

**PHONETIQUE CLINIQUE**  
**CONTRIBUTION A LA COMPREHENSION DE LA VOIX ET**  
**DE LA PAROLE NORMALE ET PATHOLOGIQUE**

**LISE CREVIER-BUCHMAN**

**MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES**

**JURY**

**Monsieur Alain Marchal**, Directeur de Recherche, Laboratoire Parole et Langage, UMR 7309, Aix-Marseille Université et CNRS – Tuteur

**Monsieur Rudolph Sock**, Professeur, IPS & U.R. 1339 LiLPa, ER Parole et Cognition, Université de Strasbourg – Expert

**Monsieur Philippe Dejonckere**, Professeur – Université d'Utrecht - Rapporteur

**Monsieur Noel Nguyen**, Professeur, Laboratoire Parole et Langage, UMR 7309, Aix-Marseille Université et CNRS – Rapporteur

**Madame Jacqueline Vaissiere**, Professeur, Laboratoire de Phonétique et de Phonologie (LPP), UMR7018, Université Sorbonne Nouvelle et CNRS – Rapporteur

**Monsieur Dominique Chevalier**, Professeur, CHRU Lille, Université Lille 2 – Examineur

**Monsieur Antoine Giovanni**, Professeur, CHU La Timone Marseille, Aix-Marseille Université - Examineur

**Monsieur Jean Schoentgen**, Professeur, L.I.S.T. Faculté des Sciences Appliquées, Université Libre de Bruxelles - Examineur

**AIX-MARSEILLE UNIVERSITE**  
**12 DECEMBRE 2012**

**PHONETIQUE CLINIQUE**  
**CONTRIBUTION A LA COMPREHENSION DE LA VOIX ET**  
**DE LA PAROLE NORMALE ET PATHOLOGIQUE**

**LISE CREVIER-BUCHMAN**

**MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES**

**AIX MARSEILLE UNIVERSITE**

**2012**

*A Louis,  
Lionel, Elena, Pamela  
Avec tout mon Amour  
Vous êtes ma Vie*

## Remerciements

Ce mémoire d'habilitation n'existerait pas sans l'inspiration et le soutien de mes maîtres aussi bien en clinique qu'en phonétique. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Jacqueline Vaissiere qui m'a guidée avec enthousiasme et rigueur, et qui m'a initiée aux joies de la recherche et de l'enseignement, tout au long de mes années doctorales puis comme chercheur confirmé. Avec Annie Rialland, que je remercie pour ses conseils éclairés et sa disponibilité, elles m'ont accueillie et m'ont fait une place dans la famille du laboratoire de phonétique et de phonologie. Je remercie les membres du laboratoire et tout particulièrement Cécile Fougeron, avec qui entreprendre un projet est une réelle stimulation, et Angélique Amelot, qui a toujours été à mes côtés dans toutes mes expérimentations.

J'exprime toute ma gratitude à Daniel Brasnu et je lui suis infiniment reconnaissante de m'avoir accordé sa confiance et permis de développer l'unité de la Voix de l'hôpital Georges Pompidou. Il m'a ainsi offert le terrain expérimental et scientifique pour mes travaux de recherche. Je remercie chaleureusement Marie-Claude Monfrais-Pfauwadel, qui m'a ouvert la voie et qui a été ma fidèle compagne dans notre long et riche parcours médico-phonétique.

Pour m'avoir fait découvrir le monde de l'expérimentation instrumentale en phonétique, et partager les grands moments des débuts de EVA, j'exprime toute mon amicale reconnaissance à Bernard Teston. Je remercie tout aussi chaleureusement Claude Chevie-Muller pour son accueil et son initiation à l'étude de la parole pathologique en neurologie au laboratoire INSERM de l'hôpital de la Salpêtrière.

Je remercie Georges Boulakia qui m'a fait découvrir le monde fascinant de la phonétique et qui m'a encadré dans mes premiers travaux sur la voix pathologique au cours de mon DEA.

La plupart des travaux présentés ici, et qui vont faire l'objet de la poursuite de mes recherches, n'auraient pas vu le jour sans l'enrichissante collaboration avec l'équipe de Bruce Denby à l'ESPCI dans le cadre de l'ANR REVOIX. Je les remercie de m'avoir ouvert les portes de leur laboratoire et de m'avoir sensibilisé à la rigueur constructive du monde des sciences de l'ingénieur.

Au fil des mes pérégrinations cliniques et scientifiques, j'ai eu le plaisir de rencontrer et de collaborer avec des personnes dont l'influence a été déterminante dans l'orientation de mes travaux, en particulier Charlie Freche, Ollivier Laccourreye, Antoine Giovanni, Philippe Dejonckere, Shinji Maeda, Jean Schoentgen, John Esling, Kiyoshi Honda, entre autres.

Un grand merci au soutien et aux échanges scientifiques et cliniques de mes collègues du LPP, LPL et de l'HEGP. Je remercie tous les locuteurs qui ont bien voulu prêter leurs voix et même leur larynx, ainsi qu'à tous les auditeurs que j'ai sollicités pour des tests de perception.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à Alain Marchal, fervent défenseur de la phonétique clinique, pour avoir cru en moi et m'avoir soutenue et encouragée tout au long de ce travail de synthèse et qui me fait l'honneur d'en assumer la direction.

## TABLES DES MATIERES

<b>Remerciements .....</b>	<b>4</b>
<b>I INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
<b>I-1. De la phonétique à la phonétique clinique</b>	<b>8</b>
I-1.1. Les origines de la phonétique.....	8
I-1.2. De la phonétique prescriptive à la phonétique expérimentale.....	9
I-1.3. Emergence de la phonétique clinique en France.....	10
I-1.4. Essor de la phonétique clinique aux USA.....	12
I-1.5. Evolution de la phonétique au XX <sup>ème</sup> siècle en Europe.....	13
I-1.6. De nos jours.....	15
<b>I-2. Place de ma recherche en phonétique clinique</b>	<b>15</b>
I-2.1. Spécificité de ma formation.....	15
I-2.2. Spécificité de mes recherches.....	16
I-2.3. Valorisation de mes recherches.....	18
I-2.3.1. Développement de l'enseignement en phonétique clinique.....	18
I-2.3.2. Direction de travaux de recherche.....	19
I-2.3.3. Diffusion scientifique.....	22
<b>I-3. Apport de la physiologie pour l'étude de la phonation</b>	<b>25</b>
I-3.1. Le larynx et la fonction phonatoire, notions de phylogenèse.....	25
I-3.2. Particularités des tissus laryngés chez l'homme.....	27
I-3.3. Rappel des notions de physiologie de la phonation.....	28
I-3.3.1. Les théories oscillo-impédantielles.....	28
I-3.3.2. Les théories de dynamique non linéaire.....	29
<b>II MES TRAVAUX DE RECHERCHES.....</b>	<b>32</b>
<b>II-1. Les contraintes méthodologiques en phonétique clinique</b>	<b>32</b>
II-1.1. Les contraintes liées aux modalités des études en phonétique clinique.....	32
II-1.1.1. Les études longitudinales.....	32
II-1.1.2. Taille des échantillons.....	33
II-1.2. Les contraintes liées au choix du matériel.....	33
II-1.3. Les contraintes liées aux pathologies et aux techniques chirurgicales.....	34
II-1.3.1. Les cancers du larynx et les laryngectomies totales.....	34
II-1.3.2. Les cancers du larynx et les laryngectomies partielles par voie externe ...	36
<b>II-2. La biomécanique laryngée et ses conséquences phonatoires</b>	<b>38</b>
II-2.1. Modifications biomécaniques après chirurgie partielle du larynx.....	38
II-2.1.1. La néoglote et les « voix de substitution ».....	38
II-2.1.2. Recommandations thérapeutiques pour une néoglote fonctionnelle.....	45
II-2.1.3. Conflit articulation-phonation après chirurgie partielle laryngée.....	47
II-2.1.4. Substitution vocale après laryngectomie totale : La voix silencieuse.....	51
II-2.2. Apport à la phonétique des langues et des techniques vocales.....	58
II-2.2.1. Articulateur aryépiglottique pour les consonnes pharyngales.....	58
II-2.2.2. Les trilles aryépiglottiques.....	63
II-2.2.3. L'articulation aryépiglottique dans le chant Long Mongol.....	64
<b>II-3. Vers une caractérisation acoustico-perceptive de la voix après chirurgie partielle du larynx</b>	<b>67</b>
II-3.1. Les contraintes liées au choix des protocoles.....	69
II-3.2. Les évaluations perceptives des voix de substitution.....	70

II-3.2.1.	<i>Le choix des jurys d'écoute.....</i>	72
II-3.2.2.	<i>Les échelles perceptives.....</i>	73
II-3.2.3.	<i>Le voisement des consonnes.....</i>	75
II-3.3.	Evolution des voix après cordectomies par voie endoscopique.....	78
II-3.3.1.	<i>Particularités de ces chirurgies minimalement invasives.....</i>	78
II-3.3.2.	<i>Les études prospectives longitudinales.....</i>	80
<b>II-4.</b>	<b>La phonétique articulatoire après chirurgies oro-pharyngées</b>	<b>84</b>
II-4.1.	Conséquences des chirurgies de la cavité orale sur la communication .....	84
II-4.2.	Facteurs de perturbation articulatoire des prothèses palatines.....	85
<b>III</b>	<b>PROJETS DE RECHERCHE .....</b>	<b>90</b>
<b>IV</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>98</b>

# I INTRODUCTION

Cette habilitation à diriger la recherche traite de l'apport de la phonétique clinique à l'étude des pathologies de la voix et de la parole.

Le terme de « phonétique clinique » désigne un ensemble d'activités menées par une communauté de chercheurs privilégiant une approche expérimentale de l'étude des productions pathologiques de la voix, de la parole, du langage ainsi que les troubles de la perception. La phonétique clinique couvre un large éventail de sujets et de domaines allant du babillage infantile, des pathologies du développement du langage ainsi qu'à sa détérioration dans les démences, aux troubles de l'articulation de la parole des fentes palatines ou des pathologies neurologiques, tout comme les troubles de la perception des sons de la parole. La phonétique clinique a recours à de nombreux procédés qui s'appuient sur les théories de la phonétique classique. Elle favorise l'observation en utilisant une instrumentation qui permet la prise de données multiparamétriques avec mise en place de protocoles expérimentaux pour les évaluations acoustiques, perceptives et physiologiques.

Dans ce mémoire, je vais commencer par retracer l'évolution de la phonétique pour arriver au développement de la phonétique clinique et expliquer comment mes travaux ont trouvé leur place dans ce domaine. Dans un deuxième grand chapitre je vais présenter mes travaux de recherche en posant i) les bases méthodologiques, ii) la biomécanique laryngée et ses conséquences sur la phonation normale et pathologique iii) les caractéristiques acoustico-perceptives et articulatoires des différentes pathologies et leur évolution post-thérapeutique. A partir de la théorie, j'ai cherché soit à exploiter des outils d'analyse existants soit à en développer d'autres permettant l'exploration de la parole normale. Puis je les ai appliqués à la parole pathologique dans un but de compréhension des déviances pour mieux guider la rééducation et orienter les compensations. Enfin, ces avancées m'ont permis de revenir à la phonétique pour enrichir la théorie au travers de comportements extrêmes comme la voix chuchotée ou chantée ou la phonétique des langues. Je terminerai ce mémoire en présentant mes projets de recherche.

## *I-1. De la phonétique à la phonétique clinique*

### **I-1.1. Les origines de la phonétique**

Les premières descriptions phonétiques remonteraient à *Panini* (560-480 av J.C.) grammairien de l'Inde antique, considéré comme un des précurseurs de l'étude de la littérature et fondateur d'une méthode de prononciation de la langue sanskrite. Il décrit les concepts de *phonème*, de *morphème* et de *racine* qui ne seront pris en considération par les linguistes occidentaux que deux millénaires plus tard. Parmi les philosophes grecs, on peut citer *Aristote* (384-322 av. J.C.), qui décrit une dimension anatomique à la production de la voix dans la région de la trachée artère et une dimension communicationnelle en lui donnant un rôle d'expression « des passions de l'âme ». Il poursuit en plaçant la parole dans l'activité de l'homme : « l'homme est le seul animal que la nature a doté du don de la parole ». Un autre exemple plus tardif nous vient de *Galien* (130-200), médecin philosophe qui apportera des précisions anatomiques et physiologiques en distinguant la voix produite par le fonctionnement des « organes vocaux » et la parole produite par des organes tels que « la langue, le nez, les lèvres et les dents » qu'on appellerait maintenant le conduit vocal. A l'époque des Romains, certains auteurs comme *Quintilien* (30-100), célèbre avocat qui consacra sa vie à l'enseignement de la rhétorique, développe dans son ouvrage « De l'institution oratoire » un véritable programme d'enseignement des préceptes de l'art oratoire en insistant sur le travail de la voix, du souffle, des mimiques du visage, de la gestualité du corps.

Les fondements de la phonétique sont déjà abordés dès l'antiquité gréco-latine tant sur le plan de la théorisation (classification phonétique des sons de la parole, description phonatoire et articulatoire) que sur celui de la physiologie et de la pédagogie (éducateurs de la voix et de la parole), et continueront à être posés jusqu'au XVII<sup>ème</sup> siècle. Un exemple de l'application des théories phonétiques à la pratique clinique est illustré par les travaux de *John Wallis* (1616-1703) mathématicien anglais, auteur du premier traité de phonétique « *Grammatica Lingua Anglicanae* » et précurseur de l'éducation des sourds-muets. Ses travaux ont influencé l'abbé *Charles-Michel de L'Epée*, qui a adapté à la langue française sa méthode de démutisation des sourds-muets. *Wallis* avait ainsi appliqué la phonétique à la clinique pour les dyslalies fonctionnelles et la correction des accents étrangers. Selon *Patrick Dandrey*, spécialiste de la littérature française du XVII<sup>ème</sup> siècle (Dandrey, 1990), « l'analyse de la voix

au XVII<sup>ème</sup> siècle est confiée au physicien et au médecin d'un côté, de l'autre au grammairien et au prêtre, au spécialiste des corps et à celui des esprits ou des âmes ».

Le XVIII<sup>ème</sup> siècle voit la progression des études anatomiques et surtout physiologiques du larynx. La production de la voix humaine est décrite par analogie avec des instruments de musique par *Denis Dodart*, médecin botaniste, en 1700, et *Antoine Ferrein*, médecin anatomiste (à qui l'on doit les termes de « *cordes vocales* »), en 1741 (Fournié, 1866).

### **I-1.2. De la phonétique prescriptive à la phonétique expérimentale**

La construction des « machines parlantes » de *l'abbé Mical*<sup>1</sup> (1783) et de *Von Kempelen* (1769) (Schaffer, 1999), correspond aux premières grandes simulations mécaniques des phénomènes de production de la parole humaine associant source vocale et résonateurs supraglottiques.

Au XIX<sup>ème</sup> siècle, les analyses acoustiques progressent d'une part grâce aux travaux de *Fourier* (1768-1830) et d'autre part grâce aux analyses de *Von Helmholtz* (1821-1894) sur le timbre des sons de la parole par des résonateurs. *Joseph Fourier*, mathématicien et physicien français, a contribué au développement de la phonétique acoustique grâce à ses travaux sur la décomposition de fonctions périodiques en séries trigonométriques convergentes appelées « séries de Fourier » et les « transformées de Fourier » (1824), ainsi que leur application au problème de la propagation de la chaleur et des vibrations. *Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz*, médecin militaire puis professeur d'anatomie et de physiologie contribua aussi au développement de l'expérimentation avec ses travaux en phonétique acoustique par l'observation et la modélisation des phénomènes sonores qu'il appliqua à la musique en créant les notions distinctives de « sensation » et de « perception ».

Par ailleurs, les articulateurs de la voix et de la parole font l'objet d'explorations physiologiques permettant leur description rigoureuse basée sur des faits anatomo-cliniques. C'est en 1855 que les « cordes vocales » (désormais le terme de 'plis vocaux' est recommandé) sont visualisées pour la première fois par un médecin espagnol et professeur de chant, *Manuel Garcia Junior*, grâce à l'utilisation d'un miroir laryngé appelé « laryngoscope ». La description de l'examen laryngé et des comportements physiologiques laryngés est publiée par *Johann Nepomuk Czermak* en 1860 (Czermák, 1860). Ce dernier était médecin physiologiste et psychologue et a beaucoup œuvré au développement de la

---

<sup>1</sup> <http://www.automates-boites-musique.com/index.php?file=hismical>

<sup>2</sup> <http://www.langsci.ucl.ac.uk/ipa/>, IPA 99

laryngologie. Passionné de phonétique, il établit que les différents sons des voyelles étaient uniquement dus à la forme du conduit vocal indépendamment de la tension des plis vocaux.

### I-1.3. Emergence de la phonétique clinique en France

On peut considérer que cette période du XIX<sup>ème</sup> siècle marque le réel tournant de la phonétique avec d'une part une branche « descriptive » et d'autre part une branche « expérimentale ».

La phonétique descriptive est à l'origine des travaux de *l'Association Phonétique Internationale*<sup>2</sup> créée en France en 1886, en langue française (la langue anglaise devient officielle en 1970). La création de cette association naît de la réflexion d'un petit groupe de linguistes soucieux d'améliorer l'enseignement des langues grâce à une notation phonétique. Cette association avait pour but de répondre aux besoins de l'enseignement des phrases et d'une harmonisation des symboles phonétiques et crée l'API (Alphabet Phonétique International). Cette branche descriptive a favorisé les *études sur le terrain* dans le but de recueillir des particularités communes entre les langues du monde ainsi que les différences entre ces différentes langues.

La phonétique « expérimentale » (instrumentale) se développe et concerne tout autant la physiologie de la production que l'acoustique de la parole. Dans les « Principes de Phonétique Expérimentale » (Rousselot, 1923), publiés de 1897 et 1908, *l'abbé Jean Pierre Rousselot*, fondateur de la phonétique expérimentale en France et créateur du premier laboratoire de phonétique expérimentale, étudia les grandes fonctions qui sous-tendent la phonation telles que la respiration, l'articulation et la dynamique vocale. Il a recouru à des analyses physiques (acoustiques) et physiologiques (kymographie, palatographie, photographie) pour servir d'exemple dans l'enseignement des langues et à la « *rééducation des malades* » ayant des « vices de prononciation » d'origine pathologique. On peut considérer que l'abbé Rousselot est le père de la **phonétique clinique**. En 1897 le laboratoire de phonétique expérimentale est créé au Collège de France (Rousselot en devient le directeur) et est annexé à la chaire de grammaire comparative dirigée par *Michel Bréal*, linguiste français, fondateur de la sémantique. Les propos de Bréal (1897) marquent le tournant de la **phonétique de laboratoire** en déclarant que « la phonétique ne peut être conçue autrement qu'expérimentale », et qu'il faut recueillir des faits et non se contenter d'énoncer des principes a priori. Il va sans dire que cette évolution ne manqua pas de susciter

---

<sup>2</sup> <http://www.langsci.ucl.ac.uk/ipa/>, IPA 99

des querelles et des oppositions avec l'ensemble des linguistes, des grammairiens et des philosophes.

Vers la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, le terme de « phonation » apparaît en s'appuyant sur la physiologie et regroupe les termes de « voix » et de « parole » dans un processus de « voix articulée », la voix étant la première étape de la production de la parole. Mais en même temps, à cette époque, la notion de parole, qui est une manifestation du langage, prend toute son importance par sa relation à la « pensée » liée au fonctionnement du cerveau. C'est à cette époque que nous assistons aux travaux des neurologues comme *Paul Broca* (1861) ou *Carl Wernicke* (1874) sur les localisations des centres du langage et des troubles qui découlent de l'atteinte de ces centres (aphasies). C'est ainsi que le champ de la neurolinguistique se structure. De plus, à la même époque, les travaux des psychiatres *Sigmund Freud* & *Joseph Breuer* mettent au point la thérapie de troubles de l'hystérie par la parole et donne naissance à la psychanalyse (Freud *et al.*, 1923).

Par ailleurs, des médecins autrichiens et allemands tels que *Hermann Gutzmann* (grand spécialiste des troubles du langage à Berlin et admirateur de Rousselot) ainsi que des Français comme *Claudius Chervin* (spécialiste du bégaiement), étaient à la pointe de la recherche clinique et de la prise en charge thérapeutique des troubles de la voix et de la parole. Grâce à l'influence de Rousselot, ils ont œuvré pour le développement de laboratoires de phonétique expérimentale en relation avec la clinique des pathologies de la parole et ont reçus de nombreux visiteurs étrangers. La phoniatrie, en tant que spécialité, apparaîtra avec la nomination de Hermann Gutzmann<sup>3</sup> comme professeur de phoniatrie à Berlin en 1905.

Dans la même lignée, une élève de l'abbé Rousselot, *Suzanne Borel-Maisonny*, phonéticienne et grammairienne, fondatrice de l'orthophonie en France (Kremer *et al.*, 2005), se spécialisera dès 1928 dans l'étude de la prononciation et de ses troubles (domaine de la phonétique clinique). Elle crée en 1930 l'Institut Orthophonique de Paris. On y traitait alors des déficiences purement fonctionnelles telles que la surdité, les troubles d'articulation ou le bégaiement (Tarneaud *et al.*, 1941). En 1927, elle œuvre pour que cette discipline prenne réellement son essor par le biais d'un remaniement de son champ d'application et notamment par l'indication des bilans et de la rééducation des troubles du langage (Delangle, 1995 ; Talandier *et al.*, 2003). Elle est aussi la créatrice d'une méthode phonético-gestuelle où des gestes sont associés à des sons; cette méthode est connue sous le nom de Méthode Borel-

---

<sup>3</sup> <http://www.phoniatrics-uep.org/Continents/europe/germany/index.htm>

Maisonny (1956). Il faut attendre 1964, pour voir créer un diplôme national, le Certificat de Capacité d'Orthophonie [loi n° 64699 du 10.07.1964].

La poursuite du développement de la phonétique appliquée à la pathologie en France et la création de laboratoires de phonétique clinique a pu se développer grâce à certaines personnalités comme celle du professeur *Jean-Claude Laffon*, professeur d'ORL et de phoniatrie à la Faculté de Médecine de Besançon, qui a développé l'enseignement de la phoniatrie en France (spécialité médicale pour l'évaluation et la prise en charge des pathologies de la voix, de la parole et de la communication) et a beaucoup travaillé dans le domaine de la surdité. En 1964 il participe à la création du Bureau International d'Audiophonologie (BIAP), toujours actuellement très actif dans le domaine de la recherche interdisciplinaire en Audiophonologie. Entre 1969 et 1995, les travaux de recherche de Jean-Claude Laffon ont fait de Besançon un haut-lieu, de renom international, de l'audiophonologie et du croisement des savoirs. Le Bulletin d'audiophonologie, disparu peu après le décès de J.C. Laffon, témoignait de cette richesse.

#### **I-1.4. Essor de la phonétique clinique aux USA**

Dans les années 1920, certains Nord-américains comme *Alexander Graham Bell* (ingénieur), *Edward Scripture* (psychologue, physicien et scientifique de la parole (speech scientist), *Carl Seashore* (psychologue, musicologue) pour n'en citer que quelques-uns, sont venus se former auprès des grands maîtres européens (dont H. Gutzmann à Berlin), et ont rapporté et diffusé de nouveaux savoirs sur la recherche et les traitements des troubles de la parole. C'est alors que la phonétique clinique a vu son essor aux Etats-Unis, sous l'impulsion de phonéticiens ou de linguistes ayant une bonne formation en phonétique et travaillant dans des départements cliniques de pathologie de la parole et du langage (« *speech pathology* »). Ce nouvel axe de recherche répondait à une demande pressante des thérapeutes de la voix, de la parole et de l'audition, appelés « *speech pathologists and audiologists* ». Ces personnes appartenaient le plus souvent à l'association dénommée « *American Speech, Hearing and Language Association* » (ASHA)<sup>4</sup>, qui a vu le jour en 1925 faisant suite à une réunion de la « *National Association of Teachers of Speech* (NATS) à Iowa City. Enfin, ces nouveaux phonéticiens ont bénéficié de subventions institutionnelles de certains états pour structurer le développement de formations en phonétique clinique et de centres spécialisés en pathologie du langage. Cette démarche a été à l'origine de la création d'un ensemble d'écoles doctorales et l'obtention en 1926 de la première thèse en phonétique clinique (PhD).

---

<sup>4</sup> <http://www.asha.org/about/history.htm>

Après un engouement pour la recherche en phonétique clinique dans les années 20, suivi d'une désaffectation pendant la « grande dépression », ce domaine de la recherche lié à la santé a retrouvé un nouveau souffle après la deuxième guerre mondiale. En effet, les hôpitaux militaires Nord-américains avaient une forte demande de prise en charge des pathologies de la parole et de l'audition et ont favorisé les recherches permettant de justifier la mise en place de nouveaux protocoles de réhabilitation (Wallace, 1954).

