ou moins perceptibles selon les individus, mais dépendent surtout de la technique vocale, laquelle est complètement dépendante de la culture esthétique du chanteur.

Nous avons montré abondamment que les manifestations acoustiques dépendant de la transition entre les deux principaux mécanismes laryngés, qui se produit en général entre 200 et 400 Hz, sont gérées de façon complètement différentes selon les contextes culturels et les époques. On peut classer les phénomènes en 4 catégories.

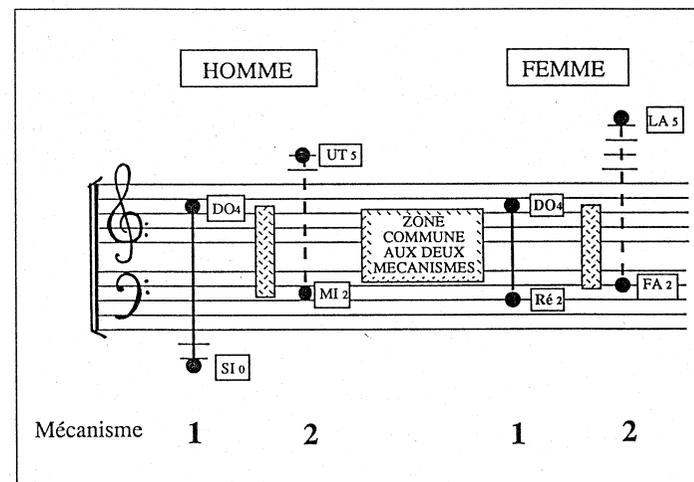


Figure 5.5 - Etendue, chez l'homme et chez la femme, des deux principaux mécanismes de la voix humaine, largement utilisés dans le chant occidental. Zone commune aux deux mécanismes, à l'intérieur de laquelle différentes techniques de transition peuvent être développées.

Son 42

Chant yodelé, homme. Noter le changement de voyelle qui se produit à chaque changement de mécanisme. Disque "Musiques Africaines". Musique de tous les temps, N° 44/45 (Mett PEP 6890/6891) Pygmées Babenzélé de République Centrafricaine.

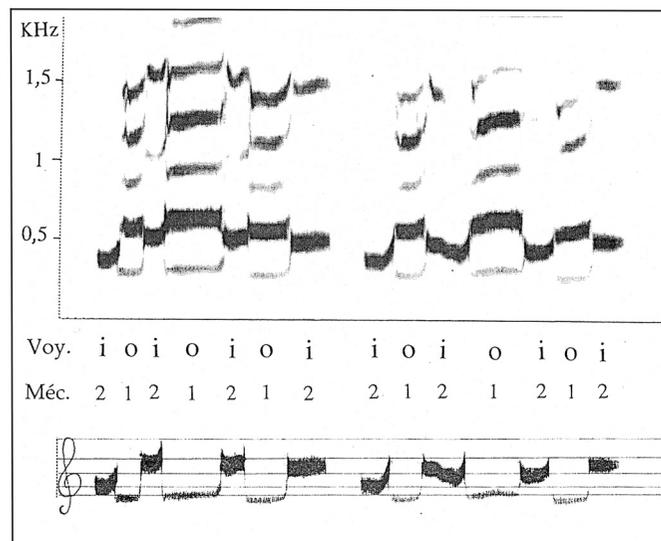


Figure 5.6 - Chant « yodelé » d'un Pygmée Centrafricain.

Son 43

Chant de femme Mongole: ornements par changement de mécanisme. Dans le mécanisme 1, ornementation par saut bref; dans le mécanisme 2, trilles «imitant» le saut. Disque "Chants Mongols et

- **Pas de transition audible** : le chanteur n'utilise qu'un mécanisme ou "gomme" la transition. C'est ce qui est recherché dans le chant lyrique classique, dont l'idéal est l'absence de passages.

- **Emploi ponctuel de la discontinuité** et de l'opposition de timbre entre les deux principaux mécanismes à des fins expressives : début du siècle, certaines personnalités (Callas), opérette et variété.

- **Technique développant un jeu sur les oppositions** : contrastes de timbre (alternance de voyelles) et sauts brusques de la fréquence fondamentale (grands intervalles). Tous les yodel (Suisse, Afrique, Géorgie, etc.), hommes et femmes.