Dans le même esprit, la période post-guerre du Vietnam a été marquée par le développement d'un enseignement spécifique en pathologie de la parole et des écoles doctorales se sont structurées pour répondre à la demande. Le soutien financier des associations de patients, les institutions et les subventions fédérales ont encouragé le développement de nombreuses recherches et programmes d'enseignement. De plus, on a pu assister, à cette période, à un fort développement des technologies informatiques et des systèmes d'acquisition acoustique au service de la phonétique clinique. Enfin, la phonétique acoustique, avec ses composantes d'acoustique descriptive, de perception et de psycho-acoustique des signaux de parole, a vu son développement assuré grâce aux études publiées par *Harvey Fletcher* (physicien, qui contribua à la théorie de la perception de la parole, inventeur de l'audioprothèse et du sonomètre). Il dirigea pendant une trentaine d'années à partir de la fin des années 20, une unité de recherche sur la parole aux Laboratoires Bell. Ses données normatives et ses paradigmes (modèles) expérimentaux sont une référence.

Une autre caractéristique de la phonétique clinique aux Etats Unis est sa forte composante interdisciplinaire et la richesse de ses publications grâce à la création de journaux de renommée internationale. Le premier journal scientifique dédié à la phonétique clinique, le *Journal of Speech Hearing Disorders*, a été inauguré en 1937 à l'université d'Ohio. En 1991 ce journal a été fusionné avec le *Journal of Speech Hearing Research (JSHR)* et devient en 1997 le *Journal of Speech, Language and Hearing Research (JSLHR)*. Le développement des différents domaines de la Phonétique Clinique a conduit à la publication d'autres journaux couvrant les différents domaines de la phonétique expérimentale et clinique comme *The Journal of Communication Disorders*, *Journal of the Acoustical Society of America* (1929), *The Journal of Fluency Disorders*.

### **I-1.5. Evolution de la phonétique au XX<sup>ème</sup> siècle en Europe**

Une division institutionnelle a longtemps existé entre les communautés de chercheurs travaillant dans les domaines de la phonétique et de la phonologie pour aborder les formes sonores du langage dans ses manifestations normales et pathologiques. La phonologie qui

étudie l'organisation des sons d'une langue est, au début du vingtième siècle, souvent décrite comme une branche de la linguistique alors que la phonétique, qui s'intéresse aux sons eux-mêmes, est divisée en trois sous-domaines acoustique, perceptif et articulatoire. Les travaux de *Roman Jakobson*, *Gunnar Fant* et *Morris Halle* (Jakobson *et al.*, 1963) ont contribué au développement et à la reconnaissance des bases phonétiques de la phonologie en intégrant les dimensions de perception et de production de la parole.

Une ouverture et une orientation nouvelle sont données à la phonologie sous l'appellation de « Phonologie de Laboratoire », sous l'impulsion de *John Ohala* (1991) et de *Janet Pierrehumbert* (1990). Elle est le fruit d'un mouvement de phonologues qui s'occupe de travaux sur « les représentations mentales de la structure sonore et de ses corrélats physiques » (Pierrehumbert *et al.*, 2000). C'est un cadre ouvert et interdisciplinaire qui accueille bien sûr différentes mouvances phonologiques mais aussi des psycholinguistes, des chercheurs en sciences cognitives, des informaticiens, entre autres. Une des spécificités de ce groupe international est de mener des recherches expérimentales en complément des données classiques de transcriptions ou de grammaticalité. Elle présente aussi l'intérêt d'avoir une *approche expérimentale multidisciplinaire* où il n'y a pas de place pour l'arbitraire. En effet, elle a recours à des sciences comme la biologie ou la physique permettant la modélisation statistique ou mathématique et de renforcer les bases scientifiques des études linguistiques, et de préciser ou d'argumenter les théories. Dans ce sens, le concept de Phonologie Articulatoire décrit par *Cathy Browman* et *Louis Goldstein* (1992) retient l'attention des phonéticiens et des cliniciens sur le concept du geste de parole. Considérée comme une théorie à part entière, elle repose sur les descriptions de langues formées par un nombre limité d'unités appelées « primitives » qui ont des caractéristiques dynamiques de gestes articulatoires résultant d'un groupe d'articulateurs fonctionnant en synergie. Cependant, comme le souligne *Cécile Fougeron* (2005), cette théorie reste en développement ; en effet, pour l'instant, elle ne permet pas encore de caractériser de façon adéquate la diversité des sons des langues du monde.

A la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, un nouvel essor est donné à l'étude de la parole par le développement des sciences cognitives et des neurosciences ainsi que le développement d'outils tels que la neuro-imagerie ou IRMf (IRM fonctionnelle) pour la compréhension du fonctionnement du cerveau au service de la neurolinguistique.

Ainsi, on voit apparaître la notion **d'interdisciplinarité** nécessaire au développement des analyses de plus en plus complexes pour l'étude de la voix et de la parole. Enfin, la

séparation entre voix et parole s'atténue progressivement pour former un continuum dans l'action d'émission des sons du langage.

### **I-1.6. De nos jours**

En Amérique du Nord, le développement de la phonétique clinique a pu se poursuivre grâce aux liens qui se sont établis entre d'une part les spécialités médicales comme l'Oto-Rhino-Laryngologie, la chirurgie maxillo-faciale ou la neurologie, et d'autre part les grands laboratoires de phonétique et de phonologie et le monde de l'ingénierie et de l'industrie. La reconnaissance universitaire de la phonétique clinique a favorisé l'enseignement et le développement des écoles doctorales.

La France commence seulement depuis quelques années à redorer le blason de la phonétique clinique en favorisant les échanges et les collaborations multi disciplinaires et en structurant un enseignement, au sein de la phonétique, permettant d'offrir aux étudiants un parcours qualifiant de master et de thèse.

A l'heure actuelle, la phonétique clinique attire des personnes venant d'horizons variés comme des médecins mais aussi des orthophonistes, des enseignants, des ingénieurs, des linguistes et des psycholinguistes. Les intérêts des uns et des autres sont différents et multiples comme la compréhension des processus de décodage acoustico-phonétique ou la recherche d'une meilleure compréhension des mécanismes neurologiques qui sous-tendent le fonctionnement cérébral pour la production de la parole ou pour explorer les mécanismes de compensation articulatoire et vocale après modification chirurgicale. Les nouvelles technologies comme la neuro-imagerie, ou l'imagerie à grande vitesse couplée à l'endoscopie pour explorer des articulateurs vélo-pharyngo-laryngés, sont d'un apport précieux.

## ***I-2. Place de ma recherche en phonétique clinique***

### **I-2.1. Spécificité de ma formation**

Chercheur au CNRS depuis 2004 et médecin spécialisé en Oto-Rhino-Laryngologie (ORL) et en Phoniatrie, mon activité de recherche et d'enseignement a pu se développer grâce à ma double appartenance d'une part au Laboratoire de Phonétique et de Phonologie (LPP) dirigé par le Pr Jacqueline Vaissière, et d'autre part à l'unité d'exploration fonctionnelle de la Voix du service ORL, dirigé par le Pr Daniel Brasnu, à l'hôpital Européen Georges Pompidou (HEGP). Depuis 2011, je participe au laboratoire d'excellence *Empirical Foundations of Linguistics* (Labex EFL, porté par le Pr J. Vaissière). Le LPP m'offre une unité de recherche et pédagogique favorisant les échanges et les collaborations interdisciplinaires sur la

production de la parole normale alors que l'HEGP représente un terrain d'étude clinique avec accès à une population porteur de différentes pathologies de la voix et de la parole et à une instrumentation sophistiquée.

Mes travaux de recherche se sont développés à partir d'une double approche, clinique et phonétique. La phonétique s'occupe, entre autres, de l'étude des sons de la parole normale et plus précisément de la production des sons articulés du langage. La clinique correspond aux écarts par rapport à la normalité. Dans ce sens, une des grandes problématiques actuelles est de définir les limites entre les variations normales au sein d'un système phonétique, phonologique et linguistique, et de déterminer les frontières du passage à la pathologie. La question qui se pose est d'établir les limites de variabilité entre la normalité et la pathologie.

La phonétique clinique s'intéresse à l'application des méthodes, des concepts et des connaissances de la phonétique à la parole produite par des personnes ayant une pathologie touchant la production ou la perception de la parole. La phonétique clinique correspond à l'émergence d'une thématique interdisciplinaire qui est l'approche physiologique et multi-instrumentale, ainsi que le développement d'un ensemble de tests objectifs et subjectifs pour améliorer la connaissance, la compréhension et l'évaluation des mécanismes de production de la voix et de la parole pathologique, les analyses morphologiques et anatomo-physiologique par imagerie et les analyses multiparamétriques, acoustiques, aérodynamiques et les tests de perception.

### **I-2.2. Spécificité de mes recherches**

Dans le cadre de ma thèse de Sciences en Phonétique (« La voix et la parole sans cordes vocales après laryngectomie partielle supracricoïdienne, étude de 20 cas avec cricohyoïdoépiglottopexie ». Université Paris 3 Sorbonne-Nouvelle. Thèse de Doctorat de Sciences Phonétiques, 1999), j'ai pu établir les bases de l'approche phonétique clinique en laryngologie en orientant mes recherches plus spécifiquement vers un domaine de la pathologie laryngée représenté par la laryngectomie partielle supracricoïdienne (LPSC). Il s'agissait des premières études sur la voix et la parole après chirurgie laryngée dont la technique permettait de modéliser les modifications laryngées et leurs conséquences phonatoires. De plus, cette étude était la première en langue française sur le français.

Une première particularité de mes recherches consiste en la mise en place d'une **méthodologie** d'exploration et d'évaluation de différentes pathologies de la production vocale. Pour cela j'ai développé, adapté ou créé des techniques instrumentales ou des **protocoles** d'évaluation fonctionnelle **multiparamétriques** perceptifs, acoustiques et

physiologiques spécifiquement adaptés aux différents types de voix pathologiques. Dans ce sens, je participe au développement de la plateforme d'investigation physiologique PEP2 du LPP installé dans le laboratoire de la Voix de l'HEGP. Il comprend différents appareils permettant de réaliser des mesures invasives et surtout non invasives pour étudier la dynamique de la parole. La plateforme d'investigation physiologique dispose, pour observer ces articulateurs, d'une station de capture de mouvements du visage, d'électroglottographie (EGG), d'échographie de la langue, de palatographie dynamique (et statique), d'électromyographie (EMG) de contact, et de l'appareil EVA (prise de données aérodynamiques, de débit et de pression, oral et/ou nasal). Le nasographe associé au fibroscope (pouvant être relié à une caméra ultra rapide) permet des prises de données simultanées pour l'étude de la nasalité. Ces données permettent des analyses qualitatives et quantitatives de la production et la perception de la parole dans son ensemble, sur les plans articulatoires, acoustiques, aérodynamiques et perceptifs à des fins de recherche fondamentale (phonétique, phonologie, phonétique clinique, typologie...), ou dans le cadre d'applications précises (prises de données chez des patients atteints de pathologies du larynx, de pathologies neurologiques, enseignements des langues, rééducation...).

Une deuxième particularité est liée au **cadre hospitalier** dans lequel se situent mes recherches. La plupart des études sont menées à l'hôpital avec des patients ce qui induit les contraintes spécifiques de nos populations que nous allons développer. De plus, chaque pathologie, qu'elle soit post-chirurgicale de la sphère oro-pharyngo-laryngée ou résultant de troubles de la commande motrice de la parole, est abordée sous l'angle de la phonétique clinique. Chaque étude amène des questions qui sont autant de sujets de recherche pour mes étudiants aussi bien en clinique qu'en phonétique. Le *but scientifique* de ces études est de comprendre le fonctionnement du vibrateur et des articulateurs dans un contexte pathologique pour en proposer des **modélisations**. Les *objectifs plus cliniques* sont de permettre à la fois d'orienter ou d'affiner le diagnostic, de tester l'efficacité fonctionnelle de certains traitements chirurgicaux et/ou réhabilitatifs, de les comparer entre eux sur des bases scientifiques, de proposer et d'adapter les méthodes de rééducation pour pallier les mutilations chirurgicales, d'orienter les compensations, pour faciliter si possible la réinsertion sociale. Elles sont donc d'un intérêt pratique et visent à améliorer la **qualité de vie** des malades en restaurant, autant que faire se peut, leur faculté de communiquer oralement. L'amélioration des résultats fonctionnels et la prise en charge du handicap vocal sont devenues une priorité en termes de santé publique dans de nombreux pays occidentaux.

Une troisième particularité et caractéristique originale de mes travaux de recherche dans le domaine de l'étude de la voix et de la parole est liée à sa place au **carrefour de plusieurs spécialités** ; elle permet des rencontres en terme de réflexions entre médecins, chirurgiens, orthophonistes d'une part et phonéticiens, linguistes et le monde des sciences informatiques et physiques d'autre part. Ces travaux favorisent donc **l'interdisciplinarité**.

Enfin, la voix et la parole ont une place à part dans notre système de communication, qu'elles soient normales (mais dans des contextes de productions vocales extrêmes comme la voix silencieuse ou chuchotée ou encore la voix professionnelle et artistique) ou pathologiques. La **complexité** de ce système tient d'une part à la **variabilité** intrinsèque (caractéristiques individuelles anatomophysiologiques ou linguistique) mais aussi paralinguistique (dimension émotionnelle), et d'autre part, à sa variabilité extrinsèque ou extralinguistique (dimension culturelle et sociale). Les grandes questions de la variabilité et la place des limites de la normalité et de la pathologie restent au centre de nos préoccupations.

### **I-2.3. Valorisation de mes recherches**

#### *I-2.3.1. Développement de l'enseignement en phonétique clinique*

Mes compétences m'ont permis de créer en 2005, un enseignement de la phonétique clinique au sein du master de phonétique organisé par l'université Sorbonne Paris Cité et d'en assurer depuis le développement. Les étudiants de tous horizons peuvent suivre ces cours et trouver des sujets de mémoire de master que j'encadre (17 mémoires de M2 dirigés). Les sujets d'étude et les problématiques sont nombreux couvrant i) les domaines de la perception et des modalités ainsi que l'identification des consonnes après pathologie du vibreur laryngé et des articulateurs lingual et buccal, ii) les modélisations articulatoires des voyelles après laryngectomie partielle iii) l'exploitation de bases de données en neurologie pour les dysarthries, ainsi que les domaines de la perception avec les surdités, les tests d'évaluation de l'intelligibilité des voyelles chez les porteurs d'implant cochléaire.

De plus, avec le Collège National d'ORL et de Chirurgie Cervico-Faciale, j'ai participé à la création de l'enseignement de la phoniatrie et de la phonétique clinique au sein de la formation initiale nationale des internes en DES d'ORL (Diplôme d'Etude Spécialisé permettant la validation universitaire et médicale de la spécialité d'ORL). Cet enseignement représente une très belle ouverture en plus de la formation chirurgicale. Cette évolution devrait donner aux futurs spécialistes des connaissances plus précises dans les domaines fonctionnels de la production et de la perception de la parole normale pour mieux comprendre les déviations pathologiques post-thérapeutiques. Les internes en médecine et en chirurgie

dentaire viennent se former auprès de moi et certains ont réalisé leurs travaux de thèse sous ma direction (Abdelhafid Seddar (25.10.05), *Actualité sur la voix et les maxillectomies*, Thèse de Chirurgie Dentaire ; Université Paris VII, (co-direction) ; Pierre-Marie Voisin (08.07.11) *Contribution à l'étude de l'intégration des prothèses amovibles par une étude phonatoire*, Thèse de Doctorat en Chirurgie Dentaire, Université Paris Diderot, Paris 7 (co-direction)).

#### *I-2.3.2. Direction de travaux de recherche*

J'accueille à l'HEGP des étudiants en orthophonie qui font leur stage de dernière année et, pour certains, leur mémoire de fin d'étude sous ma direction (1 à 2 mémoires par an).

J'ai été responsable scientifique d'un **Projet Innovant** (Université Paris3 – Sorbonne Nouvelle) « *Etude d'un aspect de la prosodie après laryngectomie partielle supracricoiïdienne* » en 2008 dans le cadre de travaux de recherche de master d'une étudiante, Lucille Wallet. Elle a poursuivi ce travail et je co-dirige actuellement sa thèse de phonétique (soutenance prévue fin 2012). Son travail se situe dans la suite de mes travaux de recherche sur la voix après chirurgie laryngée.

Je vais poursuivre mes recherches dans ce domaine en développant l'aspect aérodynamique du comportement vocal dans des conditions de modification du vibrateur et du conduit vocal à la recherche d'indices qui permettraient de comprendre l'adaptation des traits prosodiques en l'absence de vibrateur laryngé.

La rigueur des évaluations cliniques des patients présentant différentes pathologies, leur suivi longitudinal avec des enregistrements acoustiques et physiologiques réguliers m'ont permis de constituer des *bases de données* uniques en France aussi bien pour les dysarthries des patients atteints de pathologies neurologiques que les pathologies laryngées ou oropharyngées. Ces bases de données ont permis de proposer un projet ANR (**ANR 08-BLAN-0125**. « *Description Phonético-Acoustique de la Parole Dysarthrique (DesPhoAPaDy)* » (01/01/2009), Co-porteur du projet (promoteur C. Fougeron). Ce projet regroupe trois équipes partenaires qui sont le LPP, le Laboratoire Parole et Langage (LPL) d'Aix et le Laboratoire d'Informatique d'Avignon (LIA). Le projet DesPho APady vise à explorer l'étendue de la variabilité de la parole par le biais de la description des caractéristiques phonético-acoustiques de la parole dysarthrique. La parole dysarthrique correspond à une altération de la commande motrice d'origine centrale ou périphérique des gestes de la parole. Des variations importantes

existent dans la parole dysarthrique en relation avec un déficit de l'exécution temporo-spatiale des mouvements de la parole et qui affectent différents niveaux de production (respiratoire, laryngé et supralaryngé). La base de données dont je dispose à l'HEGP, en grande partie l'héritage du Dr Claude Chevré-Muller à l'époque où je travaillais avec elle à l'hôpital de la Salpêtrière, comprend plus de 1.000 enregistrements de patients adultes. Ces différents types de dysarthries seront appréhendés dans une analyse d'un nombre conséquent de patients dysarthriques francophones.

Je souhaite poursuivre mes recherches sur les pathologies de la parole d'origine neurologique en particulier en développant des tests d'évaluations dans un but diagnostic et pronostic.

La notion de handicap de parole et les recherches de moyens de réhabilitation m'ont amenée à collaborer avec le laboratoire SIGMA Lab de l'ESPCI-ParisTech (Ecole supérieure de Physique et Chimie Industrielle) dans un projet ANR programme Emergence Tec **ANR-09-ETEC-005-02** intitulé « *Restitution de la voix d'origine pour handicapés de la parole* » (REVOIX) (01/09/2009). Le porteur du projet est le Pr B. Denby (SIGMA-Lab) et je suis la responsable scientifique pour le LPP. Le projet REVOIX propose de réaliser un dispositif portatif permettant de restituer la voix d'origine aux handicapés de la parole, en pilotant un synthétiseur vocal à partir d'imagerie en temps réel de la langue et des lèvres réalisée avec un échographe miniature et une caméra vidéo. Le synthétiseur vocal étant conçu autour de techniques d'apprentissage artificiel, cet apprentissage peut être effectué à l'aide d'enregistrements de la voix d'origine de l'utilisateur avant l'ablation du larynx : le dispositif produira ainsi un signal fidèle à la voix du locuteur. Le système développé dans REVOIX offrira ainsi aux patients souffrant de ce handicap une alternative à l'électrolarynx et à la voix trachéo-œsophagienne, d'utilisation simple et intuitive, totalement non invasive ; de plus, elle seule permet un retour à la voix d'origine de l'utilisateur ; elle ne sera pas limitée par les contraintes d'apprentissage d'un mécanisme non physiologique de production vocale ni par les complications des traitements souvent associés aux laryngectomies. Il est généralement admis (l'Association des laryngectomisés) que « la perte de voix est une angoisse extrême ». Savoir qu'il y aura toujours une solution « sonore » après une intervention mutilant la voix, ou plus largement au décours d'une maladie, ou encore à la suite d'un traumatisme réduisant les possibilités de communication orale, peut être un facteur très important dans la prise en charge des patients et leur espoir de qualité de vie. Les technologies dans REVOIX

s'inscrivent dans un nouveau domaine appelé « interface de parole silencieuse », ou **Silent Speech Interface (SSI)**, actuellement en pleine émergence sur le plan international.

Au delà de ma participation à ce projet, je souhaite poursuivre l'étude de la voix silencieuse en la comparant aux autres modalités d'expression orale pour en analyser les mécanismes physiologiques, acoustiques et aérodynamiques. La compréhension de ces différentes voix normales pourrait nous éclairer sur la pathologie et guider les possibilités d'amélioration des voix pathologiques.

Dans le cadre du STIC intitulé « *Evaluation de la qualité de vie et médico-économique de la chirurgie endoscopique des cancers du larynx* » **STIC CE2L : ID RCB 2008-A00205-50** (en cours, 74 patients inclus à ce jour), je participe à l'analyse des données de qualité de la voix et de qualité de vie. L'objectif principal de ce projet est de comparer la chirurgie conservatrice laryngée par voie externe avec la chirurgie par voie endoscopique en termes de qualité de vie (échelles validées générales et spécifiques de l'EORTC (European Organization for Research and Treatment of Cancer) et de qualité de la voix (échelle de qualité de la voix avec le Voice Handicap Index (VHI) et analyses acoustiques et perceptives de la voix) et d'analyser la voix des patients atteints d'un cancer du larynx et traités soit par chirurgie par voie externe soit par chirurgie par voie endoscopique au Laser CO<sub>2</sub>.

Au delà de ce projet, mes recherches sont en cours sur la caractérisation multiparamétrique des voix après chirurgie minimale invasive par voie endoscopique au Laser CO<sub>2</sub>, et leur évolution.

La technicité multi-instrumentale du laboratoire de l'HEGP, complémentaire de celui du LPP, m'a permis de participer au projet ANR : **ANR-09-CEXC-005-01- ESAPVI** « *Etablissement d'une Plate-forme pour l'Analyse de la Parole avec Visualisation et Instrumentation* », (01/12/2010). Les progrès de la connaissance dans le domaine de la parole reposent désormais sur les nouvelles instrumentations. Les organes de la parole sont les suivants : les poumons, le larynx, et les organes supraglottiques, c'est à dire la langue, le voile du palais et les lèvres. Une plate-forme d'exploration multi-senseurs est en cours de développement au LPP (contrat mi-lourd du CNRS obtenu en 2008). Le projet se centre autour du développement des instrumentations suivantes : investigation du larynx (visualisation des vibrations des plis

vocaux par caméra haute vitesse, d'une part, et la photo-glottographie, une nouvelle technique non invasive (*brevet obtenu en 2008*) ; investigation de l'ensemble des organes supraglottiques par électromyographie de surface (non invasive), avec formation de médecins français, membres de LPP, à cette technique ; raffinement d'un sononasographe (un prototype au LPP) ; raffinement d'un masque pneumotachographique et des mesures du flux nasal et oral (Brevet en cours). Il s'agit d'un projet de recherche fondamentale, qui peut avoir des retombées industrielles, par le développement de nouvelles instrumentations.

Grâce au développement de cette plate-forme expérimentale et technologique, j'ai collaboré à la valorisation d'une invention réalisée au LPP et à l'HEGP par les Professeurs Kiyoshi Honda et Shinji Maeda pour la *mesure de l'ouverture glottique* en phonation pour les sons isolés et en parole continue. Il s'agit d'un photo-glottographe externe (ePGG) qui est un précédé d'illumination du larynx par voie externe avec une lumière LED placée au dessus des plis vocaux. Le but est de capter la quantité de lumière qui franchit le plan glottique pendant la parole grâce à un photo-détecteur placé sous le cartilage thyroïde. Ce précédé unique et novateur par le caractère non invasif est un bon complément aux mesures de fermeture glottique avec l'électroglottographe (EGG) et peut être couplé à d'autres explorations de la parole. Il a fait l'objet d'un **dépôt de brevet CNRS** enregistré en juin 2007 (FR N° 0755757). Une autre invention du Pr Shinji Maeda qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet CNRS est pneumotachographe jetable, libre de toute distorsion acoustique, qui permet selon une méthode non invasive d'enregistrer les signaux acoustiques et aérodynamiques.

Cette plate-forme instrumentale constitue un centre de référence attirant de nombreux visiteurs nationaux et internationaux pour des prises de données et des collaborations scientifiques.
---

#### *I-2.3.3. Diffusion scientifique*

Outre la participation à de nombreux colloques, conférences et congrès (voir CV), j'ai pu mesurer l'intérêt en France pour la phonétique clinique lorsque j'ai organisé avec le LPP et le service ORL de l'HEGP les **Premières Journées de Phonétique Clinique**, le 11 mars 2005 au Carré des Sciences à Paris. Le succès de ce colloque, avec plus de 120 participants francophones d'horizons multidisciplinaires, étudiants et confirmés, tant phonéticiens, ingénieurs mais aussi cliniciens, nous a montré qu'il y avait une vraie demande de partage et d'échange et un besoin de collaboration pour développer la phonétique clinique. La

phonétique expérimentale et la phonologie de laboratoire sont des sciences qui ont besoin de données issues de l'observation du comportement humain dans l'acte de communication pour la compréhension des phénomènes phonétiques de production et de perception de la voix et de la parole. La Phonétique Clinique devrait permettre de développer des bases de données acoustico-physiologiques normales et pathologiques. Je fais partie du comité scientifique permanent des Journées de Phonétique Clinique et nous avons réussi à initier une tradition avec l'organisation de ces journées tous les 2 ans par différents laboratoires de phonétique (Grenoble, 2007 ; Aix, 2009 ; Strasbourg, 2011) et prochainement leur organisation en Belgique en 2013.

Mon expertise dans le domaine de la voix et de la parole pathologique m'a amenée à être nommée expert auprès de la Haute Autorité de Santé (HAS).

J'ai aussi été nommée expert dans une Expertise Collective pour le compte de l'INSERM et de la MGEN (Mutuelle Générale de Education Nationale) sur la voix des professionnels. Il s'agissait de faire une évaluation de la situation professionnelle vocale des enseignants en France et de proposer des améliorations tant pour la formation des enseignants que pour leurs conditions d'exercice.

Membre de nombreuses sociétés savantes, je suis *Secrétaire Générale* de la Société Française de Phoniatrie et des Pathologies de la Communication, réélue pour un troisième mandat de trois ans. Dans ce contexte, je suis amenée à organiser un congrès national annuel pour 200 participants et une session thématique annuelle dans le cadre de la Formation Continue des Médecins. J'assure un rôle de valorisation professionnelle et participe aux négociations avec nos instances dirigeantes sur la reconnaissance des actes et de la profession.

La problématique que je me suis posée tout au long de mes recherches et à laquelle j'ai cherché à apporter des éléments de réponse, correspond à des études dans trois domaines : i) un domaine méthodologique avec la normalisation et la quantification de protocoles d'explorations multiparamétriques, physiologiques, acoustiques et perceptives de la qualité de la voix et de l'intelligibilité de la parole normale et pathologique, ii) la compréhension des mécanismes de compensation suite aux différents traitements, grâce aux analyses objectives des organes de production et de la fonction vocale en pathologie afin de proposer d'une part des modélisations et d'autre part, au patient, une meilleure qualité de vie associée à la réinsertion sociale, iii) le développement de l'interdisciplinarité elle-même indispensable à la réflexion sur la variabilité et la complexité de nos systèmes de production de la voix et de la parole.

Par leur richesse et leur variété, mes sujets d'études sont i) des outils pédagogiques phonétiques et cliniques aussi bien pour l'enseignement que pour diriger les étudiants dans leur recherche, ii) des thématiques intéressant aussi bien les linguistes, les phonéticiens, les ingénieurs que les cliniciens et stimulant les collaborations, iii) des instruments pouvant être à l'origine de valorisations externes au travers de brevets.

Je souhaite poursuivre mes travaux de recherche non seulement sur les voix pathologiques mais aussi compléter notre compréhension des mécanismes qui sous-tendent la production de voix extrêmes comme dans certaines activités vocales chantées ou les voix chuchotées, ainsi que la caractérisation des comportements pharyngo-laryngés dans la réalisation des traits phonologiques de différentes langues du monde.

Mes travaux de recherche ont porté principalement sur le versant de la production de la voix et de la parole normale et pathologique. La parole correspond à l'articulation, par le conduit vocal, des sons produits au niveau de la source vibratoire en respectant un enchaînement, une coordination et une chronologie déterminée. La phonation est le résultat d'actions complexes venant des forces aérodynamiques, des contractions musculaires et des propriétés biophysiques et histochimiques des tissus. Les structures intervenant dans la production de la voix sont centrées sur le larynx, et son fonctionnement est déterminant pour les dimensions linguistiques segmentales pour les voyelles et les consonnes mais aussi suprasegmentales pour les variations prosodiques. De plus, il joue un rôle dans l'information extralinguistique véhiculée par la qualité vocale, cette dernière renseigne sur les particularités du locuteur.

Avant d'aborder la description de mes recherches, je présenterai rapidement quelques notions de physiologie laryngée qui vont nous servir à la compréhension de certaines pathologies.

### ***I-3. Apport de la physiologie pour l'étude de la phonation***

Pour mieux comprendre les conséquences des laryngectomies partielles sur la production de la voix et de la parole, ainsi que les mécanismes à mettre en place pour compenser les modifications du vibrateur et du conduit vocal, nous ferons un rapide rappel anatomophysiologique des structures impliquées dans la phonation.

#### **I-3.1. Le larynx et la fonction phonatoire, notions de phylogénèse**

Chez la plupart des mammifères, le larynx est haut situé, très proche du nasopharynx, et participe principalement à la fonction respiratoire. Les plis vocaux ont une variabilité de forme et de volume selon les espèces mais se ferment en général selon un axe longitudinal antéropostérieur donnant au larynx une forme en « T ». L'oropharynx est quasi inexistant et la langue est située exclusivement dans la cavité orale (Laitman *et al.*, 1993). Ces configurations anatomiques trouvées chez les mammifères ne sont pas propices à la production de la parole. En effet, selon *Lieberman* (1972), la production de la parole chez l'homme est favorisée par des modifications phylogénétiques que sont la croissance avec la descente du larynx, le raccourcissement du voile du palais et le recul de la racine de la langue ainsi qu'une flexion de la base du crâne.

Chez le nouveau né, donc au début de la vie extra-utérine, le petit de l'homme a un larynx assez semblable à celui des autres mammifères non humain ; en particulier, le larynx est situé haut dans la région cervicale entre la première et la 4ème vertèbre cervicale (de C1 à

C4), alors que, chez l'adulte, il s'étend de C4 à C6. La respiration est quasi-exclusivement nasale pendant les premiers mois de la vie et il faut attendre le début du processus de descente du larynx pour que le volume et la place de la racine de la langue permettent une respiration buccale. Au cours des six premiers mois, on assiste d'une part à la maturation du système nerveux central aussi bien pour la motricité que la sensibilité laryngée et les fonctions réflexes, d'autre part à la descente progressive du larynx qui va entraîner avec lui la racine de la langue et l'os hyoïde. A partir de l'âge de 2 à 3 ans, l'articulation des sons de la parole devient possible grâce à l'indépendance de la racine de la langue par rapport à la langue mobile antérieure et l'augmentation de la taille du pharynx. En effet, selon *Lieberman* (1972), le nourrisson ne peut produire les voyelles cardinales [a, u, i] car le conduit vocal est trop court. Ce point de vue a été contesté par *Boé et al.* (2002) en utilisant un nouveau modèle articulatoire anthropomorphique permettant de créer un espace vocalique par la simulation de voyelles d'un point de vue acoustique et morphologique. Un larynx en position basse et un pharynx large ne sont pas des pré-requis à la production des sons de la parole. Cependant, il est à noter que cette évolution vers une fonction phonatoire du larynx se fait au détriment des fonctions de protection des voies respiratoires qu'assure le larynx dans les autres espèces. La plupart des vertébrés ont un accolement de l'os hyoïde au cartilage thyroïde ce qui empêche le contrôle indépendant de la langue et du larynx (*Honda et al.*, 1994). Chez l'homme, la descente du larynx serait probablement une conséquence morpho-fonctionnelle des réorganisations neuro-crâniennes avec une augmentation du cortex préfrontal et une croissance très importante des maxillaires (*Kent*, 1997). La descente du larynx est multifonctionnelle et, selon *Honda & Fujimura* (1991), elle a probablement favorisé i) l'indépendance entre larynx et langue qui n'est cependant pas parfaite. La mobilité linguale et le mode vibratoire des plis vocaux (désormais PV) sont principalement utilisés au niveau segmental pour différencier les phonèmes, alors que la fréquence de vibration des PV est utilisée à des fins suprasegmentales ; ii) l'augmentation de la mobilité de la langue pour les voyelles permettrait de différencier les voyelles antérieures et postérieures. Pour les consonnes, la descente du larynx a permis de mieux différencier un plus grand nombre de places d'articulation ; iii) un meilleur contrôle de l'indépendance de la source et du filtre, du mode vibratoire des PV, de l'espace glottique (degré de fermeture des PV) et de l'ajustement de la hauteur du larynx.

Les chirurgies partielles supracricoïdiennes (LPSC) recréent un néo-larynx ayant de nombreuses caractéristiques rappelant celui du nouveau né, en suturant le cartilage cricoïde à l'os hyoïde et à la racine de la langue, responsable d'un raccourcissement du conduit vocal et limitant l'indépendance de la langue.

Toute chirurgie modifiant le vibreur et/ou le conduit vocal aura des retentissements variables sur la position du larynx ainsi que ses relations avec l'oropharynx. Ces répercussions sont déterminantes pour la qualité de production de la voix et de la parole ainsi que pour les possibilités de compensations.

### **I-3.2. Particularités des tissus laryngés chez l'homme**

Une autre caractéristique qui différencie le larynx humain de celui des autres mammifères, est en rapport avec la structure histologique des PV. Une couche de tissu conjonctif, appelée la *lamina propria* (Hirano, 1974), située entre la muqueuse et le muscle vocal, n'existe pas chez les autres mammifères. La *lamina propria* est composée de trois couches : i) la couche superficielle est constituée de peu de fibres de collagène et peu d'élastine, mais une grande proportion de substance fondamentale contenant de l'acide hyaluronique. Ce tissu lâche est appelé *l'espace de Reinke* et il aurait comme propriété de permettre le glissement de la muqueuse sur les plans plus profonds et de permettre une vibration de la muqueuse indépendamment du mouvement musculaire ii) les couches intermédiaires et profondes de la lamina propria qui constituent le *ligament vocal*, sont constituées de fibres d'élastine (participant probablement à l'oscillation élastique au cours du cycle vibratoire) et de fibres de collagène donnant une certaine rigidité au système vibratoire (Kahane, 1998). Les contractions des muscles vocaux vont déterminer la rigidité du système vibratoire. Par ailleurs, autre particularité, la lamina propria peut se régénérer grâce à la présence de structures appelées *macula flavae* situées à chaque extrémité du pli vocal au niveau de la commissure antérieure et en regard du processus vocal (Sato *et al.*, 2000). Ces structures n'apparaissent que vers l'âge de 6 – 7 ans expliquant certaines caractéristiques de la voix de l'enfant.

Ainsi, les propriétés physiologiques de la lamina propria confèrent aux plis vocaux des qualités vibratoires particulières, responsables de la qualité vocale et du timbre de la voix. Cette connaissance anatomophysiologique laryngée est fondamentale pour comprendre et surtout préserver au mieux les qualités vocales lors de toute microchirurgie des PV (chirurgie fonctionnelle visant à traiter une lésion bénigne du plan glottique appelée phonochirurgie (Bless, 1991 ; Giovanni, 2000) et de la chirurgie laryngée en générale. Elle permet aussi de mieux comprendre les modifications observées après traumatisme vocal ou forçage vocal lors de l'utilisation inappropriée de la voix.

### **I-3.3. Rappel des notions de physiologie de la phonation**

#### *I-3.3.1. Les théories oscillo-impédantielles*

Les théories myoélastiques et aérodynamiques décrites par *Van Den Berg* (1958) ont grandement contribué aux fondements des modèles de fonctionnement des plis vocaux et à expliquer les phénomènes de phonation (Titze, 2006). La fréquence et le mode de vibration des PV sont fonction d'une part de facteurs myoélastiques qui agissent sur les différentes structures (muqueuse, ligamentaire et musculaire) des PV, et d'autre part de facteurs aérodynamiques qui régulent la pression sous-glottique, les débits et volumes expiratoires ainsi que la résistance glottique selon son degré de fermeture (Hirose, 1997). La pression sous-glottique vainc la résistance due à l'accolement des PV et force ceux-ci à s'écarter. Leur rapprochement est lié à l'élasticité cordale et à un effet de succion encore appelé *phénomène de Bernoulli*. Mais cette théorie n'expliquait pas la régulation précise et simultanée de la fréquence fondamentale du son et de sa puissance.

Le concept oscillo-impédantiel décrit par Hirano (1981a) et complété par les ajustements de la théorie oscillo-impédantielle de Dejonckère (1981) met en jeu le vibreur (les PV) considéré comme un *oscillateur* à faible degré d'amortissement, transformant la pression expiratoire provenant de la soufflerie pulmonaire en une pression pulsée dont la fréquence de répétition est identique à celle de l'oscillateur. De ce modèle vient la théorie du « body-cover » (corps-couverture) (Hirano *et al.*, 1985), grâce aux caractéristiques de la structure histologique des PV ; le corps est représenté par le muscle vocal et la couverture par la muqueuse, ces deux structures étant séparées par l'espace de Reinke permettant les mouvements de glissement et d'ondulation de la muqueuse par rapport aux structures musculo-ligamentaire sous-jacentes. La muqueuse est passive et ondule sous l'effet des

contractions musculaires et des pressions expiratoires lors de la phonation (Hirano *et al.*, 1986 ; Laver *et al.*, 1992). Le vibrateur laryngé met l'air expiratoire en mouvement et participe à la transformation de l'énergie aérienne en énergie acoustique sous forme d'une onde de pression acoustique ou voisement. Pour produire un son, il faut schématiquement une fermeture des PV qui va permettre l'augmentation de la pression d'air sous-glottique. A partir d'une certaine pression aérienne, l'air expiré va vaincre la force musculaire de fermeture des PV et les amène à s'écarter de bas en haut, créant un déphasage de vibration muqueuse entre bord inférieur et bord supérieur des PV et une égalisation de pression sus- et sous-glottique. Puis un rapprochement des PV va se produire du fait de l'élasticité musculaire et de la diminution de la pression trans-glottique qui favorise le phénomène de Bernoulli (rétro aspiration du bord inférieur des PV qui s'accroche de nouveau) ce qui rétablit la résistance glottique et la pression sous-glottique. Ainsi, tant qu'une pression sous-glottique est maintenue, on observe un mouvement cyclique avec oscillations des PV pour produire un son périodique ou quasi-périodique. La fréquence de vibration des PV correspond à la fréquence fondamentale (F0) exprimée en Hz.

L'activité des muscles laryngés agit sur le degré d'ouverture et de fermeture glottique, la position des cartilages aryénoïdes, ainsi que sur la force de contraction du muscle vocal et la tension du ligament vocal ; cette activité musculaire influence les caractéristiques vibratoires du muscle vocal et ondulatoires de la muqueuse. Associées aux variations de pressions sous-glottiques, ces activités musculo-muqueuses interviennent dans la production des différents sons laryngés.

#### *I-3.3.2. Les théories de dynamique non linéaire*

Cependant, comment expliquer les altérations vocales qui peuvent survenir en dehors de toute pathologie et a fortiori en cas d'asymétrie du vibrateur laryngé ? Le développement des théories de « *dynamique non linéaire* » a bouleversé la physique et a modifié nos conceptions des processus de contrôle biomécanique et physiologique. La théorie du chaos suggère que la non-linéarité inhérente à chaque système peut être à l'origine d'un comportement imprévisible, mais non aléatoire, même si le nombre de degrés de liberté est faible. La non-linéarité du tissu et de ses interactions a été proposée par Titze (1990) pour expliquer certaines irrégularités du mouvement des PV. La théorie du chaos pourrait proposer un modèle de production vocale qui expliquerait le fonctionnement pathologique de la phonation (Titze *et*

*al.*, 1993). Comme la non-linéarité et l'irrégularité font partie de notre système phonatoire, il ne serait pas surprenant de voir des épisodes d'aphonie au cours de la parole normale.

Les travaux de *Giovanni* (1999) sur la voix pathologique ont contribué à la compréhension des mécanismes responsables d'asymétrie de vibration des PV par un phénomène de désynchronisation du couplage entre les deux structures du vibrateur laryngé ce qui pourraient participer à l'irrégularité vocale. Le couplage entre les PV est un des mécanismes non linéaires qui permet la régulation et la synchronisation de la vibration de la muqueuse des PV. Par ailleurs, pour les analyses acoustiques objectives de la voix, ses travaux ont aussi montré l'intérêt d'avoir recours à des méthodes de calculs utilisés en dynamique non linéaire comme les portraits de phase qui sont utilisés pour démontrer que les anomalies rencontrées étaient la conséquence de la non linéarité de la fonction glottique. La détermination du coefficient de Lyapunov permet la quantification de la complexité de ces portraits de phase. Les mesures acoustiques classiques utilisant des paramètres d'instabilité instantanée tels que le Jitter et le Shimmer ne permettent pas toujours de mesurer les anomalies du signal de parole et le calcul du coefficient de Lyapunov est une méthode complémentaire (*Giovanni et al.*, 1999).

Ainsi toute modification constitutionnelle de l'oscillateur entraînera une modification du mode et de la régularité vibratoire. Si on augmente la masse (présence d'une tumeur bénigne ou maligne), il y aura un abaissement de la F0. Une augmentation de la rigidité (lésion invasive ou tissus cicatriciel) va augmenter la F0 et abaisser la sonie. Un obstacle à la bonne fermeture des PV (lésion touchant le bord libre des plis vocaux ou défaut de fermeture dans les incompétences fonctionnelles ou organiques comme les paralysies laryngées) va provoquer l'apparition de bruit acoustique surajouté et de souffle. Enfin, une asymétrie entre les 2 PV va entraîner des perturbations avec irrégularité de la vibration des PV en fréquence et en amplitude.

Dans la suite du document, j'organise la présentation de mes travaux de recherche en trois chapitres. Le premier décrit des travaux que j'ai pu mener pour établir des règles méthodologiques en tenant compte des contraintes spécifiques aux recherches en phonétique clinique. Les populations étudiées et leurs pathologies vont dicter des règles concernant aussi bien la taille des échantillons, pour avoir une fiabilité des résultats, que la notion d'évolution dans le temps pour le suivi longitudinal et permettre ainsi d'établir des profils de récupération. Dans le deuxième chapitre, j'aborde plus particulièrement la biomécanique laryngée et ses conséquences phonatoires. D'une part, en pathologie, chaque chirurgie laryngée peut être considérée comme représentant un modèle anatomique de vibrateur et/ou de conduit vocal modifié. J'ai pu évaluer l'importance des conflits entre l'articulation et la phonation et les réorganisations nécessaires pour maintenir une efficacité de la parole. D'autre part, hors pathologie, les mécanismes qui mettent en jeu les différentes structures laryngées apportent un éclairage sur certains comportements laryngés au service de la phonétique des langues et des réalisations artistiques vocales. J'aborde la problématique de l'identification du voisement qui va constituer un de mes principaux axes de recherche dans différentes modalités phonatoires. Les deux derniers chapitres sont consacrés aux caractérisations acoustico-perceptives et articulatoires de la parole pathologique, soit dans les suites des chirurgies laryngées, soit résultant de la mise en place endobuccale de contraintes extérieures pour tester les possibilités de réadaptation articulaire. Ce mémoire se termine par la présentation de mes projets de recherche.

## II MES TRAVAUX DE RECHERCHES

Avant de présenter mes différentes recherches, certaines particularités propres aux études en phonétique clinique doivent être soulignées. Ces particularités sont d'ordre méthodologique en rapport avec les contraintes liées à la population, au choix du matériel et aux protocoles que nous allons utiliser. Elles sont aussi liées aux spécificités biophysique, biomécanique et physiologique des structures anatomiques explorées et des pathologies étudiées.

### *II-1. Les contraintes méthodologiques en phonétique clinique*

Dans le domaine de la voix et de la parole, une connaissance approfondie des *mécanismes anatomophysiologiques* intervenant dans la production vocale et des *facteurs physiopathologiques* modifiant les structures impliquées dans cette production est indispensable pour comprendre toute la dimension des processus déviants et pour rechercher les possibilités de compensations en vue de proposer une réadaptation

Par ailleurs, la maîtrise des différentes *techniques d'exploration* physiologiques, acoustiques et perceptives m'a permis d'orienter et de guider mes travaux de recherche ainsi que ceux des étudiants que j'ai encadré.

Enfin, la connaissance des différentes *techniques chirurgicales, des traitements médicaux* et des possibilités de *réhabilitation* ainsi que la collaboration avec d'autres intervenants m'ont permis de développer mes recherches pour améliorer les résultats fonctionnels post-thérapeutiques en respectant les limites anatomo-physiologiques des patients.

#### **II-1.1. Les contraintes liées aux modalités des études en phonétique clinique**

##### *II-1.1.1. Les études longitudinales*

Sachant que les analyses objectives de la voix normale présentent une grande variabilité intra- et interindividuelle, les *études longitudinales* avec évaluations avant et/ou après traitement sont d'un intérêt réel, le sujet étant son propre témoin.

Ainsi, pour toutes les études concernant la voix et la parole pathologique et impliquant des patients, je me suis attachée à appliquer le concept d'étude longitudinale *prospective* intra- et inter-individuelle. Les patients ayant subi une chirurgie oro-pharyngo-laryngée ou porteurs de pathologies de la voix et de la parole liées à un trouble de la commande motrice ont été enregistrés et étudiés à différents temps pour en suivre l'évolution. Cependant, nous

devons tenir compte des difficultés propres aux études longitudinales avec des patients c'est-à-dire, les reconvoctions à intervalle régulier et le respect de la chronologie des enregistrements. Les contraintes sont d'autant plus importantes qu'il s'agit de patients fatigables, ayant souvent d'autres traitements et d'autres rendez-vous ; enfin la gestion du « timing » pour le suivi des patients nécessite toujours le respect de la dimension humaine et émotionnelle avec les aléas de la disponibilité des patients et de leur acceptation à participer aux études. Tous les patients ont signé un consentement éclairé avant de participer à une étude, même si les examens font parti du suivi habituel de la pathologie.

#### *II-1.1.2. Taille des échantillons*

Une autre contrainte que je me suis imposée concerne le nombre de patients. Nous avons cherché à obtenir pour toutes nos études un *nombre suffisant de patients* constituant des *groupes homogènes* et des *groupes de témoins*, permettant une meilleure comparaison. En effet, il n'est guère possible d'avancer des conclusions à partir de l'étude de deux ou trois cas. Ce souci de *taille d'échantillon* doit permettre de proposer et de tester des protocoles pour en vérifier l'adéquation ; par ailleurs, la quantité d'échantillons est une garantie pour déterminer la fiabilité des mesures même si le nombre ne permet pas toujours d'avoir une puissance statistique. Là encore, cette exigence de nombre est une des difficultés des études cliniques prospectives.

#### **II-1.2. Les contraintes liées au choix du matériel**

Toutes nos études reposent sur l'analyse de la voix et de la parole tant du point de vue physiologique (exploration en vidéo-endoscopie et imagerie) qu'acoustique et perceptif (matériel et local d'enregistrement, analyse et compréhension des données). Pour avoir recours à du matériel sophistiqué, il faut le maîtriser d'un point de vue technique, savoir adapter son fonctionnement pour optimiser les résultats et parfois en créer de nouveaux. J'ai donc été amenée à tester de nombreux matériels d'exploration physiologique pour l'évaluation objective des mouvements de la région oro-pharyngo-laryngée et de leurs coordinations ainsi que l'observation des mécanismes et des stratégies de compensations.

Nous avons travaillé en collaboration avec des ingénieurs pour faire un choix raisonné des meilleures techniques pour les enregistrements physiologiques, acoustiques et perceptifs et pour la synchronisation des différentes données. Le recueil, le stockage et le traitement des données demande aussi de bien connaître les différents outils informatiques et les logiciels existants et savoir recourir à ceux qui correspondent aux études voulues. Par exemple, la

compréhension du comportement du vibreur laryngé lors de la réalisation des consonnes sourdes/sonores a été enrichie par l'apport des données multiparamétriques résultant du couplage et de la synchronisation de signaux provenant d'enregistrements utilisant les techniques d'électroglottographie (EGG), d'acoustique et de visualisation en vidéoendoscopie du larynx.

Cependant, certaines études sont limitées par le caractère invasif ou pénible d'instruments et sont à prendre en considération pour les études cliniques. Nous devons veiller à la longueur des enregistrements si possible en position assise pour éviter la fatigue, vérifier le confort du patient lors du port d'un casque ou tout autre matériel servant au support de capteurs. Pour cela il est important de les tester sur nous-mêmes. D'autres examens invasifs comme le radiocinéma ne peuvent être envisagés que s'ils rentrent dans le cadre du suivi des pathologies. Par exemple, j'ai mis en place et dirigé la première étude permettant de visualiser en radiocinéma les différents phénomènes articulatoires après laryngectomie partielle supracricoidienne (LPSC). Cet examen a été restreint à deux patients qui devaient avoir une exploration de la déglutition. Dans le cadre de notre recherche en phonétique clinique, cette exploration a permis de confirmer la position haute du néovibreur et d'objectiver les phénomènes de compensation articulatoire lors de la réalisation des différentes voyelles. Nous reverrons plus en détail les résultats de cette étude. Ce travail a nécessité une collaboration et une coordination avec le service de radiologie, les sujets volontaires et la convocation des patients. En fait, chaque étude demande de mobiliser et d'exploiter les compétences et les moyens fournis par les différentes partenaires. Mon rôle était donc de savoir sélectionner le matériel et la méthode au service de mes études et de celles que j'encadre.