Le yodel est une technique vocale qui consiste à passer de façon abrupte d'un mécanisme à l'autre. Le saut de fréquence (souvent supérieur à la quinte) s'accompagne d'une discontinuité timbrale provoquée par le change-

ment de voyelle : 2 pour le mécanisme 2 et 0 pour le mécanisme 1. Figure 5.6 et Ex *Son 42*

- **Exploitation des perturbations liées au saut de fréquence entre deux mécanismes, à des fins ornementales.** Ecouter l'exemple *Son 43*. Deux styles d'ornementation sont à considérer. D'une part l'ornementation produite par l'oscillation rapide entre les deux mécanismes : mélodie en mécanisme 1 et emprunt bref au mécanisme 2 ou "trille" de mécanismes. D'autre part l'ornementation produite par allongement des instabilités, intégration de la variation de fréquence fondamentale dans le répertoire musical.

Cette étude a été présentée maintes fois lors de conférences et publiée en 1991.

Au: 12. - CASTELLENGO M., (1991) Continuité, rupture, ornementation, ou les bons usages de la transition entre deux modes d'émission vocale, in La voix et les techniques vocales, Cahiers de musiques traditionnelles N°4, p.155-165, Ateliers d'ethnomusicologie, Genève,.

### **4.3. Rédaction d'un fascicule sur "la notion de registre vocal". Registres laryngés et registres résonantiels.**

De 1983 à 1989 nous sommes considérablement sollicités avec Bernard Roubeau pour faire des conférences sur notre recherche. Citons : la Société Française de phoniatrie (3 interventions), les professeurs de chant, (3 interventions au Centre de formation de l'Institut Polyphonique), les congrès sur la voix (3 interventions), diverses Formations d'enseignants (4).

Les résistances sont nombreuses, les discussions très vives.

Au: 18. - CASTELLENGO M., (1986), Les deux principaux mécanismes de production de la voix humaine, leur étendue et leur utilisation musicale, Colloque "La voix dans tous ses éclats", FNAMU, Paris.

Aucun ouvrage n'existant en langue française, nous entreprenons la rédaction d'un fascicule. Celui-ci doit présenter un bilan neutre de tout ce qu'il est possible d'observer relativement à la réalisation et à l'emploi musical des quatre modes de production de la voix humaine de l'homme et de la femme. Il a l'ambition d'être lisible aussi bien par des chercheurs en acoustique que par des artistes chanteurs ou des phoniatres, et doit comporter d'abondantes références bibliographiques qui permettront au lecteur qui le désire, d'approfondir l'aspect qui le concerne plus particulièrement.

La première rédaction, 50 pages, 40 figures et 60 exemples sonores est achevée en 1993. 15 exemplaires sont distribués mais nous recevons peu de critiques en retour sinon que le texte est trop condensé...Le travail est présenté à deux congrès.

Cg: 26. - ROUBEAU B., CASTELLENGO M., (1993), "Revision of the notion of voice register", XIX° International CoMeT Congress, Utrecht

Après la soutenance de la thèse de B. Roubeau (1993) nous mettons en place un groupe de recherches sur la voix chantée.

### **4.4. Groupe de recherches sur la voix**

Les chercheurs travaillant sur la voix sont dans des structures extrêmement diverses et ont des formations disparates. Les publications sont également très dispersées. Il nous a semblé important d'offrir un cadre de réunion et de réflexion pour faire le point des recherches en cours et susciter une dynamique d'échanges et de collaborations. La forte participation à chaque journée nous a surpris (plus de 45 personnes). La liste des intervenants donne une idée de la diversité des origines culturelles. La première réunion a été organisée au LAM le 14 Juin 1994 avec B. Roubeau, Les intervenants étaient : B. Roubeau (Hôp. Pitié Paris); S. Fürniss (LACITO, Paris); X. Pelorson (ICP; Grenoble); C. Pillot (Inst. Phonétique Paris); D. Autesserre (Inst. Phon. Aix en Provence); M. Castellengo (LAM, Paris); Ph. De-

palle (IRCAM, Paris). La 2ème réunion, organisée conjointement par la SFA et la SFE (Société Française d'Ethnomusicologie) s'est tenue dans les locaux du laboratoire d'ethnomusicologie du musée de l'homme sur le thème "La voix chantée dans les musiques traditionnelles". La 3ème réunion s'est tenue à l'Hôpital Tenon. Mais au delà des premiers échanges, il est vite apparu que les participants n'étaient pas activement engagés dans une recherche continue. Un nouveau groupe de recherche va se constituer avec l'arrivée en thèse de Nathalie Henrich.

## 5. Nouvelles recherches sur la voix chantée (1996 - 2001)

*Groupe B. Roubeau, Ch. Mathias, B. Chuberre, N. Henrich., C. d'Alessandro, B. Doval.*

Avec la thèse de Nathalie Henrich le thème de la voix chantée retrouve une place importante dans les recherches du LAM. Tout d'abord, cette thèse est co-dirigée par Christophe d'Alessandro, ce qui donne lieu à une collaboration étroite avec une équipe du LIMSI (Boris Doval et Tuan Thy Ngoc). En second lieu, N. Henrich organise un atelier mensuel dans le cadre duquel se retrouvent les chercheurs de différentes disciplines concernés par la voix chantée<sup>19</sup>. Enfin, l'équipement récemment acquis au laboratoire pour enregistrer simultanément le son vocal et le signal électroglottographique, de même que l'environnement de traitement de signal développé par N. Henrich permettent maintenant de traiter une grande quantité de mesures. Une vingtaine de chanteurs professionnels acceptent de se prêter à nos enregistrements. Ils viennent confiants, grâce aux contacts personnels établis de longue date au LAM, mais aussi par le truchement d'élèves de la Classe d'Acoustique du Conservatoire de Paris, qui sont titulaires d'un premier Prix de chant : les mentalités évoluent<sup>20</sup> : les jeunes chanteurs cultivés s'intéressent à la recherche.<sup>21</sup>

Dans le cadre de l'atelier nous présentons les recherches faites récemment sur le phonétogramme.

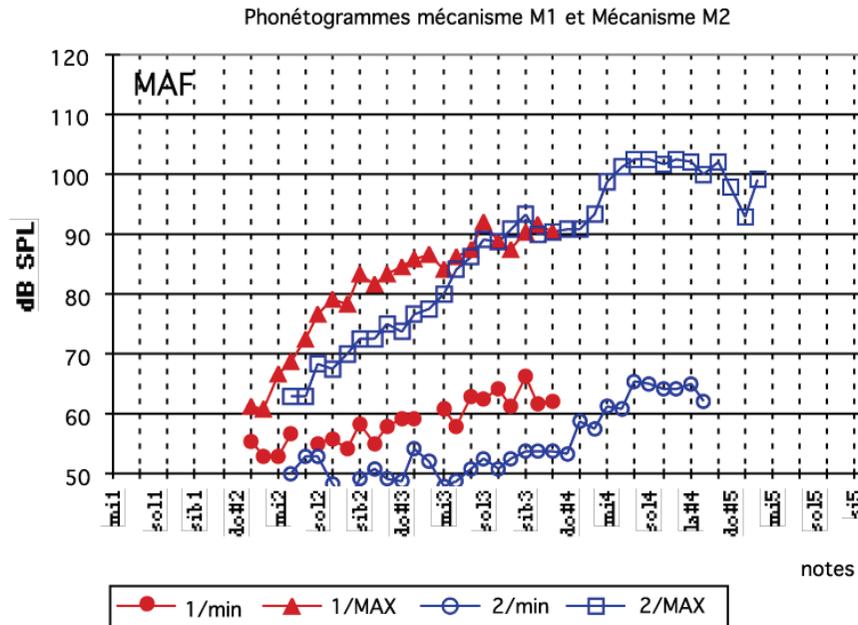
---

19. Depuis 1994 le nombre des chercheurs travaillant sur la voix a rapidement progressé.

20. On peut tenter ici un parallèle avec la recherche sur les instruments en composite. En 1986 la réalisation par Ch. Besnainou de luths et de guitares soulevait la réprobation dans le milieu des musiciens, et pour faire essayer les instruments il fallait leur donner l'apparence du bois. Aujourd'hui la table d'harmonie est d'un beau noir et les luthiers s'inscrivent à une formation professionnelle pour apprendre à travailler avec les composites.