### **II-1.3. Les contraintes liées aux pathologies et aux techniques chirurgicales**

#### *II-1.3.1. Les cancers du larynx et les laryngectomies totales*

Les cancers du larynx atteignent les principaux organes de la vie de relation car ils modifient la production de la voix et la parole. Une meilleure connaissance de l'évolution du cancer du larynx et de ses extensions, le développement des techniques chirurgicales lié aux progrès de l'asepsie, de l'antibiothérapie et de l'anesthésie améliorant ainsi les suites opératoires et la notion de qualité de vie, ont conduit à une évolution du schéma thérapeutique.

La première laryngectomie totale a été réalisée par Theodor Billroth à Vienne en 1873 (Weir, 1973). Une laryngectomie totale (LT) consiste en l'ablation de tout le larynx créant une discontinuité entre la trachée et le pharynx. Les voies respiratoires vont s'arrêter en haut

de la trachée et cette dernière sera suturée à la peau du cou pour permettre la respiration. Cet abouchement de la trachée à la peau s'appelle un « trachéostome ». Le carrefour aérodigestif est profondément modifié et le pharynx est abouché directement au sphincter supérieur de l'œsophage (SSO). L'alimentation se fait par les voies naturelles mais la respiration se fait par le trachéostome. La phonation nécessite la création d'un vibreur puisque les plis vocaux ont été enlevés. Ce nouveau vibreur sera la bouche de l'œsophage (ou sphincter supérieur de l'œsophage SSO). Le son est produit par la mise en vibration du SSO pour produire soit une voix œsophagienne (VO) lorsqu'une « gorgée » d'air est déglutée et ressort sous forme d'éruclation, soit une voix trachéo-œsophagienne (VTO) si une prothèse encore appelée implant phonatoire, est mise en place entre la trachée et l'œsophage. L'air expiratoire qui vient des poumons, va passer par la trachée et sera dirigé vers l'œsophage grâce à l'implant phonatoire. Dans les deux cas, VO et VTO, c'est le SSO qui est mis en vibration, produisant un son grave, rauque et irrégulier. La différence entre ces deux voix repose sur la source aérienne : dans le cas de la VO, l'énergie aérienne provient du petit volume de l'air buccal avalé puis roté, alors que pour la VTO l'énergie aérienne provient des poumons et présente un volume plus important, et un débit modulable. Enfin, un troisième mode de phonation est réalisé par l'utilisation d'un électrolarynx qui est un générateur d'onde sonore de synthèse. Il permet d'articuler un son émis par l'électrolarynx qui est placé sur la peau du cou pour permettre le passage de l'onde sonore vers le conduit vocal qui va le moduler pour obtenir une parole articulée. La voix produite, voix électronique, à un timbre métallique, peu esthétique et sans variations de hauteur ni d'intensité. Cet outil de communication est utilisé en cas d'échec des deux autres modes de phonation.

Les Laryngectomies totales sont responsables d'une mutilation sévère, détruisant l'image de l'individu dans les domaines physique, émotionnel et communicationnel. Ce handicap majeur a été une des motivations pour proposer un projet de recherche que nous reverrons dans le cadre de l'ANR REVOIX.

L'évolution des techniques chirurgicales de la laryngectomie totale vers les laryngectomies partielles a permis de proposer, quand l'étendue de la lésion le permettait, une chirurgie moins délabrante en réduisant l'étendue de l'exérèse. Les conséquences fonctionnelles étaient la préservation des trois principales fonctions physiologiques de la sphère oro-pharyngo-laryngée, à savoir une alimentation orale correcte, une respiration par les voies naturelles avec respect de l'intégrité physique sans trachéostomie et une communication en utilisant la voix et la parole.

### *II-1.3.2. Les cancers du larynx et les laryngectomies partielles par voie externe*

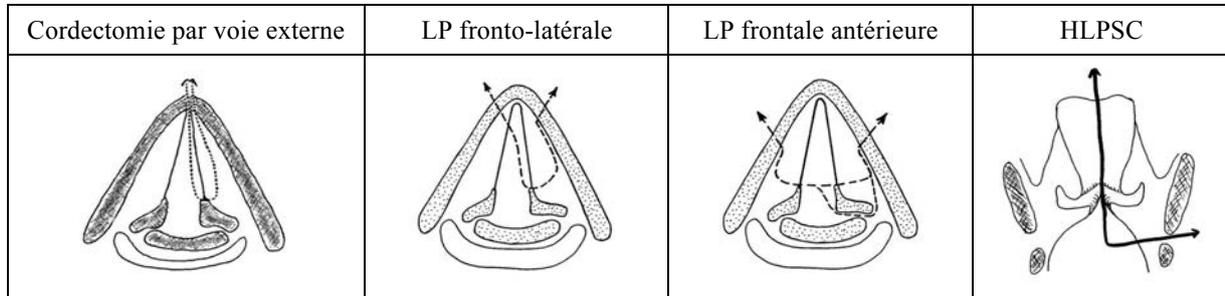
Il fallut attendre près d'un siècle pour assister à une évolution des techniques chirurgicales qui ont permis la réalisation d'une laryngectomie partielle avec préservation de la continuité entre la trachée, le reliquat laryngé et le pharynx et donc de la continuité respiratoire par les voies naturelles. La technique chirurgicale de laryngectomie partielle la plus mutilante par son étendue chirurgicale est la laryngectomie partielle supracricoïdienne (LPSC) (Laccourreya *et al.*, 1987 ; Laccourreya *et al.*, 1990 ; Piquet *et al.*, 1991 ; Chevalier *et al.*, 1997). Son indication remplace la laryngectomie totale, à condition que la mobilité aryénoïdienne soit conservée et que la tumeur soit limitée au larynx. Cette technique chirurgicale s'est développée en Europe dans les années 60 et aux Etats Unis depuis les années 90. Eviter la trachéostomie définitive est un progrès social majeur pour les patients. La prise en charge postopératoire doit tenir compte des possibilités de survie souvent longues et l'objectif de restaurer la voix et la parole s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la qualité de vie. Il faut non seulement restaurer les fonctions de respiration et de déglutition mais aussi une voix qui permette une réinsertion sociale et parfois professionnelle.

Différents types de laryngectomie partielle se sont développées selon l'étendue de la lésion à traiter et consistent en l'exérèse de tout ou partie du plan glottique (un ou deux plis vocaux) d'une partie variable du cartilage thyroïde, et d'une partie plus ou moins importante de la région supra glottique (bandes ventriculaires, cartilage aryénoïdes), parfois étendu aux structures avoisinantes comme l'épiglotte et la racine de la langue. Cette évolution a été un véritable progrès technique tout en respectant les règles carcinologiques des traitements du cancer. Cependant, les modifications du conduit vocal, mêmes minimales, peuvent avoir des conséquences sur la qualité de la voix et l'intelligibilité de la parole.

Pour préserver ces fonctions de déglutition, de respiration et de phonation, les chirurgies partielles du larynx par voie externe nécessitent la conservation de la dynamique de deux structures anatomiques fondamentales qui sont d'une part le cartilage cricoïde qui maintient la filière respiratoire en ouverture pour la respiration, et d'autre part l'unité cricoaryénoïdienne mobile pour la déglutition et la phonation. Nous pouvons considérer deux grandes catégories de laryngectomies partielles selon le plan de résection vertical ou horizontal. Au sein des laryngectomies partielles verticales (schémas), par importance croissante de l'étendue de l'exérèse, nous pouvons décrire les cordectomies par voie externe qui sont devenues exceptionnelles, les laryngectomies partielles fronto-latérales (LPFL) qui sont à l'heure actuelle rarement réalisées car remplacées par les chirurgies endoscopiques au

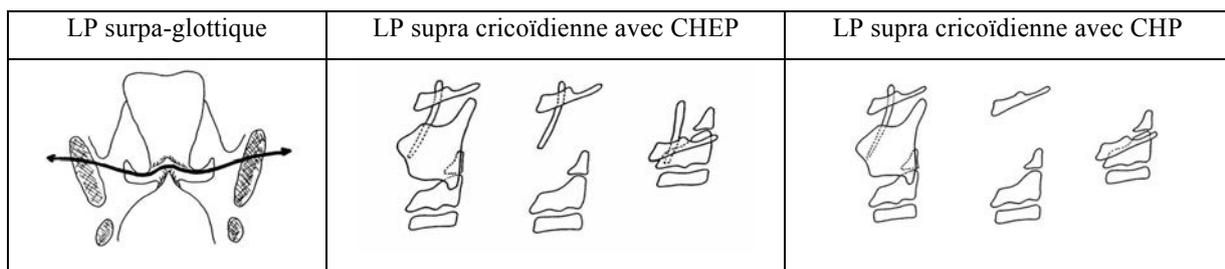
laser, et les héli-laryngo-pharyngectomies (HLPSC) emportant tout un hémilarynx (Laccourreye *et al.*, 1988).

Schéma des laryngectomies partielles (LP) en coupe horizontale pour les trois premiers schémas et en coupe frontale pour l'héli-laryngo-pharyngectomie supra cricoïdienne.



En ce qui concerne les laryngectomies partielles horizontales (schéma), nous avons les laryngectomies partielles supraglottiques qui correspondent à la résection de l'épiglotte parfois étendue à la racine de la langue mais qui ne descendent pas jusqu'au plan glottique, et les laryngectomies partielles supracricoïdiennes (LPSC) qui emportent tout le plan glottique (plis vocaux, bandes ventriculaires, cartilage thyroïde ainsi que l'espace paraglottique) suivi d'une reconstruction en suturant le cartilage cricoïde à l'os hyoïde.

Schéma des laryngectomies partielles (LP) en coupe de face pour la LP supra-glottique et en coupe de profil pour les LPSC. Pour ces deux derniers, le schéma représente les structures cartilagineuses avant l'intervention puis les structures qui sont préservées (cartilage cricoïde, cartilages aryénoïdes, partie supérieure de l'épiglotte et l'os hyoïde et enfin, le mode de reconstruction : CHEP : cricohyoïdoépiglottopexie et CHP : cricohyoïdopexie



Ces dernières techniques de laryngectomie partielle supracricoïdienne réalisent un *modèle anatomo-physiologique* de conduit vocal raccourci d'environ 3 cm, avec suture du cartilage cricoïde à l'os hyoïde, et capable de produire une voix alors que les deux plis vocaux (PV) ont été réséqués. Mes recherches, d'abord dans le cadre de ma thèse

[1999], et que j'ai poursuivis, se sont principalement intéressées à la compréhension et aux caractéristiques biomécaniques et acoustiques de ce modèle.

Toutes ces laryngectomies partielles qui enlèvent au moins un pli vocal vont donner une *voix dite de « substitution »*, encore peu connue et dont les caractéristiques acoustico-perceptives ont fait l'objet de mes études.

L'étude des *degrés de liberté* dans le fonctionnement du vibrateur laryngé pathologique a ouvert une voie de compréhension de la dynamique des articulateurs laryngés, glottiques et aryépiglottiques chez des sujets sains dans différentes langues et expressions artistiques.

## ***II-2. La biomécanique laryngée et ses conséquences***

### ***phonatoires***

En partant des connaissances classiques du fonctionnement de l'articulateur laryngé avec un vibrateur situé au niveau de la glotte et des résonateurs tout le long du conduit vocal, j'ai d'une part observé les modifications après chirurgie partielle lorsqu'on enlève le vibrateur et / ou les résonateurs, d'autre part cherché à comprendre les mécanismes de compensation qui utilisent les structures restantes. Peu de publications ont été faites sur le modèle de néoglotte laryngée après chirurgie partielle (Pech *et al.*, 1988 ; Pech *et al.*, 1990 ; Arnoux-Sindt, 1992). Mes recherches sur ce néovibrateur en pathologie m'ont permis de proposer des modélisations de néolarynx fonctionnel pour les dimensions phonétiques et phonologiques de la parole après LP grâce à l'utilisation autonome des structures aryépiglottiques dans le sens de la phonation. Les trois principales fonctions sont d'une part une fonction de néovibrateur à la place des plis vocaux avec une fonction phonétique de voisement, d'autre part une fonction d'articulateur consonantique en pathologie et dans certaines langues, et enfin des fonctions d'articulateur vocalique en pathologie et dans la parole normale enrichissant le timbre vocalique dans certaines situations phonatoires et artistiques que nous allons revoir.

#### **II-2.1. Modifications biomécaniques après chirurgie partielle du larynx**

##### ***II-2.1.1. La néoglotte et les « voix de substitution »***

Après chirurgie laryngée avec ablation d'au moins un pli vocal, la voix peut être considérée comme une *« voix de substitution »* (Moerman M., Martens JP., Crevier-Buchman L., Woisard V.,

Dejonckere P. (2005) Evaluation perceptive des voix de substitution : l'échelle I(I)NFVo. *Laryngol Otol Rhinol*, ;126 :323-5). Cette terminologie regroupe les conséquences phonatoires des laryngectomies totales (LT), des chirurgies partielles horizontales supracricoiïdiennes (LPSC) et des chirurgies partielles verticales comme les héli-laryngo-pharyngectomies supracricoiïdiennes (HLPSC) et les laryngectomies partielles frontolatérales (LPFL).

Notre étude sur la voix et la parole après LPSC s'intéressait à la biomécanique de la source ou vibrateur néolaryngé (néoglote) et ses relations avec le conduit vocal modifié. Nos hypothèses de départ étaient les suivantes : Le vibrateur néolaryngé peut-il être considéré comme un oscillateur, même fortement amorti ? Peut-il encore jouer un rôle comme articulateur vocalique et participer à la réalisation du voisement des consonnes ?

Notre étude était la première étude prospective, longitudinale, en préopératoire et post opératoire sur deux ans qui décrit et analyse les phénomènes articulatoires de compensation suite à la perte du vibrateur laryngé et aux modifications du conduit vocal chez vingt patients ayant subi une LPSC.

Considérant les théories actuelles « myoélastique-aérodynamique » complétées par les ajustements de la théorie « oscillo-impédantielle » de la phonation (Dejonckere, 1987), comment s'appliquent-elles à la production vocale après LPSC ?

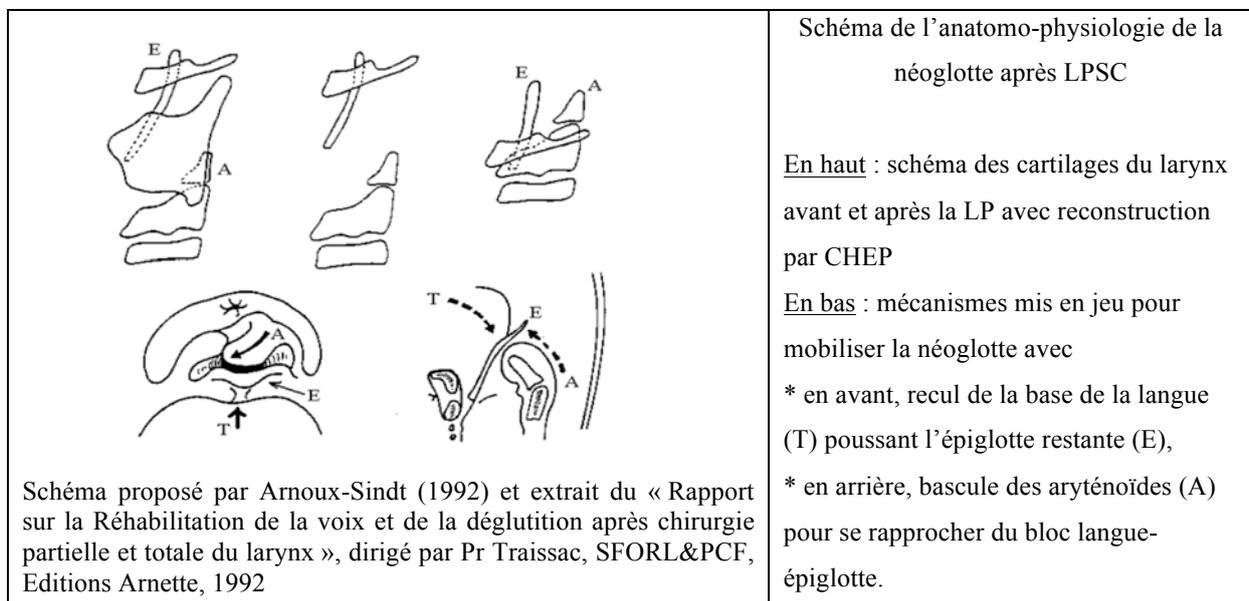
Pour y répondre, j'ai observé les mécanismes de production de la voix par le néo-vibrateur pour l'étude du comportement de la muqueuse de la néoglote en situation de phonation grâce aux explorations en vidéo-laryngoscopie (Crevier-Buchman L., Vincent C. (2009) « Visualisation du larynx : endoscopie rigide et fibroscopie, stroboscopie et caméra haute vitesse ». In "*Imagerie médicale pour l'étude de la parole*" Marchal 2009, eds Hermès, chap. 2, p 43-61) avec nasofibroscopie pour les mouvements du plan néoglottique et en stroboscopie (Dejonckere P, Crevier-Buchman L, Fresnel-Elbaz E, Marraco M, Millet B, Remacle M, Woisard V. (1998) "Quantitative rating of video-laryngostroboscopy : a reliability study". *Rev laryngol Otol Rhinol.*; 119 : 259-260); (Crevier-Buchman L, Hans S, Behm E, Tissot V, Laccourreye O, Brasnu D. (2006) « Comment faire et analyser une stroboscopie laryngée ? ». *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*; 123 :203-6). Les patients devaient produire la voyelle /i/ (contrainte de production lors des examens endoscopiques au tube rigide), à différentes hauteurs et intensités en phonation tenue prolongée et en staccato. Dans cette étude, notre recherche portait sur le phénomène de voisement des voyelles et plus spécifiquement sur la réapparition de ce dernier, et non sur l'articulation des consonnes. Les enregistrements vidéo de 20 patients à 1, 3, 6 et 12 mois postopératoires ont été analysés par un jury composé de 3 membres experts.

Pour cette étude en vidéostroboscopie du néolarynx, je me suis inspirée des premières descriptions de C. Pech décrite dans sa thèse de médecine (La voix sans corde vocale. Etude de la phonation après laryngectomie reconstructive. Marseille 1987). J'ai *créé une échelle visuelle* descriptive comprenant les items suivants :

- mouvements des aryténoïdes : axe transversal gauche-droit, axe antéro-postérieur
- lieu de contact : interne entre aryténoïdes, en avant avec l'épiglotte et/ou racine de la langue, externe ou latéral avec les plis aryépiglottiques,
- ondulation muqueuse : interne, antérieur ou latérale, symétrie, régularité
- fermeture néoglottique complète/incomplète
- mouvement vertical du tube laryngé

Cette échelle avait pour but de préciser les lieux de contact et de vibration, source de sonorisation.

La phonation nécessite un contact minimum entre les structures vibrantes constituées, ici dans notre modèle, en arrière, par les cartilages aryténoïdiens recouverts d'une muqueuse et en avant, par l'épiglotte supra hyoïdienne avec la racine de la langue (schéma). Cette dernière a un rôle important dans la rétroimpulsion de l'épiglotte restante.



L'articulation cricoaryténoïdienne de la néoglote est mobilisée par le muscle cricoaryténoïdien postérieur (CAP), le muscle cricoaryténoïdien latéral (CAL) et le muscle interaryténoïdien (IA) qui favorise une bascule en avant et en dedans des aryténoïdes pour obtenir l'adduction et l'abduction. La néoglote prend une forme triangulaire en « T » inversé au lieu du « V » glottique. Avec la disparition chirurgicale des PV, l'infrastructure du

vibrateur n'est plus constituée de trois éléments distincts (muqueuse, ligament, muscle), et il n'y a plus l'espace de glissement entre muscle et muqueuse. De ce fait, les possibilités contractiles et l'état de tension des muscles qui participent à la formation de la néoglote vont conditionner la souplesse de la muqueuse de recouvrement des aryténoïdes qui pourra être mise en vibration lors de la phonation.

Notre étude longitudinale du comportement néoglottique en vidéostroboscopie a permis de constater qu'à 1 mois postopératoire, le rapprochement des structures néolaryngées (aryténoïdes, épiglote et racine de la langue) était incomplet du fait i) de la perte transitoire des propriétés contractiles des muscles du vibrateur (muscles cricoaryténoïdien latéral CAL, cricoaryténoïdien postérieur CAP, inter aryténoïdien IA) en cours de cicatrisation, ii) de la modification de la position des aryténoïdes, iii) de la modification de la forme de l'épiglotte et iv) de la résection du plan glottique (plis vocaux et bande ventriculaires) et des espaces paraglottiques. Dès 3 mois postopératoire, la mobilisation de l'unité cricoaryténoïdienne de l'arrière vers l'avant et transversalement, et de la racine de la langue avec l'épiglotte restante de l'avant vers l'arrière, ainsi que l'assouplissement des tissus laryngés, la récupération des qualités biomécaniques intrinsèques des muscles laryngés préservés (souplesse, tension, élasticité et masse), permettent une amélioration progressive de la mobilité des structures vibrantes pour donner au néolarynx de nouvelles possibilités phonatoires qui s'installent entre trois et six mois postopératoires dans notre population (Crevier-Buchman L, Laccourreye O, Weinstein G, Garcia D, Jouffre V, Brasnu D. (1995) "Evolution of voice and speech following supracricoid partial Laryngectomy". *J Laryngol Otol*; 109:410-413) ; (Crevier-Buchman L, Laccourreye O, Wuyts F, Monfrais-Pfauwadel MC, Pillot C, Brasnu D. (1998) "Comparison and evolution of perceptual and acoustic characteristics of voice after supracricoid partial laryngectomy with cricohyoido-epiglottopexy". *Acta Otolaryngol. (Stockh)*; 118 :594-99).

L'échelle visuelle a permis une description précise des mouvements des articulateurs néolaryngés. Par la suite, cette échelle a été affinée pour être applicable à différentes situations phonatoires parlée et chantée (publication en cours de relecture).

La chronologie d'installation de la mobilité du néovibrateur laryngé pour produire une sonorisation se situe entre trois et six mois postopératoires. Cette information sur l'évolution longitudinale de la récupération vocale est très rassurante pour les thérapeutes et les patients car elle marque les délais normatifs. Cette notion permet aussi de guider la rééducation orthophonique et les résultats attendus.

Les résultats de l'analyse en vidéostroboscopie ont permis de conclure que la mise en vibration de la néoglote pour l'émission sonore se fait par la mobilisation vers l'avant et en dedans des aryténoïdes, associé au recul de la racine de la langue qui vient positionner l'épiglotte restante au contact des aryténoïdes. C'est la vibration de la muqueuse des aryténoïdes au niveau de leurs bords interne et antérieur, associé à la participation de la muqueuse des plis aryépiglottiques, contre l'épiglotte en avant qui constitue la source sonore ou vibreur néo-glottique et va produire la voix de substitution. Bien que la muqueuse des aryténoïdes a la particularité d'être très adhérente (mucopérichondre) au cartilage sous-jacent (Tucker, 1994), cette étude en vidéostroboscopie nous a permis de décrire un *mode vibratoire spécifique* « aryépiglottique » indispensable à la production du voisement. Cette ondulation n'apparaît que s'il existe un rapprochement quasi complet entre les aryténoïdes d'une part et la racine de la langue avec ou sans l'épiglotte restante d'autre part. L'ondulation se produit au niveau des aryténoïdes mais aussi sur les plis aryépiglottiques. La muqueuse a un mouvement d'ondulation grossièrement vertical de bas en haut associé à un mouvement antéropostérieur. Comme il n'y a plus d'espace de glissement qui permette d'individualiser l'ondulation muqueuse en lui conférant une certaine indépendance par rapport au muscle, chaque onde est asymétrique et irrégulière en fréquence et en amplitude, avec parfois des interruptions de l'ondulation muqueuse. Ce comportement vibratoire va retentir sur les caractéristiques acoustiques de la voix. En effet, le néo-vibreur a une inertie et une masse augmentée par rapport à la glotte laryngée (PV) ; la conséquence acoustique en est le timbre rauque (irrégularité de vibration, œdème muqueux souvent présent au niveau des aryténoïdes), grave (augmentation de la masse vibrante), soufflé (incompétence partielle du sphincter selon le degré d'accolement des structures vibrantes), avec souvent une notion d'effort perceptible dans le comportement phonatoire. Cependant, nous avons constaté que, plus l'amplitude de l'ondulation muqueuse est grande, plus la voix est grave et rauque, alors que dans les situations où il existe une certaine tension des plis aryépiglottiques, et une ondulation muqueuse aryténoïdienne d'amplitude réduite, la voix est plus aigüe, moins rauque (moins irrégulière) mais plus voilée. Cette voix plus aigüe semble être recherchée par les patients surtout les femmes, mais les dispositions anatomiques postopératoires ne sont pas toujours prévisibles. La rééducation serait alors peut être une source de compensation pour une amélioration du timbre.

Le vibreur néoglottique produit une voix de substitution grâce au rapprochement des structures néo laryngées constitués par les aryténoïdes et les plis aryépiglottiques. Nos observations ont confirmé que ce vibreur respecte les théories actuelles de la phonation pour les dimensions myoélastiques, par l'existence d'une ondulation muqueuse dont les qualités vibratoires vont participer aux caractéristiques de l'onde acoustique et du timbre de la voix.

Les explorations en vidéostroboscopie ont permis de mettre en évidence un mouvement articulaire avec indépendance de mobilité des aryténoïdes associé à un comportement muqueux insoupçonné jusqu'alors et au dépend de la muqueuse des cartilages aryténoïde. Ces résultats nous ont permis de mieux comprendre l'utilisation de l'articulateur aryépiglottique et sont le point de départ d'autres travaux de recherche dans différentes langues et pour certains modes phonatoires comme en voix chantée.

Il nous manque encore la dimension aérodynamique des théories de la phonation, appliquée à la pathologie, et nous allons développer cet aspect dans nos études futures qui seront décrites dans notre projet.

Qu'en est-il pour les autres chirurgies partielles du larynx qui répondent aux critères de « voix de substitution » c'est-à-dire avec au moins un pli vocal en moins ?

Nous avons étudié 2 autres catégories de chirurgie partielle du larynx, cette fois-ci verticale. Il s'agissait de l'hémi-laryngo-pharyngectomie supracricoïdienne (HLPSC) et de la laryngectomie partielle frontolatérale (LPFL).

- Dans le cas des HLPSC, un hémilarynx entier est enlevé et là encore nous avons un « modèle chirurgical » de vibreur unilatéral avec un pli vocal, une bande ventriculaire, un aryténoïde, un pli aryépiglottique et une demi épiglotte (Laccourreye O, Laccourreye L, Crevier-Buchman L, Brasnu D, Weinstein G. (1997) "Supracricoid hemilaryngopharyngectomy conversion to "Pearson's" near-total laryngectomy: a case report". *Head & Neck*; 19:232-234). Nos observations biomécaniques en vidéostroboscopie ont montré que la voix était produite non par le pli vocal restant mais par un rapprochement de l'hémi-larynx conservé contre la paroi pharyngée reconstruite et que l'onde acoustique était produite par l'ondulation de la muqueuse de l'aryténoïde restant et du pli aryépiglottique. Pour cela, l'hémi-larynx devait basculer en dedans et vers l'avant. Cette mobilité apparaissait vers le 3<sup>ème</sup> mois postopératoire et l'ondulation muqueuse se régularisait vers le 6<sup>ème</sup> mois postopératoire. Des muqueuses trop souples donnaient une grande amplitude à l'ondulation et par conséquent une voix grave et rauque ; par contre, un hémilarynx bien tendu avec une paroi pharyngée controlatérale suturée

de telle sorte que le conduit vocal soit relativement étroit, permettait d'avoir une voix plus aiguë. C'est une configuration que nous avons surtout observé chez les femmes, chez qui le larynx est de plus petit diamètre. Dans tous les cas, la qualité vocale produite après HLPSC est moins rauque et moins grave que celle des LPSC probablement du fait que l'hémilarynx vient vibrer contre une structure relativement ferme représentée par la paroi pharyngée reconstruite.

- Dans le cas de la LPFL, l'exérèse intéresse tout le pli vocal. Contrairement aux laryngectomies partielles précédentes, la glotte garde sa forme en V en respiration et, en phonation, nous avons observé un accollement partiel des bandes ventriculaires et parfois un rapprochement du pli vocal conservé et de la cicatrice fibreuse qui se constitue dans le lit de l'exérèse. La voix garde des caractéristiques proches d'une dysphonie avec une composante soufflée mais pas aggravée et rauque comme pour les LPSC (Biacabe B, Crevier-Buchman L, Laccourreye O, Brasnu B. (1998) « Laryngectomie partielle verticale avec reconstruction glottique. Résultats carcinologiques et fonctionnels ». *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*; 115: 189-95); (Biacabe B, Crevier-Buchman L, Hans S, Laccourreye O, Brasnu D. (1999) "Vocal function after vertical partial laryngectomy with glottic reconstruction by false vocal flap: durational and frequency measures". *Laryngoscope*; 109 : 698-704). Le vibrateur reste au niveau du plan glottique et non aryépiglottique.

Cette observation nous a amené à revoir la définition des voix de substitution à partir de la biomécanique laryngée. Dès lors que l'intervention chirurgicale verticale ou horizontale emporte le plan glottique jusqu'au cartilage cricoïde, avec exérèse ou non d'un cartilage aryénoïde, et mettant en mouvement le pli aryépiglottique et la muqueuse des aryénoïdes lors de la phonation, on peut parler de voix de substitution. Par contre, toutes les autres interventions en particulier les LPFL et les cordectomies même élargies, ont des voix qui sont produites par un rapprochement du plan glottique (PV et / ou bandes ventriculaires). On verra plus loin que les caractéristiques acoustiques de ces deux groupes de voix sont bien différentes.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Moerman M., Martens JP., Crevier-Buchman L, Woisard V., Dejonckere P. (2005) Evaluation perceptive des voix de substitution : l'échelle I(I)NFVo. *Laryngol Otol Rhinol* ; 126 :323-5
- Crevier-Buchman L, Vincent C. (2009) « Visualisation du larynx : endoscopie rigide et fibroscopie, stroboscopie et caméra haute vitesse ». In "*Imagerie médicale pour l'étude de la parole*" Marchal 2009, eds Hermès; chap. 2, p 43-61
- Biacabe B, Crevier-Buchman L, Laccourreye O, Brasnu D. (1998) « Laryngectomie partielle verticale avec reconstruction glottique. Résultats carcinologiques et fonctionnels ». *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac* ; 115 : 189-95

- Biacabe B, Crevier-Buchman L, Hans S, Laccourreya O, Brasnu D. (1999) "Vocal function after vertical partial laryngectomy with glottic reconstruction by false vocal flap: durational and frequency measures". *Laryngoscope*; 109 : 698-704
- Crevier-Buchman L, Maeda S, Bely N, Laccourreya O, Vaissiere J, Brasnu D. (2001) « Compensations articulatoires après laryngectomie partielle supracricoidienne avec cricohyoïdoepiglottopexie ». *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*, 118 : 81-88.
- Laccourreya O, Crevier-Buchman L, Muscatello L, Hans S, Menard M, Brasnu D. (1998) « Speech and voice characteristics after near-total laryngectomy - a preliminary prospective study ». *Ann Otol Rhinol Laryngol*; 107 : 1061-1065.
- Crevier-Buchman L, Laccourreya O, Wuyts F, Monfrais-Pfauwadel MC, Pillot C, Brasnu D. (1998) "Comparison and evolution of perceptual and acoustic characteristics of voice after supracricoid partial laryngectomy with cricohyoïdo-epiglottopexy". *Acta Otolaryngol.* (Stockh); 118 :594-99
- Laccourreya O, Laccourreya L, Crevier-Buchman L, Brasnu D, Weinstein G. (1997) "Supracricoid hemilaryngopharyngectomy conversion to "Pearson's" near-total laryngectomy: a case report". *Head & Neck*; 19:232-234
- Crevier-Buchman L, Laccourreya L, Weinstein G, Garcia D, Jouffre V, Brasnu D. (1995) « Evolution of voice and speech following supracricoid partial Laryngectomy". *J Laryngol Otol.*; 109:410-413.
- Laccourreya O, Crevier-Buchman L, Hacquart N, Naudo Ph, Muscatello L, Brasnu D. (1996) « Laryngectomies et pharyngo-laryngectomies avec shunt trachéo-laryngo-pharyngé de type « Pearson » : technique, indications, et résultats préliminaires ». *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*; 113: 261-268
- Dejonckere P, Crevier-Buchman L, Fresnel-Elbaz E, Marraco M, Millet B, Rémacle M, Woisard V. (1998) "Quantitative rating of video-laryngostroboscopy : a reliability study". *Rev laryngol Otol Rhinol* ;119:259-60
- Crevier-Buchman L, Hans S, Behm E, Tissot V, Laccourreya O, Brasnu D. (2006) « Comment faire et analyser une stroboscopie laryngée ? ». *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*; 123 :203-6
- Laccourreya O, Weinstein G, Crevier Buchman L, Naudo P, Laccourreya H, Brasnu D. (1997) "Ruptures Pexy after Supracricoid Partial Laryngectomy". *Ann Otol Rhinol Laryngol*; 106: 159-162

### **Communications en rapport avec ce thème**

- B. Biacabe, S. Hans, L. Crevier-Buchman, O. Laccourreya, D Brasnu. « Voix et parole après laryngectomie fronto-latérale avec ou sans reconstruction glottique. Etude randomisée ». *Société de Laryngologie des Hôpitaux de Paris*, Mars 2000, Paris
- L. Crevier-Buchman, S. Maeda, D. Brasnu, P. Halimi, J. Vaissiere. « Evaluation radiocinématographique des compensations articulatoires après laryngectomie partielle supracricoidienne avec CHEP ». *Société de Laryngologie des Hôpitaux de Paris*, Mars 2000, Paris
- L. Crevier-Buchman, S. Maeda, N. Bely, P. Halimi, J. Vaissiere, D. Brasnu. « Phonetic consequences and articulatory compensation of supracricoid partial laryngectomy". *European Laryngological Society ELS*, Juin 2000, Paris

#### *II-2.1.2. Recommandations thérapeutiques pour une néoglote fonctionnelle*

La technique chirurgicale de reconstruction intervient certainement dans les qualités de souplesse et de mobilité de l'unité cricoaryténoïdienne. En effet, lors de l'ablation du plan glottique et de l'espace paraglottique, l'aryténoïde est maintenu latéralement et postérieurement par les muscles cricoaryténoïdiens latéraux et postérieur ainsi que par les muscles interaryténoïdiens. Mais un déséquilibre s'installe en avant du fait du vide créé par la chirurgie, ce qui nécessite une remise en tension des aryténoïdes. Par ailleurs, la suture du cartilage cricoïde à l'épiglotte et à l'os hyoïde modifie la hauteur des structures laryngées antérieures et leur mobilité. Enfin, en cas de résection d'un cartilage aryténoïde, il est indispensable soit de construire un bourrelet muqueux pour éviter une béance postérieure et offrir un vibreur avec deux masses qui s'accolent, soit de basculer l'aryténoïde restant vers

l'intérieur pour favoriser une fermeture néoglottique et reconstruire un sphincter néolaryngé. Ces gestes sont les clés du bon fonctionnement de la néoglote aussi bien pour la déglutition que pour la phonation.

Les techniques de rééducation ont été enrichies et affinées par les observations de la biomécanique laryngée et néolaryngée (Crevier-Buchman L. (2004). "Speech and swallowing after oral, pharyngeal and laryngeal surgery: assessment and rehabilitation guidelines", *European Union of Federations of OtoRhinoLaryngological Societies (EUFOS)*, sept 04, Rhodes, Grèce). En effet, l'objectif est de stimuler la mobilisation des aryténoïdes et le recul de la racine de la langue. Pour cela des exercices de production de consonnes vélaires en reculant la langue comme pour la production de pharyngales, sont émises en les mettant dans un environnement vocalique /a/ car cette voyelle postérieure s'avère la plus facile à produire chez ces patients. Nous en verrons la raison plus loin, grâce aux études articulatoires que j'ai pu réaliser en radiocinéma pour objectiver les contraintes de voisement par rapport aux contraintes articulatoires. Toujours dans le but de favoriser la mobilisation de l'articulation aryépiglottique, des exercices de production de syllabes sont effectués en utilisant des consonnes fricatives postérieures et des liquides en prolongeant la consonne avant la voyelle pour donner le temps de la mise en position phonatoire de la néoglote. A partir de syllabes isolées, la progression se fera vers l'utilisation de mot mono- puis bi-syllabiques puis de phrases courtes. Vers le 6<sup>ème</sup> mois post opératoire, l'introduction d'exercices favorisant les variations mélodiques sera proposée tout en sachant que cette dimension reste très limitée (Crevier-Buchman L., Brihaye S., Tessier C. (2003) « *La Voix après chirurgie partielle du larynx* ». Eds Solal p148). Les exercices de souffles seront développés car les phénomènes aérodynamiques sont indispensables à la mise en vibration de la néoglote et nécessitent probablement plus de pression sous-glottique pour mobiliser la muqueuse des aryténoïdes et des plis aryépiglottiques.

Les aryténoïdes avec les plis aryépiglottiques peuvent devenir une source de vibration pour la production du voisement et remplir le rôle de néoglote mais aussi participer à certains styles phonatoires comme nous le verrons plus loin dans différentes langues et techniques vocales chantées.

Les phénomènes aérodynamiques sont indispensables non seulement pour à la mise en vibration de la néoglote mais aussi pour le contrôle de paramètres supra-segmentaux. Les études aérodynamiques vont être poursuivies dans mes projets de recherches

## Publications en rapport avec ce thème

- Crevier-Buchman L., Ruiz C. (2000) Swallowing Rehabilitation Following Organ Preservation Surgery. & Speech/Voice Rehabilitation Following Organ Preservation Surgery. In *Organ Preservation Surgery for Laryngeal Cancer*. Weinstein G, Laccourreye O, Brasnu D, Laccourreye H (eds), Singular Publishing Group, San Diego, Calif. pp165-70 & 171-74.
- Crevier-Buchman L., Brihaye S., Tessier C. (2003) « *La Voix après chirurgie partielle du larynx* ». Eds Solal p148.

## Communication en rapport avec ce thème

- Crevier-Buchman L. (2004). "Speech and swallowing after oral, pharyngeal and laryngeal surgery: assessment and rehabilitation guidelines", *European Union of Federations of OtoRhinoLaryngological Societies (EUFOS)*, sept 04, Rhodes, Grèce
- Crevier-Buchman L. (2006). "Voice therapy after partial laryngectomy", *Third World Voice Congress*, juin 06, Istanbul, Turquie
- L. Crevier-Buchman, S. Maeda, D. Brasnu, P. Halimi, J. Vaissiere. (2001) "Specific voice treatment after supracricoid partial laryngectomy : a phonetic study" Pan European Voice Conference (PEVOC IV), Août 2001, Stockholm, Suède

### II-2.1.3. Conflit articulation-phonation après chirurgie partielle laryngée

Nous avons vu en début de chapitre que les laryngectomies partielles modifient non seulement le plan glottique mais aussi la taille et le volume du conduit vocal. La question qui se pose est de savoir si le conduit vocal conserve ses fonctions de filtre acoustique. En effet, la modification de longueur du conduit vocal et la perte d'indépendance entre la source, le conduit vocal et la langue auront des conséquences sur l'articulation et sur la parole, entre autres pour l'intelligibilité des consonnes ainsi que pour les caractéristiques fréquentielles des voyelles.

Après LPSC, la chirurgie modifie la longueur du conduit vocal qui est raccourci d'environ 3 cm en raison de la suture du cartilage cricoïde à l'os hyoïde et à la racine de la langue. Par ailleurs, la langue et l'épiglotte restante participent au fonctionnement de la néoglote par leur mouvement postérieur vers les aryténoïdes pour la production du voisement.

Au cours de mes travaux de thèse, j'avais mené une étude longitudinale avec enregistrement en préopératoire et à 6, 12, et 18 mois postopératoires, chez 10 patients et 10 témoins masculins appariés par âge, pour objectiver les conséquences acoustiques (F0, F1, F2, F3 des voyelles [a] et [i]) de la modification avec raccourcissement du conduit vocal et pour évaluer la compensation et l'ajustement articulatoire au cours du temps. Les résultats avaient montré une augmentation des trois formants du [a] (200 à 300 Hz de plus que ceux des témoins) et restaient stable dans le temps. Pour la voyelle [i], seul le F2 augmente à 6 mois postopératoires et baisse ensuite évoquant un allongement de la cavité pharyngée. Ainsi, pour la réalisation articulatoire des voyelles, le patient va jouer sur la mobilisation du corps et de la pointe de la langue ainsi que sur la labialité et le volume du conduit vocal. Différents paramètres

se modifient en même temps, responsables d'un mécanisme de compensation articulaire multifactorielle.

Les déplacements des formants reflètent l'ascension laryngée et le raccourcissement du conduit vocal après LPSC et ils traduisent indirectement les stratégies linguales pour obtenir une voyelle cible tout en respectant les contraintes de voisement. Pour les voyelles, il semblerait que les contraintes articulaires soient dictées par les contraintes de phonation c'est-à-dire de voisement.

Pour confirmer nos hypothèses devant l'évolution des valeurs formantiques des voyelles [a] et [i], j'ai exploré le comportement néoglottique et lingual en radiocinéma (au cours d'un bilan de déglutition) chez deux de nos patients à 18 mois postopératoires. Le but était d'explorer i) la place des articulateurs lors de la production des voyelles [a] et [i] et ii) la position de la langue lors de la réalisation des consonnes occlusives (Crevier-Buchman L, Maeda S, Bely N, Laccourreye O, Vaissiere J, Brasnu D. (2001) « Compensations articulaires après laryngectomie partielle supracricoidienne avec cricohyoïdoepiglottopexie ». Ann Otolaryngol Chir Cervicofac; 118 : 81-88).

Le matériel utilisé était un générateur de Rayons X branché sur un magnétoscope VHS (Panasonique). Un produit radio-opaque (Micropaque, Laboratoire Guerbet) était ingurgité, ce qui permettait de visualiser les contours du conduit vocal lors de la déglutition. Tout de suite après la déglutition, nous avons demandé au patient placé de profil de réaliser les voyelles pendant une à deux secondes. Le champ radiologique prenait la région buccale avec la langue, le voile du palais, le pharynx et le néolarynx. Les mesures des doses d'irradiations ont été faites et correspondent à 1,6 mSv, ce qui équivaut à la dose d'irradiation délivrée pour 5 radiographies de poumon.

Les résultats radiologiques de cette étude permettent de conclure ce qui suit:

- au repos, le vibrateur néolaryngé, représenté par le bourrelet aryénoïdien, se projette en regard de l'os hyoïde, soit environ à 3 cm au dessus de l'emplacement normal de la glotte.
- en phonation, le vibrateur monte et se place en regard de la branche horizontale de la mandibule aussi bien pour le [a] que pour le [i]. Cette ascension mesure environ 2 cm.
- pour la voyelle [a], la fermeture du pharynx est quasi complète et la racine de la langue vient « écraser » les vallécules et l'épiglotte restante et rentre en contact avec les aryénoïdes en arrière. La cavité pharyngée est très réduite. Le dos de la langue est postérieur. La valeur plus élevée des formants traduit cette ascension néolaryngée.

- pour la *voyelle [i]*, le rétrécissement du pharynx est moins important que pour le [a] mais on observe aussi un recul de la racine de la langue qui vient se coller à l'épiglotte restante donnant une impression de tension et de rectitude de la partie verticale de la racine de la langue. Les aryténoïdes montent et conservent une position stable lors de la phonation. La pointe de langue est antériorisée. Tous ces mécanismes de compensation contribuent à allonger le conduit vocal en réduisant son diamètre et se traduisent par un abaissement des valeurs du F2.

- pour les *consonnes*, le voisement nécessite la participation de la racine de la langue à l'occlusion néoglottique ; de plus, la réalisation articulaire correcte des consonnes avec respect du lieu de constriction demande une certaine liberté de la langue mobile. On observe donc un mouvement en arrière et en bas pour le voisement, un mouvement en haut et en arrière pour l'articulation palato-vélaire et en avant pour l'articulation alvéolo-dentale. La coordination de deux mouvements de sens différents n'est pas facile. Les patients semblent favoriser l'articulation consonantique au détriment du voisement.

Cette étude a contribué d'une part à la compréhension des mécanismes de contraintes de voisement et d'articulation et d'autre part à la modélisation des comportements phonatoires et articulaires après LPSC. La modélisation articulaire que nous pouvons proposer repose sur une observation anatomophysiologique en rapport avec la montée du néolarynx par la suture du cartilage cricoïde à l'os hyoïde.

D'un point de vue phonétique, notre modèle articulaire pose le problème de la réalisation correcte de l'articulation et de la phonation.

- pour les *consonnes*, l'exploration du voisement et du lieu d'articulation des consonnes a mis en évidence un conflit entre l'articulation et le voisement ; les consonnes étant caractérisées par leur composante aérodynamique et le lieu de la constriction, les patients vont privilégier plus particulièrement l'articulation au détriment du voisement, responsable d'une désonorisation des consonnes sonores.

- pour les *voyelles*, définies par les indices de voisement, le déplacement des fréquences des formants du [a] confirme un raccourcissement du conduit vocal objectivé aussi par l'imagerie en radiocinéma. Pour la voyelle [i], le patient va privilégier la phonation au détriment de l'articulation en modifiant la place de la langue par le recul de la racine de la langue.

La voyelle [i] est plus difficile à réaliser que la voyelle [a]. Les exercices de sonorisation devraient privilégier l'utilisation du [a] en début de rééducation.

Pour compléter cette étude, j'ai dirigé un mémoire de DEA (Rémi Derbez 2001, « Modélisation articulatoire et acoustique des quatre voyelles chez trois patients opérés de LPSC-CHEP, application du modèle de Maeda »). A partir des coupes sagittales obtenues en radiocinéma, nous avons réalisé, selon le modèle de Maeda (1972) des mesures articulatoires puis une modélisation acoustique de chaque voyelle. Les formants obtenus après cette modélisation ont été comparés aux formants des voyelles produites par les patients. Nous avons obtenus des résultats allant dans le même sens que ceux de l'étude précédente.

Ce travail a soulevé un certain nombre de questions, en particulier l'application du modèle de Maeda à un conduit vocal modifié par la chirurgie. A notre connaissance, aucune publication n'avait été faite concernant l'application du modèle à la voix pathologique. En effet, les logiciels étaient prévus pour analyser un conduit vocal normal mesurant environ 17 cm alors que chez nos patients, il était raccourci à 14 cm. De plus, un segment anatomique qui était prévu par la modélisation avait disparu chez nos patients, à savoir le vestibule laryngé. Enfin, le passage de la coupe sagittale à la fonction d'aire a été aussi une source de difficulté pour obtenir des calques de bonne qualité du conduit vocal modifié. A l'époque, malgré une bonne collaboration avec le Pr Maeda, son modèle n'a pas pu être adapté à la pathologie. Cependant, nous envisageons de poursuivre ces études avec élaboration d'un modèle de conduit vocal adapté aux différentes pathologies laryngées et oropharyngées.

Une autre grande restriction à la poursuite des travaux de recherche utilisant le radiocinéma est l'exposition des patients aux radiations ionisantes ou rayons X. Une alternative serait le recours à l'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui est très séduisante au vu des images et des études menées sur des sujets normaux. Dans notre cas, cela nécessiterait une collaboration avec des services de radiologie qui accepteraient de nous accorder des plages horaires pour la recherche clinique, impliquant des patients. Par ailleurs, le temps d'acquisition est long et nécessite une immobilité du sujet, et un certain nombre de contre-indications sont à respecter (pacemaker, corps étranger métallique, claustrophobie). Un espoir réside dans le développement de techniques non invasives comme l'échographie de la langue et du larynx pour suivre les mouvements de ces articulateurs. Les études sur l'articulation linguale sont en cours dans le cadre du projet ANR Revoix. Les explorations de l'articulateur laryngé sont à l'étude dans le laboratoire du Pr Esling (Victoria, Canada).

Enfin, une autre problématique reste en suspens ; dans le prolongement des résultats attendus par la modélisation, quelle serait l'application de la théorie quantique de Stevens au larynx après laryngectomie partielle modifiant la source et le conduit vocal ? En effet, un intérêt

non négligeable serait de déterminer quelles sont les zones de stabilité vocalique pour en proposer si possible la préservation lors du geste chirurgical et pour les améliorer par la rééducation postopératoire.