21. Les trois jeunes chanteurs avec lesquels nous avons travaillé, tous sortis du Conservatoire avec un 1er Prix, et actuellement en début de carrière, ont une culture universitaire du niveau de 2nd et 3ème cycle. Ce n'est pas un hasard!

## 5.1. Phonétogrammes vocaux des différents registres



**Figure 5.7** Phonétogrammes du mécanisme 1 (symboles rouges pleins) et du mécanisme 2 (symboles bleus évidés). Femme, chanteuse.

## 5.2. Les registres des chanteurs

Deux élèves de la classe d'Acoustique musicale du CNSM, par ailleurs lauréats de la classe de chant lyrique, ont effectué une recherche sur la voix dans une optique professionnelle<sup>22</sup>. Chantal Mathias, soprano lyrique a fait le point sur "la voix de femme". Le baryton Bertrand Chuberre couronne simultanément ses études de médecine, sa spécialité

22. La situation est habituellement inversée : les scientifiques étudient la voix des chanteurs... Ici la confiance entre le chercheur et sujet est totale, et surtout, le questionnement est parfaitement ciblé.

Le phonétogramme rend compte de l'étendue dynamique de la voix. Au cours de nos recherches sur les mécanismes laryngés nous avons entrepris l'exploration systématique du phonétogramme dans chacun des registres laryngés. 40 sujets se sont prêtés à l'examen : hommes, femmes, chanteurs ou non chanteurs et enfants. Une étude plus spécifique du troisième registre a aussi été menée.

Ce travail a fait l'objet de deux mémoires d'orthophonie (Bodin 1997, Ragot 1998) sous la direction de B. Roubeau, et a été présenté au congrès du CoMeT à Paris (1997).

Un article en collaboration avec B. Roubeau est soumis à *folia Phoniatica*.

ROUBEAU B., CASTELLENGO M., BODIN P., RAGOT M., Phonétogramme par registre laryngé. *Folia Phoniatica Logopedics*, 56, 321-333.

1

de phoniatrie et le prix de la classe d'acoustique avec un remarquable travail de recherche sur deux techniques d'adaptation vocale particulières au chant classique : "la couverture" et "la voix mixte" ainsi que sur la voix dite de "sifflet".

La "**couverture**" est une technique vocale développée à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle pour augmenter la tessiture vocale vers les aigus sans préjudice pour la voix. L'étude a montré que la couverture crée un registre résonantiel dans le mécanisme I chez l'homme. Un paramètre intéressant : la longueur du pic négatif de la dérivée du signal glottographique semble un bon indice d'une diminution de l'adduction des cordes vocales, ce qui contribue à mettre le chanteur à l'abri d'accidents vocaux. Ce travail sur la couverture a bénéficié d'une technique d'exploration originale des formants vocaux, basée sur l'emploi du "fry" (mécanisme 0), dont nous avons découvert l'intérêt lors de la rencontre de D. Miller à Groningen (Pays-Bas).

La **voix "mixte"** fait l'objet de nombreuses discussions à propos du nombre réel de "registres" de la voix. En replaçant l'étude dans le cadre de la double conception : registres laryngés ou résonantiels, nous avons pu montrer que le fait de "mixer" correspond à des techniques vocales réalisées diversement selon les hommes et les femmes. Utilisée pour effectuer la transition entre les timbres différents des deux principaux mécanismes laryngés, la voix mixte est un registre résonantiel qui permet de masquer le passage entre les mécanismes I et II, en jouant sur la durée de fermeture, l'adduction ou la vitesse de fermeture des cordes vocales et, accessoirement sur le vibrato et la forme des cavités de résonance. Le chanteur s'efforce ainsi de "copier" les qualités spectrales des registres sus et sous-jacents.

La "**voix de sifflet**"<sup>23</sup>, mécanisme laryngé qui permet d'atteindre les fréquences les plus élevées (jusqu'à 2000 Hz!) a été explorée systématiquement chez l'homme comme chez la femme. La transition du mécanisme 2 au mécanisme 3 (sifflet) s'accompagne fréquemment de non-linéarités.

Mémoires de recherche soutenus dans le cadre de la classe d'Acoustique Musicale du CNSM :

Chantal MATHIAS - La voix de soprano - Approche acoustique des registres dans le chant lyrique.

Bertrand CHUBERRE - (2000), Les registres et passages dans la voix chantée.

L'étude de la voix mixte continue à faire l'objet de recherches (voir Présentation des recherches (2), 2002-2007).

---

23. qui, contrairement à la dénomination utilisée n'est pas produite par un jet d'air oscillant mais toujours par la vibration des cordes vocales!

### **5.3. Analyse acoustique et perception de la source en voix chantée -.Thèse de Nathalie Henrich**

La qualité vocale, dans la parole comme dans le chant, repose en grande partie sur les propriétés de la source de voisement. En s'appuyant sur le modèle acoustique source-filtre, on peut étudier les paramètres de la source de débit glottique pour caractériser les différentes productions vocales. Plusieurs modèles paramétriques de l'onde de débit glottique ont été proposés mais ils ne possèdent pas tous les mêmes paramètres, ni le même nombre de paramètres. Néanmoins, dans tous les modèles, on retrouve comme paramètres la période de voisement ( $T_0$ ), le quotient ouvert ( $Oq$ ), et au moins un paramètre qui règle la vitesse de fermeture (par exemple la pente spectrale). A l'aide de mesures ou d'estimations, ces deux derniers paramètres ont été explorés au cours du travail de thèse, afin d'analyser et de caractériser différentes productions vocales.

Trois axes de recherche ont été exploités :

- - des mesures expérimentales effectuées sur la source laryngée, en particulier à l'aide de l'électroglottographie qui permet de rendre compte des variations temporelles d'accolement des cordes vocales.
- - des techniques d'estimation spectrale de ces paramètres, développées en s'appuyant sur des modèles temporels et spectraux de la source et du conduit vocal.
- - une expérimentation perceptive qui a permis de relier ces paramètres à la qualité vocale perçue par les auditeurs et de déterminer des seuils perceptifs de variation.

Le travail s'est déroulé en collaboration étroite avec l'équipe Analyse, Synthèse et Perception du groupe Traitement du Langage Parlé du LIMSI (groupe de Christophe d'Alessandro)

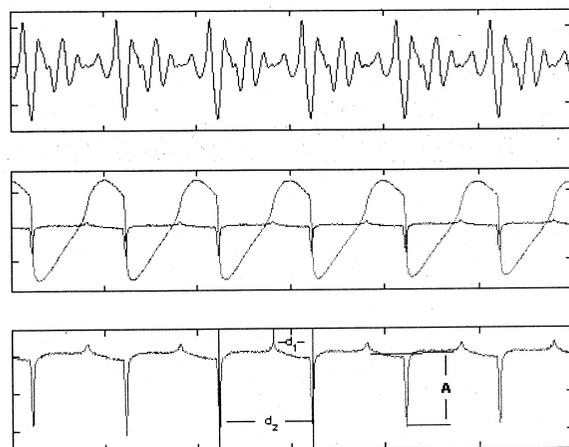


Illustration de la mesure du quotient d'ouverture  $Q_0 = d1/d2$   
 Et de l'amplitude du pic négatif de la dérivée ou « pente » (A)  
 En haut le signal acoustique  
 Au milieu le signal EGG et sa dérivée  
 En bas la dérivée de l'EGG

**Figure 5.8** De bas en haut : forme d'onde du signal sonore, Signal Electroglottographique et sa dérivée.

l'émission vocale (les barytons chantent en mécanisme 1, registre laryngé caractérisé par des cordes vocales épaisses, vibrant sur toute leur longueur, tandis que les sopranes utilisent le mécanisme 2, pour lequel la masse vibrante est réduite et la tension musculaire plus importante). Lorsque le chanteur effectue un passage du mécanisme 1 au mécanisme 2 sans rupture, le changement donne tout de même lieu à un saut de quotient ouvert.'