Le champ de mes recherches à venir comprendra d'une part des études aérodynamiques du comportement phonatoire des patients après LPSC pour explorer non seulement les mécanismes de production des consonnes mais aussi les possibilités d'adaptations prosodiques, d'autre part des études pour développer d'autres méthodes non invasives d'exploration de la dynamique laryngée et enfin adapter les modèles articulatoires et phonatoires aux pathologies laryngées postopératoires.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Crevier-Buchman L., Maeda S, Bely N., Laccourreye O, Vaissiere J, Brasnu D. (2001) « Compensations articulatoires après laryngectomie partielle supracricoidienne avec cricohyoïdoépiglottopexie ». *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*; 118 : 81-88
- Crevier-Buchman L., Maeda S., Brasnu D., Vaissière J. (2004). "Perceptual and acoustic correlation in consonant identification after partial laryngectomy", Actes de l'International Conference on Voice Physiology and Biomechanics (ICVPB), 17 – 20 août 2004, Marseille, France

### **Communication en rapport avec ce thème**

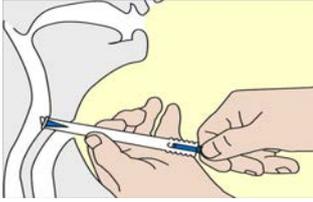
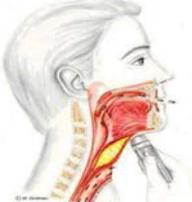
- R. Derbez, S. Hans, L. Crevier-Buchman, J. Vaissiere, D. Brasnu, S. Maeda. « Modélisation du conduit vocal chez 4 patients opérés de laryngectomie partielle supracricoidienne avec CHEP ». *Congrès de la Société Française d'O.R.L. et de Chirurgie de la Face et du Cou*, Oct 2002, Paris
- Crevier-Buchman L. (2005). "Articulatory compensations after supracricoid partial laryngectomy", European Union of Federations of OtoRhinoLaryngological Societies (EUFOS), Rhodes, Grèce
- L. Crevier-Buchman, S. Maeda, N. Bely, P. Halimi , J. Vaissiere, D. Brasnu.(2000) "Phonetic consequences and articulatory compensation of supracricoid partial laryngectomy". *Actes du International Clinical Phonetics and Linguistics Association (ICPLA)*, Edinbourg, UK, Aout 2000
- L. Crevier-Buchman, S. Maeda, D. Brasnu, P. Halimi , J. Vaissiere. "Phonetic consequences of supracricoid partial laryngectomy : phonation-articulation trade-off : articulatory compensation". *5th seminar on Speech Motor Control, Mai 2000, Kloster Seeon, Munich*
- Crevier-Buchman L. (2009). « Apport de la phonétique clinique pour la modélisation des voix de substitution », *Journée d'ouverture en Phonétique Clinique*, 10 déc. Strasbourg, France

#### *II-2.1.4. Substitution vocale après laryngectomie totale : La voix silencieuse*

Les laryngectomies totales sont responsables d'une mutilation profonde, responsable d'une perte de la communication orale. On estime à 1.800 le nombre de laryngectomies totales par an en France. À l'heure actuelle, la seule substitution possible pour continuer à communiquer oralement est la mise en vibration du sphincter supérieur de l'œsophage (SSO) qui a pour conséquence une voix très irrégulière, rauque et grave. Il existe deux modalités décrites plus haut à savoir la voix œsophagienne (VO) mais seulement 30% des patients réussissent

l'apprentissage de la VO, même après 6 mois de rééducation. L'autre solution, moyennant une intervention chirurgicale complémentaire pour l'insertion d'une prothèse phonatoire, est la voix trachéo-œsophagienne (VTO) qui peut être satisfaisante et efficace hormis la qualité vocale. En cas d'échec de ces solutions, le patient peut avoir recours à un appareil à usage externe appelé électrolarynx, qui produit une voix de timbre métallique monotone et très peu naturel, et dont l'utilisation est limitée par des facteurs anatomiques post thérapeutiques.

Dans ces trois scénarios, ces voix de substitution nécessitent un apprentissage et une longue prise en charge orthophonique, parfois au-delà d'une année. Le coût en termes de santé publique qui en découle est très significatif.

Mise en place d'une prothèse entre la trachée et l'œsophage pour la voix trachéo-œsophagienne (VTO)	Utilisation d'un laryngophone ou électrolarynx
	

L'impact social de ce handicap est également important. Le patient perd à jamais la possibilité de s'exprimer avec sa voix d'origine, ce qui nuit de manière significative à ses interactions avec les personnes qui l'entourent. Fréquemment, le patient, confronté aux difficultés de rééducation et de réinsertion, finit par renoncer à une grande part de ses activités antérieures. La qualité de sa vie est fortement altérée.

Sans larynx, le patient perd la sonorisation mais conserve l'articulation. Il peut donc produire une voix silencieuse. Cependant, la voix silencieuse reste une entité mal définie et très peu étudiée.

Mon environnement médical et les patients laryngectomisés que je côtoie m'amène à observer de nombreuses situations correspondant à la parole silencieuse. De plus, une grande question récurrente en pathologie est de savoir comment compenser ou améliorer les déficits de production. Une approche a été proposée dans le cadre du projet de recherche REVOIX. Par ailleurs, une meilleure compréhension des phénomènes qui sous-tendent la parole silencieuse devrait permettre de proposer des stratégies et de nouvelles technologies d'aide au handicap.

Dans le cadre d'un projet ANR Emergence-Tec (2009-2012) intitulé REVOIX (Restitution de la voix d'origine pour handicapés de la parole)<sup>5</sup> N° 09-ETEC-005-02 où je suis co-responsable du projet porté par B. Denby (SIGMA Lab), nous avons poursuivi les travaux initiés par T. Hueber dans sa thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, intitulée « Reconstitution de la parole par imagerie ultrasonore et vidéo de l'appareil vocal : Vers une communication parlée silencieuse », soutenue en 2009 et dont je faisais partie du jury.

Le projet REVOIX propose de réaliser un dispositif portatif permettant de restituer la voix d'origine aux handicapés de la parole, en pilotant un synthétiseur vocal à partir d'imagerie en temps réel de la langue et des lèvres réalisée avec un échographe miniature et une caméra vidéo. Le synthétiseur vocal étant conçu par des techniques d'apprentissage artificiel, cet apprentissage peut être effectué à l'aide d'enregistrements de la voix d'origine de l'utilisateur avant l'ablation du larynx : le dispositif produira ainsi un signal fidèle à la voix du locuteur.

Les recherches en « communication silencieuse » sont en pleine expansion et trouvent beaucoup d'intérêt dans la communauté scientifique nationale et internationale par les multiples applications qui peuvent en découler. Il s'agit d'un dispositif qui permet de saisir et d'interpréter une parole qui est normalement articulée mais non vocalisée. Le sujet mobilise ses articulateurs oro-buccaux (lèvres, langue, voile, mandibule) mais n'envoie pas d'énergie aérienne dans le conduit vocal. Le principe est de capturer ces signaux articulatoires non acoustiques et de les transformer en signal de parole audible. Le champ d'application de ces recherches est vaste : i) d'une part pour la communication non pathologique comme dans le secteur des télécommunications, militaires et civiles ; l'utilisation de la voix silencieuse pourrait s'envisager dans un milieu où la discrétion est capitale (transports, réunion) mais aussi dans un environnement extrêmement bruyant (concert, hélicoptère...) ; dans ces cas, les signaux acoustiques étant souvent trop dégradés pour être traités par des techniques classiques de débruitage ou de transcription automatique ; ii) d'autre part en pathologie pour permettre de restituer une voix à ceux qui l'ont perdue suite à une maladie ou une intervention chirurgicale. La voix silencieuse constituerait une alternative aux solutions actuelles proposées aux laryngectomisés comme le laryngophone électronique ou la voix œsophagienne ou trachéo-œsophagienne. Elle pourrait aussi s'appliquer à certaines pathologies neurologiques où la sonorisation de la parole n'est plus possible. Ma participation au projet se situe dans cette dernière application au domaine médical.

---

<sup>5</sup> <http://www.neurones.espci.fr.Revoix/>

Plusieurs approches ont été proposées depuis les années 2000 (Denby B., et al. (2010) Silent speech interface. *Speech Communication*; 52 :270-87 ; Projet ANR OUISPER<sup>6</sup> ANR-06-BLAN-0166, 2006-2009). Les technologies dans REVOIX s'inscrivent dans un nouveau domaine appelé « interface de parole silencieuse », ou *Silent Speech Interface* (SSI), actuellement en pleine émergence sur le plan international (Denby *et al.*, 2010). Notre approche repose sur l'imagerie ultrasonore et vidéo qui a été proposée par B. Denby et développée au laboratoire SIGMA (SIGnaux, Modèles et Apprentissage) de l'ESPCI ParisTech (Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle de la Ville de Paris). Le système ultrasonore (échographie), placé sous la mandibule en regard du plancher buccal, permet la capture des mouvements de la langue, et le système vidéo avec une caméra miniaturisée à 60 i/sec, permet la capture des mouvements des lèvres (Florescu VM, Crevier-Buchman L, Denby B, Hueber T, Colazo-Simon A, Pillot-Loiseau C, Roussel P, Gendrot C, Quattrocchi S. (2010) Silent vs Vocalized Articulation for a Portable Ultrasound-Based Silent Speech Interface. In *Proceedings of Interspeech 2010*, Makuhari Japan: pages 450-453). Un intérêt non négligeable de ces systèmes de capture (échographie et caméra) repose sur des dispositifs non invasifs donc d'utilisations non restreintes. Ces 2 groupes de signaux apportent une information sur la dynamique du conduit vocal pendant l'articulation de la parole sonore ou silencieuse.

Pour convertir les signaux non acoustiques capturés en signal de parole audible, il est nécessaire de concevoir un modèle mathématique. Ce modèle pourrait être obtenu par apprentissage artificiel pour former un modèle de langage. Une des méthodes utilisée est de demander à un sujet (qui pourra ultérieurement bénéficier du système) d'enregistrer non seulement sa voix mais aussi les signaux non acoustiques (langue et lèvres) en lisant un grand nombre de phrases pour couvrir au mieux le paradigme articulatoire du français. Ainsi on peut mettre en correspondance les causes (articulation) et les effets (parole sonore). Le but est de rendre possible la prédiction de l'effet (le son) rien que par l'analyse des causes (articulateurs). Cependant se surajoute un réel problème en parole silencieuse : comment reconnaître 2 phonèmes qui ne se distinguent que par le voisement puisque la parole silencieuse par définition exclue toute activité du vibrateur laryngé ? Il faudrait introduire un « modèle de langage probabiliste ».

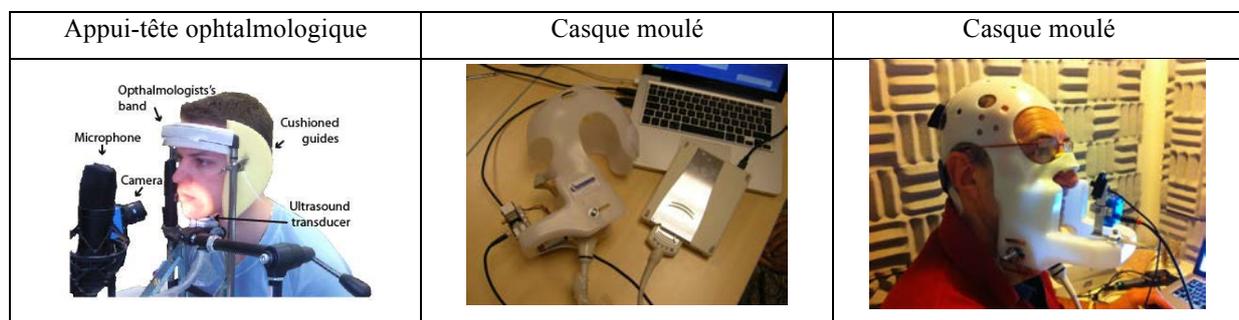
Où en sommes-nous dans ce projet, et quelle est ma contribution ?

- Dans un premier temps, il fallait adapter le matériel et le protocole d'acquisition en s'affranchissant des contraintes de fixation de la tête à un socle fixe pour éviter tout déplacement de la sonde d'échographie et de la caméra par rapport au lèvres. Jusqu'alors, le

---

<sup>6</sup> <http://www.neurones.espci.fr/ouisper/>

Le sujet devait poser sa tête et son menton sur un support d'examen ophtalmologique qui assurait la stabilité du système tête - sonde d'échographie - caméra et microphone. Notre objectif était d'une part de construire un système embarqué sur un casque porteur des capteurs, et d'autre part de miniaturiser les composants. J'ai pu établir des contacts avec un partenaire industriel en Orthoprotèse et étudier les différentes possibilités pour la confection d'un casque en plastique moulé qui permettait de fixer la caméra et la sonde d'échographie miniaturisée (photos). L'ensemble casque avec les systèmes de capture est actuellement portable, ergonomique, et relativement confortable, mais l'aspect esthétique doit encore être amélioré pour le rendre utilisable au quotidien.



- Pour garantir des taux de reconnaissance permettant la réalisation d'applications véritablement utiles, nous nous écartons du domaine de la parole continue en faveur des vocabulaires restreints que nous avons créés. Pour cela, nous avons développé des dictionnaires, de taille limitée, mais suffisamment riches pour être d'une véritable utilité pour la communication orale en conversation quotidienne. J'ai participé à l'élaboration d'un modèle de langage en français pour répondre aux exigences du projet en déterminant le nombre de mots (phonèmes, diphtongues, triphongues selon leur fréquence en français) et construire des phrases qui reprennent un vocabulaire courant de parole et non de lecture pour servir à l'apprentissage. Chaque nouveau corpus a été enregistré puis analysé pour évaluer sa pertinence et sa performance en termes de validité du système de reconnaissance. Le corpus retenu actuellement est constitué de 3.500 phrases mais une réduction est en cours d'étude. En effet, il semblerait que la fiabilité de reconnaissance soit conservée avec 2.000 phrases (étude en cours).

- Enfin, une tâche qui est plus spécifiquement développée au SIGMA lab est celle de l'augmentation de la vitesse de reconnaissance et de synthèse des signaux pour se rapprocher du « temps réel ».

Une première communication a été présentée au congrès Interspeech en 2010 présentant les possibilités actuelles d'utilisation de notre système Ultraspeech (Silent Speech Interface) en articulation silencieuse avec des mots isolés correspondant à notre premier corpus. Deux systèmes de casque ont été comparés, l'ancien système fixe et le nouveau système portable pour valider notre casque portable. L'Ultraspeech entraîné à partir de la parole sonore est moins performant quand il est testé sur de l'articulation silencieuse mais la performance s'améliore si le système est entraîné avec de la parole articulée silencieusement. La conclusion de cette première étude est de pouvoir s'affranchir de l'étape d'entraînement en parole sonore et de ne conserver que l'entraînement en parole silencieuse (Florescu VM, Crevier-Buchman L, Denby B, Hueber T, Colazo-Simon A, Pillot-Loiseau C, Roussel P, Gendrot C, Quattrocchi S. (2010) Silent vs Vocalized Articulation for a Portable Ultrasound-Based Silent Speech Interface. In Proceedings of Interspeech 2010, Makuhari Japan: pages 450-453).

Une deuxième communication a été présentée à Montréal en 2011 dans le cadre du congrès International Seminar on Speech Production (ISSP) pour montrer nos avancées en terme de portabilité, d'interactivité et de convivialité du système Ultraspeech comme aide à la communication. Des progrès sont encore à réaliser pour être applicables à de la parole continue et en temps réel (Denby B, Cai J, Hueber T, Roussel T, Dreyfus G, Crevier-Buchman L, Pillot-Loiseau C, Chollet G, Manitsaris S, Stone M. (2011) Towards a Practical Silent Speech Interface Based on Vocal. Tract Imaging; International Seminar on Speech Production (ISSP) 2011, Montréal, Canada)

La méthodologie du système de reconnaissance appliquée à notre étude a fait l'objet de deux autres communications et publications dans les actes de *17<sup>th</sup> International Congress on Phonetic Sciences (ICPhS) 2011* à Hong-Kong. Il s'agissait de la première version sur un grand corpus en parole silencieuse lue en anglais. L'utilisation des signaux visuels et de la reconnaissance par triphones HMM (Modèles cachés de Markov) en incluant des données syntactiques au moyen d'un modèle de langage, a permis d'obtenir un taux de reconnaissance au niveau du mot, supérieur à 70%.

En parallèle, avec le même matériel de système d'acquisition Ultraspeech, je me suis intéressée aux mécanismes de production et aux spécificités articulatoires de la parole silencieuse comparée à la parole en voix normale et chuchotée. Dans un premier temps, il m'a semblé nécessaire d'établir une typologie articulatoire comparée de ces trois modalités de production vocale en français. Puis dans un deuxième temps, il sera intéressant de comparer le schéma articulatoire du sujet avec un larynx normal et celui d'un patient laryngectomisé.

La comparaison entre les phénomènes articulatoires des productions vocales sonores, chuchotées et silencieuses devrait permettre d'optimiser d'une part les modalités de prise en charge de la rééducation des patients et d'orienter les performances des synthétiseurs vocaux pour l'aide à la communication.

Ma première étude préliminaire a été réalisée et publiée dans les actes du congrès *17<sup>th</sup> International Congress on Phonetic Sciences (ICPhS)* en 2011. Il s'agissait d'analyser les mouvements des lèvres : amplitude et timing dans le plan vertical (ouverture - fermeture) et transversal (étirement et arrondissement) ainsi que celui de la langue dans le plan vertical et antéropostérieur, les deux signaux étant synchronisés. Le corpus proposé comprenait 60 paires minimales du français à la recherche de traits distinctifs saisissables avec le système Ultraspeech ainsi qu'une liste des 50 mots les plus fréquents du français. Cette première étude en voix normale et silencieuse a porté sur un seul sujet. Les premiers résultats ont mis en évidence, en voix silencieuse, i) une réduction de durée des mots ii) ainsi qu'une hypo-articulation de l'articulateur labial mais iii) pas de modification significative des mouvements de la langue dans les deux modalités sonore et silencieuse aussi bien pour les consonnes que pour les voyelles (Crevier-Buchman L, Gendrot C, Denby B, Pillot-Loiseau C, Roussel P, Colazo-Simon A, Dreyfus G. (2011) Articulatory strategies for lip and tongue movements in silent versus vocalized speech. In *Proceedings of 17<sup>th</sup> International Congress on Phonetic Sciences (ICPhS) 2011*, Hong-Kong).

Notre projet est de poursuivre cette étude en augmentant le nombre de sujets et de recentrer le corpus par une étude segmentale plus systématique pour une description typologique des comportements des articulateurs labial et lingual associés aux études aérodynamiques et laryngées. Les questions soulevées sont en rapport avec l'importance des contraintes de voisement et d'articulation dans trois situations normales et de les comparer aux situations pathologiques. Pour ce faire, je souhaite mener des études multi-instrumentales aérodynamiques et en vidéostroboscopie et si possible en vidéo ultra-rapide pour mieux comprendre les mécanismes respiratoires et phonatoires ainsi que la biomécanique laryngée au cours de ces différents modes de production vocale.

Ce projet trouve tout son intérêt par les relations enrichissantes et complémentaires sur les interfaces homme - machine réunissant des techniques d'instrumentation et de modélisation ainsi que la bio-ingénierie, l'intelligence artificielle, les sciences du langage. Son application dans le domaine du handicap et de l'aide à la communication sera un apport notable au développement de la phonétique clinique.

## Communication en rapport avec ce thème

- Florescu VM, Crevier-Buchman L, Denby B, Hueber T, Colazo-Simon A, Pillot-Loiseau C, Roussel P, Gendrot C, Quattrocchi S. (2010) Silent vs Vocalized Articulation for a Portable Ultrasound-Based Silent Speech Interface. In Proceedings of Interspeech 2010, Makuhari Japan: pages 450-453)
- Denby B, Cai J, Hueber T, Roussel T, Dreyfus G, Crevier-Buchman L, Pillot-Loiseau C, Chollet G, Manitsaris S, Stone M. (2011) Towards a Practical Silent Speech Interface Based on Vocal Tract Imaging; International Seminar on Speech Production (ISSP) 2011, Montréal, Canada
- Denby B, Cai J, Roussel P, Dreyfus G, Crevier-Buchman L, Pillot-Loiseau C, Hueber T and Chollet G (2011) "Tests of an interactive, phrasebook-style, post-laryngectomy voice-replacement system" *17<sup>th</sup> International Congress on Phonetic Sciences (ICPhS) 2011*, Hong Kong, Chine
- Cai J, Hueber T, Denby B, Benaroya EL, Chollet G, Roussel P, Dreyfus G, Crevier-Buchman L.(2011) A visual speech recognition system for an ultrasound-based silent speech interface. In Proceedings of *17<sup>th</sup> International Congress on Phonetic Sciences (ICPhS) 2011*, Hong-Kong
- Crevier-Buchman L, Gendrot C, Denby B, Pillot-Loiseau C, Roussel P, Colazo-Simon A, Dreyfus G. "Articulatory strategies for lip and tongue movements in silent versus vocalized speech" *17<sup>th</sup> International Congress on Phonetic Sciences (ICPhS) 2011*, Hong Kong, Chine
- Cai J, Denby B, Roussel P, Dreyfus G, Crevier-Buchman L (2011) Recognition and Real Time Performance of a Lightweight Ultrasound Based Silent Speech Interface Employing a Language Model. *12<sup>th</sup> Interspeech*, Florence, Italie, 27-30 août 2011

### II-2.2. Apport à la phonétique des langues et des techniques vocales

Nos études sur la biomécanique laryngée appliquée aux chirurgies laryngées nous ont permis de décrire une activité musculaire avec mobilisation autonome des aryténoïdes et des plis aryépiglottiques pour participer à la phonation. Seules les techniques d'exploration en vidéostroboscopie permettent de mettre en évidence au niveau des articulateurs aryénoïdiens, d'une part une possibilité de mouvements indépendants du reste du larynx selon la technique vocale, et d'autre part, de définir un comportement muqueux aux dépens de la muqueuse des cartilages aryénoïdes et des plis aryépiglottiques. Par ailleurs, certaines langues ont des descriptions phonétiques et phonologiques de consonnes qui mentionnent des places articulaires pharyngales et/ou épiglottales supposant une individualisation d'articulateurs dans la région pharyngée. Hors toute pathologie, j'ai souhaité mettre ces techniques d'exploration en vidéostroboscopie au service de la parole normale, de la phonétique et de la phonologie pour objectiver la réalité de ces comportements phonatoires.

#### II-2.2.1. Articulateur aryépiglottique pour les consonnes pharyngales

Dans la littérature, de nombreuses définitions correspondent aux consonnes pharyngales avec descriptions acoustiques et parfois physiologiques (Catford, 1977 ; Ritter, 1999).

Ma rencontre avec le Pr John Esling (directeur du laboratoire de phonétique à l'Université de Victoria, Canada) au Laboratoire LPP a été très fructueuse, chacun trouvant un terrain de recherche complémentaire et permettant un « remue-méninges » pour approfondir les connaissances physiologiques articulaires. En effet, Esling a grandement contribué à

l'enrichissement de l'IPA grâce aux données physiologiques permettant l'observation des comportements du conduit vocal dans différentes langues du monde.

Dans le prolongement de mes travaux sur le vibreur néolaryngé comme source de voisement, j'ai participé à l'encadrement d'un doctorant, Chakir Zeroual, préparant sa thèse intitulée « Propos controversés sur la phonétique et la phonologie de l'Arabe Marocain » sous la direction du Pr Georges Bohas, université Paris 8 (15.12.2000). Ce travail et cette collaboration étaient dans la lignée de la « phonologie de laboratoire » où l'analyse phonologique cherche à s'accorder à la réalité phonétique. De plus, la phonétique peut apporter des éléments de réponse à certains comportements phonologiques. J'ai pu l'accompagner dans ses recherches sur les comportements articulatoires oro-pharyngo-laryngés pour la production des consonnes gutturales et emphatiques de l'arabe marocain. L'un de ses objectifs était d'apporter des éléments de réponse aux controverses sur les propriétés phonétiques et phonologiques liées au mode articulatoire des consonnes, en particulier sur les ajustements laryngés et supra-laryngés. Je ne présenterai ici que la partie relative à notre collaboration en phonétique articulatoire (et non les analyses acoustiques et phonologiques de sa thèse).

#### 1. L'articulateur pharyngo-laryngé

Les premières expériences ont été réalisées en naso-fibroscopie pour l'observation directe des mouvements de la partie postérieure de la langue, de l'épiglotte, des aryténoïdes et des plis aryépiglottiques lors de la réalisation des consonnes arrières (gutturales) pour évaluer les ajustements laryngés et supra laryngés. Le but était de préciser les lieux des articulations consonantiques. Pour ce faire, le corpus était composé de mots et de logatomes de type VCV (V voyelle et C consonne) et CVCV, la voyelle étant le /i/ pour des raisons de contraintes d'examen et permettre ainsi de considérer que les mouvements de la langue observés pouvaient être rattachés aux seuls mouvements engendrés par la réalisation de la consonne. Les consonnes étudiées relevaient des classes des coronales, palatales [k g], vélares ou uvulaires [q χ ʁ], et des pharyngales sourdes [ħ] et sonores [ʕ].

Nos résultats ont permis de décrire les mouvements de la partie postérieure de la langue associés à ceux de l'épiglotte, des aryténoïdes, des plis aryépiglottiques et du plan glottique lors de la réalisation des différentes consonnes. Par exemple :

- les *consonnes emphatiques sourdes* auraient une articulation laryngée avec une ouverture glottique moindre que leurs homologues non emphatiques. Par contre nous n'avons pas retrouvé de participation pharyngée pour la réalisation des consonnes emphatiques. Aucune étude aérodynamique n'avait été réalisée à l'époque, mais c'est probablement la nécessité

d'une variation, dans le sens d'une augmentation de la pression sous glottique pour la réalisation du trait « emphatique », qui expliquerait la tendance au resserrement des plis vocaux.

- les *consonnes uvulaires* sont réalisées par un mouvement de la partie haute de la racine de la langue plutôt dans le plan vertical et non vers l'arrière, avec une participation pharyngée mais ne faisant pas intervenir l'épiglotte.

- les *consonnes sourdes coronales /t/* ne s'accompagnent d'aucun mouvement de la racine de la langue ni de l'épiglotte.