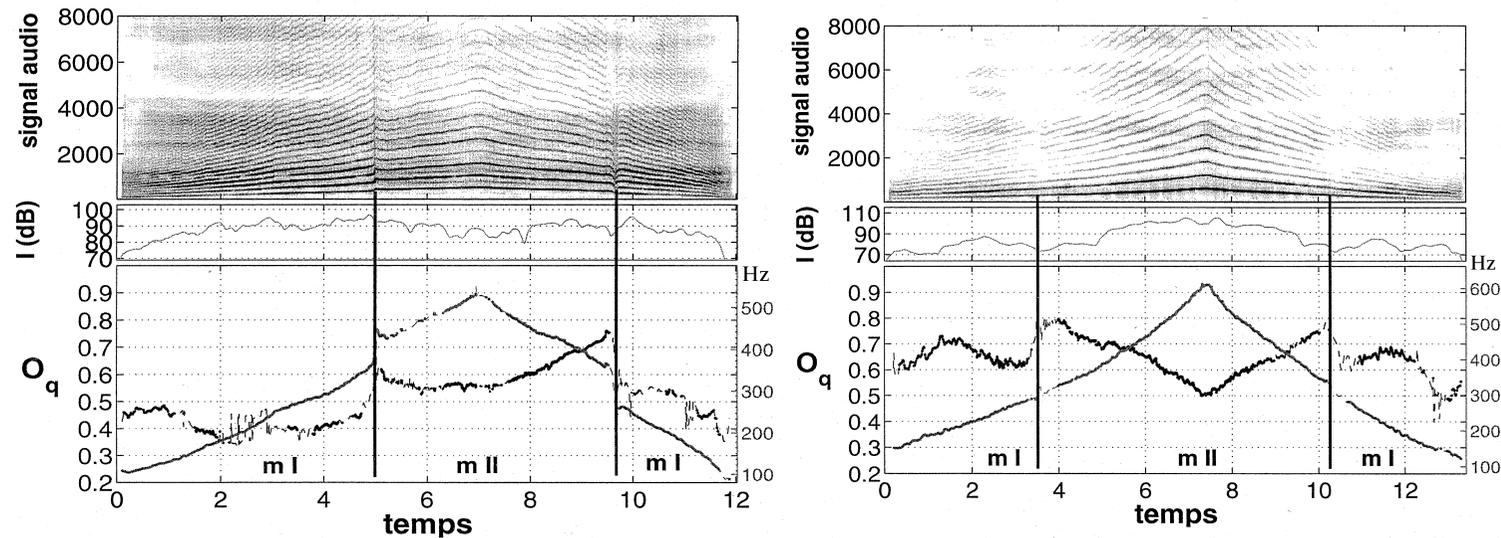
### 5.3.1. Mesures expérimentales :

L'électroglottographie est une méthode d'exploration non-invasive, qui permet de mesurer le quotient ouvert, défini comme le rapport de la durée d'ouverture glottique sur la période de vibration des cordes vocales. Le signal électroglottographique, proportionnel à l'impédance électrique du cou, varie en fonction de la surface de contact des cordes vocales. En le dérivant, on obtient pour chaque période deux pics assez nets, de sens opposé, l'un correspondant au moment de fermeture glottique, tandis que l'autre peut être relié à l'instant d'ouverture glottique. La détermination de ces deux instants permet alors de connaître la valeur du quotient ouvert.

Les signaux acoustiques et électroglottographiques de chanteurs professionnels ont été enregistrés simultanément. (Barytons basses, Ténors, Contreténors, Alto ou Mezzo sopranos, Sopranos).

Les résultats suivants ont été établis :

- le quotient ouvert montre des différences significatives entre les voix d'homme et les voix de femme, ce qui s'explique principalement par le fait que les hommes n'utilisent pas le même registre laryngé que les femmes, lors de



## Son 44

1/ Glissando ascendant-descendant, chanté par un ténor, puis 2/glissando ascendant-descendant chanté par un contreténor. 1999 ; N. Henrich.