- par contre, les *consonnes dites pharyngales h* et *ʕ* sont réalisées avec d'une part une constriction entre la paroi pharyngée postérieure et une partie plus ou moins haute de la face laryngée de l'épiglotte associée au recul de la racine de la langue, et d'autre part elles sont réalisées avec un rapprochement entre le sommet des aryénoïdes et le pied de l'épiglotte. Elles peuvent donc être considérées comme des consonnes « aryépiglottiques » avec un double lieu d'articulation pharyngo-épiglottique et ary-épiglottique. Ces observations physiologiques étaient concordantes avec celles suggérées par Esling (1996).

De nouvelles questions sont posées concernant le fonctionnement musculaire et moteur des différentes structures pharyngo-laryngées, leur autonomie, leur caractère actif ou passif dans les phénomènes articulatoires. Après revue de la littérature, force est de constater que très peu d'articles nous ont apporté une réponse claire. Certains auteurs comme Kimura *et al.* (2002) ont montré que les plis aryépiglottiques participent à l'articulation de la parole à des fins linguistiques. De plus Sakakibara *et al.* (2004) ont décrit des techniques vocales chantées utilisant exclusivement les bandes ventriculaires (BV) et les plis aryépiglottiques. Cependant, l'explication des mécanismes impliquant la contraction des bandes ventriculaires et des plis aryépiglottiques reste controversée. En se référant aux données histologiques et électromyographiques (EMG) (Kimura *et al.*, 2002 ; Sakakibara *et al.*, 2004), les auteurs soutiennent que l'adduction des BV peut se faire en contractant le muscle thyroépiglottique et surtout sa partie inférieure, le "ventricularis" dont des fibres pénètrent les bandes ventriculaires. Selon Reidenbach (1998b), les bandes ventriculaires contiennent des fibres musculaires qui exercent sur elles des forces vers l'intérieur (adduction latérale) et vers le bas. Le fait que l'adduction des BV persiste chez les patients ayant des lésions du nerf récurrent, suggère, selon ce même auteur (Reidenbach, 1998a), que ces fibres sont innervées par le nerf laryngé supérieur contrairement aux plis vocaux. Cette observation nous permettrait aussi d'expliquer pourquoi les patients ayant une paralysie récurrentielle unilatérale peuvent

compenser en développant un comportement supra-glottique avec serrage des bandes ventriculaires. Cependant, les variations anatomiques individuelles existent.

De plus, la distinction entre les consonnes décrites dans IPA comme « épiglottales » et « pharyngales » reposerait, selon Esling (1996), non seulement sur l'existence de mouvements actifs des structures pharyngo-laryngées, mais cette distinction mettrait aussi en jeu la notion de « degré de constriction du sphincter aryépiglottique » ainsi que la notion de degré (ou amplitude) de « vibration » des plis aryépiglottiques.

La poursuite de nos recherches s'est orientée vers l'exploration de la dynamique des mouvements pharyngo-laryngés et du comportement de la **muqueuse aryépiglottique**.

## 2. Le vibrateur pharyngo-laryngé

En 2004, nous avons acquis au LPP-HEGP une première caméra ultra-rapide (Vannier Photelec, Speedcam Lite) permettant l'utilisation du nasofibroscope à 500 images/secondes et de l'endoscope rigide à 2000 i/sec (Crevier-Buchman L., Vincent C. (2009) « Visualisation du larynx : endoscopie rigide et fibroscopie, stroboscopie et caméra haute vitesse ». In "Imagerie médicale pour l'étude de la parole" Marchal 2009, Eds Hermès; chap. 2, p 43-61). Le but était de pouvoir mieux explorer le comportement vibratoire ou ondulatoire de la muqueuse pharyngo-laryngée non seulement en clinique mais aussi en situation articulaire normale dans différentes langues. En effet, ce procédé permet une visualisation en temps réel des ondulations muqueuses et de leur lieu précis au niveau des plis vocaux, des bandes ventriculaires, des aryténoïdes et des plis aryépiglottiques.

Pour explorer la dynamique du conduit laryngé et déterminer s'il existe deux niveaux fonctionnels (glottique vs. supraglottique), ou trois (glottique, ventriculaire et aryépiglottique) contrôlables de manière autonome et/ou coordonnée, comme c'est de plus en plus souvent avancé dans la littérature (Catford *et al.*, 2006 ; Edmondson *et al.*, 2006), nous avons mené une nouvelle étude sur les consonnes de l'arabe marocain dans un contexte de [iCi] avec C [t d ? h ʕ]. Les données physiologiques ont été prises en nasofibroscopie avec d'une part une caméra vidéo à 25i/sec et d'autre part avec une caméra vidéo à grande vitesse à 500 i/sec. En effet, selon Esling (1996), le niveau aryépiglottique, c'est à dire l'espace entre la base de l'épiglotte, les plis aryépiglottiques et les aryténoïdes, aussi appelé espace supraglottique, peut être considéré comme un niveau de constriction autonome.

Nos résultats ont permis de montrer que :

- en caméra vidéo à 25 i/sec, nous avons constaté, de façon très nette, une indépendance de fermeture des plis vocaux par rapport aux plis aryépiglottiques. En effet, on observe i) un rapprochement partiel et probablement passif des bandes ventriculaires soit lors de la

fermeture des PV, soit lors de la contraction des plis aryépiglottiques dans le cas d'une constriction de la margelle laryngée et ii) une fermeture complète des BV, probablement active, sous l'action du muscle « ventricularis » (correspondant aux fibres inférieures du muscle thyroépiglottique, et aux fibres externes du muscle thyroaryténoïde). Ces constatations vont dans le sens des descriptions de Reidenbach (1998b), pour qui il y aurait une possible indépendance motrice des bandes ventriculaires.

- en caméra à grande vitesse, on a pu objectiver une vibration muqueuse non seulement au niveau des faces antérieures et latérales des aryténoïdes mais aussi tout le long des plis aryépiglottiques, pour la réalisation des trilles (oscillations) aryépiglottiques (Esling J, Zeroual C, Crevier-Buchman L. (2007) "A study of muscular synergies at the glottal, Ventricular and aryepiglottic levels" International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS), 6-10 Août 2007, pp. 585-588, Saarbrücken, Allemagne) ; (Zeroual C, Esling JH & Crevier-Buchman L. (2008) "The contribution of supraglottic laryngeal adjustments to voice: phonetic evidence from Arabic". "Logopedics Phoniatrics Vocology".2008 ; 33 :3-11).

En parole normale, il semble bien exister un articulateur aryépiglottique autonome avec une motricité propre et une ondulation muqueuse responsable de la source sonore. Ces observations rejoignent celles que nous avons faites en pathologie pour le néovibrateur laryngé après laryngectomie partielle. Les compensations ne sont donc pas le fait du hasard mais s'appuient sur une réalité anatomophysiologique.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Zeroual C, Esling JH & Crevier-Buchman L. (2008) "The contribution of supraglottic laryngeal adjustments to voice: phonetic evidence from Arabic". "Logopedics Phoniatrics Vocology"; 33 :3-11

### **Communication en rapport avec ce thème**

- C. Zeroual, L. Crevier-Buchman. « L'arabe marocain possède des consonnes épiglottales et non pharyngales ». XXIV Journées d'Etude sur la Parole (JEP), 24-27 juin 2002, Nancy, France. 237-240 ;  
- Zeroual, C., Crevier-Buchman, L., and Esling, J.H.. Ajustements laryngaux durant les consonnes gutturales et l'emphatique [S] simples et géminées de l'arabe marocain. XXVèmes Journées d'Etude sur la Parole, 19-22 avril 2004a, Fès, Maroc: 469-472. ;  
- Zeroual, C., Esling, J.H. and Crevier-Buchman, L.. "Ajustements supralaryngaux durant les consonnes gutturales et l'emphatique [S] simples et géminées de l'arabe marocain". XXVèmes Journées d'Etude sur la Parole, 19-22 avril 2004b, Fès, Maroc: 473-476  
- C. Zeroual, J Esling, L. Crevier-Buchman. "The contribution of supraglottic laryngeal adjustments to voice: phonetic evidence from Arabic" Pan European Voice Conference (PEVOC), 31 Aug - 3 Sept 2005, London, UK  
- J.H. Esling, C Zeroual, L. Crevier-Buchman. "A study of muscular synergies at the glottal, Ventricular and aryepiglottic levels" International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS), 6-10 Août 2007, pp. 585-588, Saarbrücken, Allemagne;

### *II-2.2.2. Les trilles aryépiglottiques*

Nous avons poursuivi notre collaboration avec J. Esling en développant les analyses du conduit vocal avec examen physiologique par vidéoendoscopie du pharyngo-larynx. Un objectif était d'explorer les comportements pharyngo-laryngés pour différents mécanismes afin de mieux comprendre les performances musculaires et les synergies nécessaires. Un autre objectif était de proposer des modélisations anatomophysiologiques pour illustrer les modèles acoustiques et articulatoires proposés par Esling dans le cadre de l'IPA (Edmondson and Esling, 2006). Ces bases anatomophysiologiques devraient nous guider vers une harmonisation terminologique des différentes places articulatoires pour la réalisation des sons. En ce sens, j'ai pu accueillir et guider un doctorant de J. Esling, Scott Moisik, de l'Université de Calgary, pour la prise de données et l'analyse de ses résultats lors de son travail de thèse en 2006 sur le thème "A Three-Dimensional Model of the Larynx and the Laryngeal Constrictor Mechanism: Visually Synthesizing Laryngeal and Pharyngeal Articulations Observed in Laryngoscopy".

Les plis aryépiglottiques sont intéressants à plusieurs titres. D'une part pour leur situation anatomique : ils sont parallèles aux plis vocaux, tendus entre les aryénoïdes en arrière et les bords latéraux de l'épiglotte en avant. Ils ont une position centrale antéropostérieure à l'entrée du conduit laryngé ou vestibule laryngé également appelé tube épilaryngé. La contraction serrée des plis aryépiglottiques permet une fermeture quasi hermétique du conduit laryngé permettant la protection des voies respiratoires. D'autre part, un intérêt majeur repose sur leurs capacités à produire du son qui se caractérise par un timbre en général grave et rauque, ce dernier pouvant varier selon l'articulation et les contrastes linguistiques. Ils ont un rôle primordial dans la réalisation de sons appartenant au groupe des consonnes pharyngales (Edmondson *et al.*, 2005). Au niveau acoustique, d'une part il existerait un couplage entre la source glottique et le reste du conduit vocal grâce à ce tube épilaryngé (Titze, 2008), d'autre part le tube épilaryngé participerait à la résonance du conduit vocal.

Notre collaboration avait pour but de caractériser et d'illustrer les phénomènes oscillatoires des trilles aryépiglottiques grâce à l'analyse en laryngoscopie avec caméra ultra rapide. Nos observations ont confirmé que les trilles (oscillations) aryépiglottiques peuvent être considérées comme une source sonore pouvant soit interférer avec la source glottique soit en être indépendante. Cependant, les capacités ondulatoires ou oscillatoires des plis aryépiglottiques sont très limitées en termes de contrôle de la fréquence de vibration, responsable du timbre rauque et grave.

L'indépendance entre source glottique et vibration aryépiglottique dans le tube épilaryngé est d'un intérêt majeur en clinique car elle permet de concevoir un système de compensation qui peut se mettre en place après laryngectomie partielle.

Les techniques de visualisation associées au modèle de Esling nous ont permis de découvrir et de comprendre une partie de la richesse des possibilités articulatoires du conduit pharyngo-laryngé et leur synergie en voix parlée.

Certaines techniques vocales artistiques ont des résultats acoustiques inhabituels et extrêmes. Qu'en est-il de leur comportement laryngé ?

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Moisik SR, Esling JH, Crevier-Buchman L. (2010) « A High-Speed Laryngoscopic Investigation of Aryepiglottic Trilling ». *J Acoust Soc Am* ; 127(3) :1548-58

### **Communication en rapport avec ce thème**

- SR. Moisik, JH. Esling & L Crevier-Buchman. "A Biomechanical Model of Aryepiglottic Trilling" *International Conference on Voice Physiology and Biomechanics (ICVPB)* 6-9 August, 2008, Tampere, Finland

#### *II-2.2.3. L'articulation aryépiglottique dans le chant Long Mongol*

Le chant Long Mongol est un chant traditionnel très ancien présentant de nombreuses ornements dont des vibratos, des trilles, des effets glottiques de yodle et des glissandi (Desjacques, 1990). La maîtrise de ce style est très laborieuse et nécessite de nombreuses années de travail pour arriver à la production de ces ornements qui demandent une agilité laryngée particulière grâce à un contrôle parfait des différents niveaux du conduit vocal et une indépendance de vibration des plis vocaux et des structures supra glottiques aryénoïdiennes et aryépiglottiques. Par une étude acoustique qualitative et une analyse en vidéo-fibroscopie des comportements laryngés, nous avons cherché à comprendre à travers une analyse descriptive, comment ces athlètes vocaux parviennent à jongler avec tous ces sons et à maîtriser leurs comportements laryngés pour obtenir le résultat acoustique escompté.

Aucune étude physiologique n'avait été réalisée précédemment pour décrire les comportements laryngés de ces chanteurs. Nous avons eu la chance d'étudier une chanteuse professionnelle qui a bien voulu se prêter à cet examen, poursuivant elle-même des études de musicologie et particulièrement intéressée par notre recherche. De plus, ces études devraient nous permettre de mieux comprendre les bases acoustiques qui caractérisent différentes formes d'ornementation. Nous avons donc procédé à des enregistrements acoustiques et physiologiques en nasofibroscopie.

L'examen laryngé a été réalisé avec un nasofibroscope (Kay-Pentax ® FNL10RP3, Japan), une lumière froide Xenon 300 W, et un système d'enregistrement vidéo (DigitalStrobe®, RLS91000, Kay Elemetrics, USA). Aucune anesthésie locale n'a été nécessaire et la chanteuse a pu chanter son aria pendant 4 minutes sans gêne.

La question des modalités d'analyse des images s'est posée pour réaliser des mesures fiables et reproductibles. Cette problématique a souvent été soulevée car jusqu'alors, nous avons recours aux échelles visuelles descriptives permettant une description qualitative des mouvements laryngés glottiques et supraglottiques pour les enregistrements de patients. Ici nous voulions comparer l'amplitude des mouvements, leur symétrie et leur direction, ce qui nécessite des mesures quantitatives même si elles restent relatives car nous n'avons pas la possibilité de mesurer réellement la distance entre le fibroscope et les tissus. Les enregistrements vidéo ont été analysés grâce au logiciel ImageJ (W. Rasband, 2011). Pour l'analyse des mouvements laryngés glottiques et supraglottiques lors de la production des trilles et des vibratos, nous avons sélectionné 4 points de référence permettant les mesures d'amplitude et de direction des déplacements latéraux (transversaux) et antéropostérieurs des aryténoïdes, des replis aryépiglottiques et de l'épiglotte.

Notre chanteuse a 2 principaux comportements laryngés selon qu'elle produit des vibratos ou des trilles. Les vibratos mettent en mouvement de façon parfaitement symétrique les structures laryngées, dans le plan antéropostérieur avec une oscillation périodique des aryténoïdes vers l'épiglotte à une fréquence d'environ 6 Hz/sec. Par contre, les trilles correspondent à des oscillations rapides et asymétriques des aryténoïdes dans le plan transversal, et complètement indépendantes du reste du larynx. Nous avons ainsi retrouvé les phénomènes observés précédemment lors de la production des « trilles aryépiglottiques ». De plus, cet aspect nous a fortement évoqué le comportement observé chez les patients ayant subi une LPSC avec une motricité supraglottique mettant en mouvement le plan aryépiglottique pour produire de la voix (Crevier-Buchman, L., Laccourreye, O., Weinstein, G., Garcia, D., Jouffre, V., & Brasnu, D. (1995). Evolution of voice and speech following supracricoid partial Laryngectomy. *Journal of Laryngology and Otology*, 109, 410-413).

En reprenant les notions d'articulation pharyngée décrites par Laver (1980) et par Esling (1996), le pharynx peut produire une voix pharyngalisée résultant du rétrécissement sphinctérien du conduit laryngé au niveau aryépiglottique. Selon le degré de constriction pharyngée, le son résultant peut être une occlusive pharyngale si la fermeture est serrée, ou une fricative pharyngale associée à des vibrations (trilles) irrégulières de la muqueuse des cartilages aryténoïdes et des plis aryépiglottiques. Dans cette situation articuloire, le larynx

est en position haute pour faciliter le rapprochement des aryténoïdes et de l'épiglotte. Après laryngectomie partielle supracricoidienne, on retrouve cette position haute du larynx, les aryténoïdes ont des mouvements irréguliers et asymétriques sur l'axe transversal et antéropostérieur pour se rapprocher de l'épiglotte, et les plis aryépiglottiques participent à la formation du sphincter néoglottique et à la source vibrante pour la production de la voix. Ce sont des voix qu'on peut appeler « voix aryépiglottiques » selon le lieu d'articulation (Moisik, S. R., Esling, J. H., Crevier-Buchman, L. (2010). A high-speed laryngoscopic investigation of aryepiglottic trilling. *J Acoust Soc Am*, 127(3), 1548-1558).

Dans le chant Long Mongol, les ornements sont produits essentiellement au niveau aryépiglottique comme le son qui est produit par nos patients après LPSC. Chez ces derniers, ce mécanisme compensatoire nécessite un entraînement pour orienter les mouvements de ces articulateurs vers la production de sons de la parole ; de même chez la chanteuse, l'apprentissage est long pour obtenir un contrôle parfait de cet articulateur. Cependant la qualité vocale n'est pas comparable ; En effet, on peut supposer que dans le chant, la source glottique (la vibration des plis vocaux) est le premier articulateur vocalique qui produit l'énergie acoustique de départ, alors que la source aryépiglottique agit comme un résonateur modulant l'onde acoustique pour produire les ornements. Nous n'avons pas observé d'ondulation muqueuse au niveau aryténoïdien ni des plis aryépiglottiques, mais seulement des mouvements rapides de ces structures (Crevier-Buchman L, Pillot Loiseau C, Riolland A, Vincent C, Desjacque A (2012) « Analogy between Laryngeal Gesture in Mongolian Long Song and Supracricoid Partial Laryngectomy ». *Clinical Phonetics and Linguistics* ; 26 : 86-99). Par contre, dans certains chants, comme les chants tibétains mais aussi d'autres styles de chants, le son serait produit par la vibration d'une part des plis vocaux et d'autre part simultanément des plis aryépiglottiques qui ont une vibration ample et lente (Kimura *et al.*, 2002). Chez les patients, la source est néoglottique au niveau de l'articulateur aryépiglottique avec les phénomènes de vibration de la muqueuse des plis aryépiglottiques. L'onde acoustique produite traduit la lente et irrégulière ondulation muqueuse (trilles aryépiglottiques) responsable de la voix grave et rauque.

L'articulateur aryépiglottique comme objet phonétique est un sujet qui continue de susciter beaucoup d'intérêt dans mes recherches et qui est loin d'être parfaitement élucidé. Nous allons poursuivre nos travaux vers une modélisation des différents comportements de compensation dans différentes pathologies vocales et différentes possibilités d'utilisation en voix chantée et artistique.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Crevier-Buchman, L., Laccourreye, O., Weinstein, G., Garcia, D., Jouffre, V., & Brasnu, D. (1995). Evolution of voice and speech following supracricoid partial Laryngectomy. *J Laryngology & Otology*, 109, 410-413
- Moisik, S. R., Esling, J. H., Crevier-Buchman, L. (2010). A high-speed laryngoscopic investigation of aryepiglottic trilling. *J Acoust Soc Am.*, 127(3), 1548-1558
- Crevier-Buchman L., Pillot Loiseau C, Rialland A, Vincent C, Desjacque A (2012) « Analogy between Laryngeal Gesture in Mongolian Long Song and Supracricoid Partial Laryngectomy ». *Clinical Phonetics and Linguistics*; 26: 86-99
- Garnier M, Henrich N, Crevier-Buchman L., Vincent C, Smith J, Wolfe J.(2012) “Glottal behavior in the high soprano range: where and how does the whistle voice begin?” *J Acoust Soc Am.* 131 (1) : 951-62

### **Communication en rapport avec ce thème**

- Pillot-Loiseau, Claire; Crevier-Buchman, Lise; Rialland, Annie; Narantuya; Vincent, Coralie; Desjacques, Alain. 2010, Videofiberoptic laryngeal data and acoustic analysis of the ornamentations used in Mongolian Long Song. *The Voice Foundation's 39th Annual Symposium: Care of the Professional Voice*, June 2010, Philadelphie, USA
- Crevier-Buchman, Lise ; Pillot-Loiseau, Claire; Rialland, Annie; Narantuya; Vincent, Coralie; Desjacques, Alain. « Analogy between laryngeal gesture and acoustics in mongolian long song and partial laryngectomy » *International Clinical Phonetics Linguistics Association (ICPLA)*, 29 Juin 2010, Oslo, Norvège
- Pillot-Loiseau C, Crevier-Buchman, Lise ; Rialland, Annie ; Narantuya ; Vincent, Coralie ; Desjacques, Alain « Vocal Registers Transitions Phenomena in trills used in Mongolian Long Song productions », PanEuropean Voice Conference (PEVOC)9 sept 2011

## ***II-3. Vers une caractérisation acoustico-perceptive de la voix***

### ***après chirurgie partielle du larynx***

La pathologie laryngée produit une altération de la qualité de la voix, qui se traduit par une modification du timbre. Cette altération résulte d'une interaction inadéquate entre phénomènes aérodynamique, acoustique et biomécanique de la glotte et du conduit vocal.

La qualité vocale est un attribut perceptif donnant à l'évaluation perceptive son statut de référence ou de « gold standard ». Quant à l'analyse acoustique, elle vient d'un besoin de quantification de la fonction vocale pour une meilleure évaluation de la qualité vocale. Ainsi, les mesures acoustiques des différentes voix de substitution présentent un intérêt certain en recherche pour la caractérisation de ces voix. La littérature fait état d'une différence notable entre les paramètres acoustiques des voix normales et ceux des voix de substitutions entre autre pour les paramètres d'intensité, de débit phonatoire, de hauteur de la voix, de stabilité de la fréquence fondamentale et des facteurs de perturbation du signal ainsi que des paramètres aérodynamiques (Blood, 1984). Les paramètres de perturbation dépendent étroitement de la régularité du cycle vibratoire dans le domaine temporel pour mesurer les variations d'un cycle à l'autre.

Comme les voix de substitution sont produites par un néovibrateur laryngé autre que les plis vocaux, sans possibilité de contrôle volontaire, et siège d'une asymétrie et d'une asynchronie de vibration (Jiang *et al.*, 2003), elles se caractérisent donc par un signal apériodique, irrégulier et instable. De plus, comme les mesures des paramètres d'instabilité dépendent de la fréquence fondamentale, elles perdent leur fiabilité en raison de l'apériodicité du signal (Schoentgen, 1989 ; Karnell *et al.*, 1995 ; Schoentgen *et al.*, 1995 ; Schoentgen *et al.*, 1997).

Nos études ont confirmé la traduction acoustique de ces voix de substitution avec comme caractéristique une hauteur vocale plus grave et une diminution des possibilités de modulation, un débit phonatoire ralenti, des paramètres d'instabilité de la F0 souvent très augmentés (jitter et shimmer), et une composante de bruit surajouté au signal. L'automatisation des analyses acoustiques pour la mesure des paramètres temporels est un frein à ces évaluations car l'apériodicité du signal désorganise les algorithmes de détection de l'onde acoustique. Le recours à des analyses fréquentielles surtout spectrales devient nécessaire ainsi que le développement d'autres dimensions, dont la perception, pour appréhender ces voix particulières, les comprendre, en établir les limites d'efficacité et ainsi en guider la réhabilitation. Ainsi nos études sur les caractéristiques acoustiques des voix de substitution ont été complétées par des évaluations perceptives que nous avons développées pour les rendre plus pertinentes et adaptées à nos objectifs.

Nous avons testé différentes échelles perceptives pour la qualité vocale et l'intelligibilité de la parole, sélectionné les analyses acoustiques les plus fiables et pertinentes pour objectiver les productions normales ou déviantes des différentes consonnes, de leur voisement et de la coarticulation.

Comme précédemment, les recherches en phonétique clinique sont soumises à des contraintes méthodologiques et de population que nous allons préciser.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Crevier-Buchman L, Laccourreye O, Weinstein G, Garcia D, Jouffre V, Brasnu D. (1995) "Evolution of voice and speech following supracricoid partial Laryngectomy". *J Laryngol Otol*; 109:410-413.
- Laccourreye O, Crevier-Buchman L, Weinstein G, Biacabe B, Laccourreye H, Brasnu D. (1995) "Duration and frequency characteristics of speech and voice following supracricoid partial laryngectomy". *Ann Otol Rhinol Laryngol*;104 : 516-521
- Laccourreye O, Crevier-Buchman L, Weinstein G, Jouffre V, Laccourreye H, Brasnu D. (1995) "Acoustic parameters and speech analysis after supracricoid hemilaryngopharyngectomy". *Laryngoscope*; 105: 1223-1226
- Crevier-Buchman L, Laccourreye O, Monfrais-Pfauwadel MC, Menard M, Jouffre V, Brasnu D. (1994) « Evaluation informatisée des paramètres acoustiques de la voix et de la parole après laryngectomie partielle supracricoidienne avec cricohyoïdoépiglottopexie ». *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*; 111: 397-401.