**Figure 5.9** - **A gauche** : Glissando ascendant/descendant chanté par un ténor. De bas en haut : sonagramme ; courbe d'amplitude ; quotient ouvert ( $O_q$ ) et fréquence fondamentale ( $f_0$ ). Le changement de mécanisme s'accompagne de nombreuses discontinuités, et particulièrement d'un changement très net de  $O_q$ . **A droite** : Même analyse d'un glissando chanté par un contreténor. Le changement de mécanisme, de mI à mII, masqué par le chanteur, est visible sur la courbe du quotient Ouvert ( $O_q$ ). N. Henrich - Ex. *son N°44*

- une corrélation a été établie entre l'intensité vocale et le quotient ouvert, quelque soit la hauteur du son émis. Quand l'intensité vocale augmente, le chanteur tend à diminuer son quotient d'ouverture, donc à garder les cordes vocales en contact plus longtemps (relativement à la période) lors de la phonation. Cet effet ne se retrouve pas en mécanisme 2, où on observe même parfois l'effet inverse, c'est-à-dire une augmentation du quotient d'ouverture lors d'une augmentation d'intensité.
- les variations dynamiques de quotient ouvert sont plus importantes en voix parlée qu'en voix chantée, ce qui semble naturel si l'on pense que le chanteur met l'accent sur l'homogénéité et la continuité sonore. En voix parlée, ces variations sont vraisemblablement liées à la prosodie et à l'articulation.

Cg: 6. - HENRICH N., D'ALESSANDRO CH., DOVAL B., CASTELLENGO M.; (2000), Open quotient measurements on EGG, speech and singing signals, 4th International Workshop Advances in Quantitative Laryngoscopy, Voice and Speech Research, Jena.

Cg: 5. - HENRICH N., D'ALESSANDRO CH., CASTELLENGO M., DOVAL B.; (2000), Mesures electroglottographiques du quotient d'ouverture glottique en voix parlée et chantée. JEP 2000;

### *5.3.2. Estimation spectrale des paramètres de l'onde de débit glottique*

Dans le cas d'une fermeture abrupte des cordes vocales lors de la phonation, la source est modélisée spectralement par un filtre linéaire anticausal d'ordre 2, dont les coefficients peuvent être reliés simplement aux paramètres de source  $T_0$  (période fondamentale),  $AV$  (amplitude de l'onde débit glottique),  $Oq$  (quotient ouvert) et  $am$  (coefficient d'asymétrie de l'onde de débit glottique). Estimer ces paramètres revient donc à trouver le filtre qui correspond au mieux à l'onde de débit glottique obtenue par filtrage inverse du signal acoustique.

Ct: 3. - HENRICH N., DOVAL B., D'ALESSANDRO CH., CASTELLENGO M., (2001); Spectral effect of glottal source parameters; PEVOC, Stockholm.

### *5.3.3. Expérimentation perceptive.*

Pour cette expérimentation, les sons des tests doivent répondre à deux exigences. D'une part, permettre le contrôle des paramètres de source et plus particulièrement du quotient ouvert, d'autre part, posséder une bonne qualité sonore pour permettre de porter des jugements auditifs valides. L'idée, proposée par N. Henrich, d'appliquer au signal de synthèse la fonction de variation temporelle de la fréquence fondamentale s'est révélée particulièrement fructueuse. Le vibrato et les petites instabilités empruntés à une voix réelle ont fourni au signal de synthèse toute la complexité désirable. L'étude a permis de déterminer des seuils différentiels perceptifs du quotient ouvert pour 3 valeurs de  $Oq$  (0,4; 0,6; 0,8), deux de  $am$  (0,66 et 0,8), deux fréquences fondamentales (130 et 196 Hz), et deux voyelles (a et é). Les résultats font l'objet d'une publication en cours :

HENRICH N., SUNDIN G., AMBROISE D., CASTELLENGO M., D'ALESSANDRO C., DOVAL B., Just noticeable differences of open quotient and asymmetry coefficient in singing voice; Journal of Voice, 17 (4), 481-494.

L'incidence des variations du quotient ouvert sur la qualité vocale doit faire l'objet d'une étude prochaine.

## 6. Conclusions

L'étude de la voix humaine est passionnante mais difficile. Touchant à de nombreux domaines qui sont : la physiologie humaine, la modélisation de la source glottique; l'enregistrement de données acoustiques avec des chanteurs; le traitement du signal; la psychoacoustique etc., elle requiert de fortes interactions avec les spécialistes de ces diverses disciplines.

Notre étude des mécanismes laryngés a permis d'inscrire les mesures des paramètres de la source glottique dans un cadre cohérent. Notre souci de diffuser l'information sous forme accessible aux non spécialistes nous a permis d'entretenir des relations fréquentes et confiantes avec les artistes et les pédagogues sans lesquels notre recherche n'aurait pu se développer.