- Crevier-Buchman L, Laccourreye O, Papon JF, Monfrais Pfauwadel MC, Brasnu D. (1996) « Apport et limites de l'analyse acoustique de la voix et de la parole alaryngée au moyen d'un système informatique ». *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*; 113: 61-68

- Crevier-Buchman L, Laccourreye O, Wuyts F, Monfrais-Pfauwadel MC, Pillot C, Brasnu D. (1998) "Comparison and evolution of perceptual and acoustic characteristics of voice after supracricoid partial laryngectomy with cricohyoidoepiglottopexy". *Acta Otolaryngol. (Stockh)* ; 118 :594-99

### **II-3.1. Les contraintes liées au choix des protocoles**

Pour chaque étude, il est nécessaire d'élaborer des corpora adaptés et spécifiques aux sujets d'étude pour objectiver les contraintes phonatoires et articulatoires d'une part, et mettre en évidence les variabilités, d'autre part. Mais avant de l'appliquer aux patients, il est indispensable de tester les protocoles sur une population témoin. Le but est de vérifier la faisabilité de ces protocoles en terme de durée des épreuves (pour éviter la fatigue des patients), de la compréhension des consignes (quel que soit le niveau socioculturel et le niveau d'étude), de la complexité des tâches (pour ne pas mettre en échec) et de vérifier les méthodes de passation (conditions de recueil des données). Le choix des protocoles doit permettre d'être applicable à tous pour assurer la reproductibilité et la fiabilité des études. Par ailleurs, il est important de prévoir les difficultés de traitement des données chez les témoins afin d'adapter la méthodologie chez les patients. Une contrainte à prendre en compte est que les différentes situations de parole doivent être enregistrées au cours de la même séance. En effet, il n'est pas possible de re-convoquer les patients pour compléter un protocole comme on le ferait avec une cohorte d'étudiants en phonétique. La sélection des tâches au sein du protocole doit permettre de répondre aux hypothèses et à la problématique de la recherche.

En tenant compte des recommandations précédentes, et de mon expérience au laboratoire d'exploration de la parole à l'INSERM à l'hôpital de la Salpêtrière chez le Dr Claude Chevré-Muller, nous avons élaboré un protocole complet permettant de répondre à différentes hypothèses et de couvrir différentes pathologies. Il est identique pour tous les patients et pour la population témoin, à chaque enregistrement. Dans une cabine insonorisée, les patients doivent effectuer différentes tâches phonatoires : réciter des séries automatiques comme compter de 1 à 10, lire une liste de syllabes comprenant toutes les consonnes du français en situation initiale, intervocalique et finale, lire une liste de mots dont la durée est étalonnée et présentant une spécificité de coarticulation, lire une phrase intonative, réaliser la tenue prolongée de la voyelle [a] et les 5 voyelles cardinales, et lire un texte standard français de 170 mots. Ces différentes tâches sont utilisées pour analyser le timbre mais aussi les paramètres de fréquence et de durée, les contraintes de co-articulation ainsi que l'intelligibilité

de la parole. Ces enregistrements servent aux évaluations perceptives et aux analyses acoustiques. Dans nos études, deux situations de production sont spécifiques :

- la voyelle [a] tenue prolongée à une intensité et une hauteur confortable pendant au moins trois secondes en incluant le début de la voyelle (onset) et la portion stable qui reflète le fonctionnement de la source sonore ; cette voyelle est celle qui nécessite le moins de contraintes articulatoires et donc le moins d'effort pour les patients ; elle permet l'évaluation du timbre et sera aussi utilisée pour les analyses acoustiques. Elle permet aussi la mesure du Temps Maximum de Phonation (TMP),

- la parole au cours de la lecture d'un texte français standard de 170 mots. Ce texte permet la mesure du débit phonatoire (nombres de mots lus/minute) et l'évaluation des variations prosodiques. L'analyse perceptive a porté sur la première minute de lecture du texte. Cette durée est considérée comme suffisante pour obtenir un jugement perceptif fiable.

D'un point de vue de l'analyse acoustique, une grande vigilance est nécessaire quant à la sélection et l'utilisation des protocoles actuellement disponibles pour évaluer une voix. Nous devons tester, analyser et sélectionner les explorations qui sont les plus adaptées selon le degré de pathologie et d'altération vocale (de la voix normale à la voix de substitution en passant par différents degrés de dysphonie). En effet, la grande majorité des études acoustiques repose sur la détection automatique de la fréquence fondamentale (F0) mais cette dernière peut être profondément modifiée voir inexistante dans les voix pseudo périodiques ou a périodiques. Les modes de calcul des autres paramètres qui découlent de la F0 seront eux aussi perturbés. Il est donc intéressant et parfois nécessaire d'analyser le signal non plus avec des méthodes automatiques informatisées mais en ayant recours aux méthodes manuelles temporelles et fréquentielles.

### **II-3.2. Les évaluations perceptives des voix de substitution**

L'évaluation perceptive cherche à définir les voix entendues d'un point de vue esthétique pour la qualité vocale (timbre), du degré global de perturbation phonétique (identification des sons) et de son retentissement sur les possibilités linguistiques de communication (intelligibilité et efficacité de la parole). C'est pourquoi l'évaluation perceptive est une des méthodes les plus utilisées en clinique pour évaluer une voix et elle reste la référence qui permet la comparaison aux autres méthodes d'évaluation de la voix. Elle doit décrire, voire quantifier les différents aspects de la qualité de la voix pathologique d'une façon fiable et reproductible (de Krom, 1994 ; Kreiman *et al.*, 1996).

La voix révèle l'identité de l'individu. Perçue par un auditeur, elle est soumise à un jugement qualitatif. Ce critère de qualité est loin de faire l'unanimité selon qu'il est pensé par des philosophes, médecins, scientifiques, artistes, linguistes, phonéticiens. Selon l'intérêt de chaque groupe, des caractéristiques de normalité ou de pathologie ont été décrites au travers de valeurs normatives propre a chaque catégorie de voix (Laver, 1980 ; Laver *et al.*, 1980 ; Kreiman *et al.*, 1992), et des règles méthodologiques ont été définies pour son évaluation (Hirano, 1981b), (Dejonckere PH., Remacle M., Fresnel-Elbaz E., Woisard V., Crevier-Buchman L., Millet B.(1996). Differential perceptual evaluation of pathological voice quality : reliability and correlation with acoustic measurements. *Revue de Laryngologie Rhinologie Otologie*, 117 : 219-224) ; (Dejonckere PH., Remacle M., Fresnel-Elbaz E., Woisard V., Crevier-Buchman L., Millet B.(1998). Reliability and clinical relevance of perceptual evaluation of pathological voices. *Revue de Laryngologie Rhinologie Otologie*, 4 : 247-248.)

En l'absence d'une définition de normalité qui recueille l'unanimité, une définition pourrait être proposée où la voix normale serait une voix adaptée, confortable et efficace, qui doit permettre l'expression des émotions et qui, de plus, doit correspondre au sexe et à l'âge du locuteur (Laver, 1980).

La voix est le support privilégié de la communication. Toute modification ou perte de la voix va retentir, à des degrés variables selon chaque individu, sur sa relation avec les autres. Cette modification peut être soit organique, faisant suite à une modification constitutionnelle du vibrateur et/ ou du conduit vocal, soit fonctionnelle (forçage, douleur musculaire, gêne laryngée), soit esthétique (raucité, voix soufflée, aggravée). Ces altérations peuvent entraver les interactions sociales.

La perception des voix, leur caractérisation et la constitution d'échelles adaptées pour les décrire est un de mes axes de recherche appliqués aux différentes pathologies vocales. Le but est d'évaluer le handicap, exprimé d'une part par l'auditeur grâce à des échelles d'évaluation perceptive, et d'autre part par le locuteur (ici le patient) au moyen d'échelles d'auto-évaluation de la qualité de vie, et de proposer une remédiation la plus adaptée possible.

Cependant, les jugements perceptifs de la qualité vocale sont fondamentalement subjectifs et peuvent subir l'influence de plusieurs sources de variations susceptibles de compromettre leur fiabilité (Kreiman *et al.*, 2000). Une meilleure compréhension des facteurs qui influencent la fiabilité des évaluations perceptives peut guider le choix du protocole, orienter le choix du

jury d'écoute, des auditeurs ainsi que des échelles d'évaluations. Peu d'études ont été publiées sur les résultats fonctionnels vocaux après chirurgie partielle laryngée.

Mes travaux de thèse m'ont permis d'établir un cadre pour l'évaluation perceptive des voix dites de substitution et j'ai participé à l'élaboration de recommandations européennes pour un bilan fonctionnel de la voix (Dejonckere P, Bradley P, Clemente P, Cornut G, Crevier-Buchman L, Friedrich G, Van De Heyning P, Remacle M, Woisard V. (2001) "A basic protocol for functional assessment of voice pathology". *Eur Arch Otorhinolaryngol*; 258: 77-82).

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Dejonckere PH., Remacle M., Fresnel-Elbaz E., Woisard V., Crevier-Buchman L, Millet B.(1996). Differential perceptual evaluation of pathological voice quality : reliability and correlation with acoustic measurements. *Revue de Laryngologie Rhinologie Otolologie*, 117 : 219-224. ;
- Dejonckere PH., Remacle M., Fresnel-Elbaz E., Woisard V., Crevier-Buchman L, Millet B.(1998). Reliability and clinical relevance of perceptual evaluation of pathological voices. *Revue de Laryngologie Rhinologie Otolologie*, 4 : 247-248
- Dejonckere P, Bradley P, Clemente P, Cornut G, Crevier-Buchman L, Friedrich G, Van De Heyning P, Remacle M, Woisard V. (2001) "A basic protocol for functional assessment of voice pathology". *Eur Arch Otorhinolaryngol*; 258: 77-82

#### *II-3.2.1. Le choix des jurys d'écoute*

Dans le prolongement des études menées sur la justification du choix du jury d'écoute, j'ai participé à une étude collective pour comparer la fiabilité des jurys d'écoute composés de jurys avertis ou naïfs. Le but était de souligner l'intérêt de chaque groupe selon les objectifs des études par rapport aux voix pathologiques (Dejonckere P, Remacle M, Fresnel-Elbaz E, Woisard V, Crevier-Buchman L, Millet B. (1998) "Reliability and clinical relevance of perceptual evaluation of pathological voices". *Rev laryngol Otol Rhinol*; 119 : 247-248).

Dans nos études sur des voix très pathologiques, nous avons cherché à évaluer la différence de perception qu'il pouvait y avoir entre un jury naïf et un jury averti ainsi que la fiabilité et la concordance de jugement entre les deux groupes. Dans la littérature, pour l'évaluation des dysphonies, les auteurs s'accordent pour dire que l'expérience du jury est un facteur essentiel et que les auditeurs avertis sont plus constants et plus fiables que des auditeurs non expérimenté (Hammarberg *et al.*, 1980 ; Kreiman *et al.*, 1992 ; De Bodt *et al.*, 1997). La diversité des échelles d'évaluation perceptive souligne le caractère multidimensionnel de la perception des voix pathologiques. Chaque auditeur, quelle que soit son expérience, a une grande richesse descriptive des qualités perceptives des voix, ce qui peut rendre les résultats des jurys hétérogènes. C'est une des raisons pour lesquelles l'évaluation perceptive est aussi appelée subjective. Il existe une différence de stratégie de la part des juges avertis ou naïfs dans l'évaluation d'une voix selon le référent interne de la

qualité vocale. Comme les voix de substitution ne font pas habituellement partie de notre environnement sonore, il était intéressant de mesurer les variations de l'évaluation perceptive des deux groupes de jurys. De plus, l'expérience du jury (averti ou naïf) influe sur les possibilités d'identification des consonnes, principalement pour le lieu de l'articulation. Dans la tâche complexe d'identification des consonnes, le jury naïf a eu plus de mal à comprendre les consignes et la fiabilité intra et inter jury était moins bonne que pour le jury averti (Crevier-Buchman L, Vaissiere J, Maeda S, Brasnu D. (2002) « Etude de l'intelligibilité des consonnes du français après laryngectomie partielle supracricoidienne ». *Rev Laryngol Otol Rhinol*; 123,5 :307-310).

Mes études perceptives pour les voix de substitution m'ont permis de conclure qu'il était préférable d'avoir un jury homogène composé soit d'auditeurs avertis soit d'auditeurs naïfs. Le choix entre jury averti ou naïf va dépendre de la situation écologique que nous recherchons, avec une bonne évaluation de la performance vocale et des tâches d'identification des sons de la parole pour le jury averti, alors que le jury naïf a une meilleure concordance et un meilleur accord pour l'évaluation de l'impact social de l'esthétisme de la voix. Cette règle de choix du jury d'écoute s'applique à toutes nos études.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Crevier-Buchman L, Martigny E, Gate C, Pillot C, Tessier Ch, Monfrais-Pfauwadel MC, Brasnu D (1995) « Evaluation subjective de la voix et de la parole après laryngectomie partielle supra-cricoidienne ». *Rev Laryngol Otol Rhinol* ; 116: 273-276.
- Dejonckere P, Remacle M, Fresnel-Elbaz E, Woisard V, Crevier-Buchman L, Millet B. (1998) "Reliability and clinical relevance of perceptual evaluation of pathological voices". *Rev laryngol Otol Rhinol*; 119 : 247-248
- Crevier-Buchman L, Vaissiere J, Maeda S, Brasnu D. (2002) « Etude de l'intelligibilité des consonnes du français après laryngectomie partielle supracricoidienne ». *Rev Laryngol Otol Rhinol*; 123,5 :307-310

#### *II-3.2.2. Les échelles perceptives*

Une autre étude, initiée à partir des résultats de ma thèse, a consisté en l'élaboration d'une échelle spécifique pour les voix de substitution. En effet, nous avons fait le constat de l'inadéquation de l'échelle d'évaluation perceptive utilisée habituellement pour les dysphonies, à savoir l'échelle GRBAS (Hirano, 1981a) car elle ne s'intéresse qu'au timbre vocal. Ce timbre est toujours sévèrement modifié dans les cas de chirurgie partielle et nous perdons les possibilités de nuances dans l'évaluation de l'altération. Nous avons donc recherché des dimensions dans les domaines esthétiques, kinesthésiques, articulatoires, comportementales et d'efficacité communicationnelle qui pourraient traduire la qualité vocale

à un instant donné. De plus, nous souhaitons que cette échelle soit capable d'être un marqueur de l'évolution. Enfin, cette échelle d'évaluation doit être simple pour ne pas entraîner de fatigabilité et modifier la concentration chez l'auditeur, elle doit être reproductible et facile à utiliser en clinique.

Les résultats de nos analyses ont permis de conclure que la modification du timbre est suffisamment importante avant la chirurgie (voix laryngée) et en postopératoires après laryngectomie partielle (voix de substitution) pour que les résultats soient statistiquement significatifs en utilisant l'échelle GRBAS. Par contre, l'échelle GRBAS est insuffisamment sensible pour évaluer l'évolution postopératoire des voix de substitution, car elle ne concerne que le timbre qui est toujours rauque et ne permet pas de nuancer les degrés d'altération de la raucité, du souffle ou du comportement phonatoire. De plus, une caractéristique de ces voix de substitution est d'avoir une profonde altération du voisement en postopératoires immédiat, et l'évolution favorable se mesure sur l'acquisition du voisement ou la sonorisation qui réapparaît entre trois et six mois postopératoires. A partir de ces résultats, en collaboration avec une équipe Belge (M. Moerman), j'ai participé à la validation d'une échelle prenant en compte non seulement des items d'évaluation du timbre mais aussi des paramètres de prosodie. Une nouvelle sélection d'items a été guidée par les tests statistiques de corrélation de Pearson pour finalement retenir l'échelle IINFVo : I : *Impression* (impression générale ou grade de la dysphonie), I : *Intelligibility* (Intelligibilité globale de la parole), N : *Noise* (bruit surajouté au signal autre que celui produit par la source), F : *Fluency* (en rapport avec le débit phonatoire), et Vo : *Voicing* (voisement). Nous avons alors cherché à valider cette nouvelle échelle par une étude multicentrique et européenne (France, Belgique et Pays-Bas). Cette échelle a été testée par 24 jurys expérimentés à partir de 113 échantillons vocaux produits par 68 patients. Cette nouvelle échelle multidimensionnelle s'est révélée suffisamment sensible et robuste pour suivre l'évolution de la voix en postopératoires et pour quantifier l'amélioration vocale (Moerman M, Martens JP, Crevier-Buchman L, Woisard V, Dejonckere P. (2005) « Evaluation perceptive des voix de substitution : l'échelle I(I)NFVo ». *Rev Laryngol Otol Rhinol*; 126: 323-5); (Moerman M, Martens JP, Crevier-Buchman L, Dejonckere P, Woisard V. (2006) "The INFVo perceptual rating scale for substitution voicing: development and reliability". *European Archives of Otolaryngology* ; 263:435-9).

Notre contribution repose sur la création d'une échelle perceptive fiable et reproductible adaptée aux voix de substitution. L'échelle GRBAS est suffisante pour l'évaluation des voix dysphoniques et pour la comparaison des voix en pré- et postopératoires, alors que l'échelle IINFVo est adaptée aux voix de substitution pour le suivi longitudinal en postopératoires.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Moerman M, Martens JP, Crevier-Buchman L, Woisard V, Dejonckere P. (2005) « Evaluation perceptive des voix de substitution : l'échelle I(I)NFVo ». *Rev Laryngol Otol Rhinol*; 126: 323-5)
- Moerman M, Martens JP, Crevier-Buchman L, Dejonckere P, Woisard V. (2006) "The INFVo perceptual rating scale for substitution voicing: development and reliability". *European Archives of Otolaryngology*; 263:435-9

#### *II-3.2.3. Le voisement des consonnes*

Les voix de substitution sont caractérisées non seulement par une altération du timbre mais aussi par un retentissement sur l'intelligibilité de la parole. En effet, la modification de longueur du conduit vocal et la perte d'indépendance entre la source, le conduit vocal et la langue auront des conséquences sur l'articulation des sons de la parole, entre autres pour l'intelligibilité des consonnes en rapport avec le voisement.

Le passage d'un son voisé à un son non voisé nécessite l'arrêt de la vibration des plis vocaux (facteurs aérodynamiques) et une abduction relative sous l'action du muscle cricoaryténoïdien postérieur (CAP) (Hirose, 1976 ; Hirose, 1977 ; Ladefoged, 1983). Par ailleurs, le dévoisement peut être passif également sous l'influence de facteurs aérodynamiques (Stevens, 1991).

Dans notre modèle de voix après laryngectomie partielle, on ne peut plus parler de vibration des plis vocaux, mais nous avons vu qu'il existe une vibration de la muqueuse du néovibrateur laryngé, bien qu'irrégulière, asymétrique et ralentie. Les mouvements d'adduction - abduction sont aussi possibles, mais là encore, ces mouvements sont ralentis et il existe une certaine inertie du système.

Nous avons cherché à comprendre les raisons d'éventuelles confusions par référence aux modifications anatomo-physiologiques après laryngectomie partielle. Pour cela, nous avons mené une étude de l'intelligibilité des consonnes du français et des tests de perception du voisement de ces consonnes en situation syllabique. En raison de l'altération de la source vocale, on pouvait s'attendre à une dégradation du voisement, mais il ne devrait pas y avoir d'altération du lieu d'articulation puisque l'oropharynx et la cavité buccale ne sont pas modifiés par l'intervention. Nous avons enregistré 10 patients à 18 mois postopératoires

auxquels on a demandé de lire une liste de syllabes de type C-V (C : consonne ; V : voyelle) puis VCV pour explorer le paradigme articulatoire. Les 16 consonnes du français étaient prononcées en initiale dans un contexte vocalique [a] (/pa/) puis en intervocalique (/apa/). Nous avons pris 3 auditeurs naïfs et 3 auditeurs avertis. Les résultats de chaque test ont été mis sous forme d'une matrice de confusion à 16 entrées, (les 16 consonnes) et regroupant les résultats des dix patients évalués par six auditeurs, une matrice pour les auditeurs avertis (A) et une matrice pour les auditeurs naïfs (N). A partir de ces deux matrices (jury averti et naïf), nous avons fait trois autres matrices, correspondant au voisement, pour la distinction sourde / sonore, au lieu d'articulation (labial, alvéolaire et palato-vélaire), et au mode de constriction (occlusives, fricatives).

Une hypothèse était que les consonnes placées en initiales sont plus facilement identifiées que les consonnes en position intervocaliques ou finales. Le geste d'adduction pour réaliser une consonne voisée en position intervocalique est différent de celui nécessaire pour réaliser un voisement en position prévocale. En effet, initier ou arrêter la vibration dans un continuum sonore, peut demander un ajustement fin et rapide difficile à réaliser chez nos patients. Nos résultats n'ont pas confirmé ces hypothèses, le voisement étant aussi difficile en initial qu'en intervocalique.

- *l'identification des consonnes* occlusives placées en initiales a mis en évidence une tendance à la *désonorisation* des consonnes sonores aussi bien pour les consonnes vélares [g] avec 31% de confusion avec le [k], que la consonne labiale [b] qui est confondue avec le [p] dans 31%, et la consonne alvéolaire [d] avec 29% de confusion en faveur du [t]

- *l'identification des consonnes* occlusives placées en intervocalique a mis en évidence une tendance à la *désonorisation* des consonnes sonore aussi bien pour les consonnes vélares [g] avec 31% de confusion avec [k] et les consonnes labiales [b] avec 33% de confusion avec le [p], et la consonne alvéolaire [d] avec 22% de confusion en faveur du [t].

L'altération du voisement se situe sur les consonnes homorganiques. Les patients semblent favoriser l'articulation consonantique au détriment du voisement avec une désonorisation des consonnes sonores.

Malgré ces confusions, la parole de nos patients reste intelligible. Quels sont les mécanismes de compensation utilisés ? Nous allons poursuivre nos recherches en nous intéressant aux facteurs aérodynamiques qui sous-tendent la production de la parole pour les dimensions prosodiques.

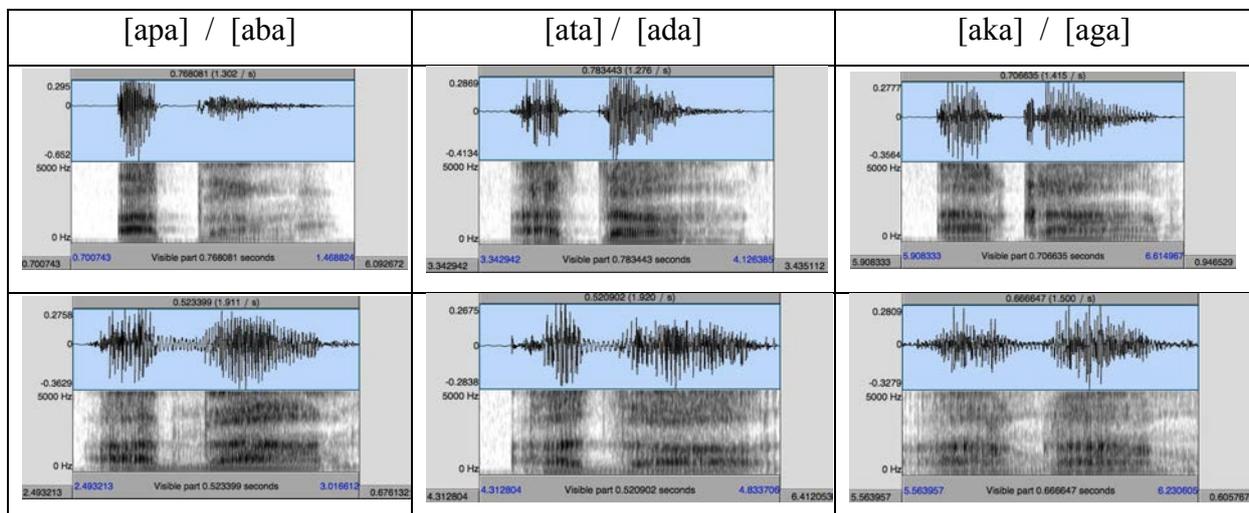
Cette étude perceptive a été complétée par des analyses spectrographiques pour objectiver quels étaient les indices acoustiques qui permettent de confirmer l'altération du voisement.

Nous avons ainsi pu identifier deux indices robustes pour les voix de substitution :

- la présence ou non de la barre de voisement et
- la durée de la consonne, la consonne sourde étant plus longue que la consonne sonore.

Les autres descripteurs classiques du voisement et des phénomènes de co-articulation avec identification des consonnes comme le « Voice onset time » (VOT), les transitions formantiques ou les mesures de l'intensité et de la durée du « burst » ont été plus difficiles à identifier en raison de la faible intensité du signal, du bruit surajouté, de la fréquence grave et irrégulière (pseudopériodique) de ces voix de substitution.

Spectrogramme des syllabes produites par un patient ayant subi une LPSC 7 ans auparavant.



Les résultats de ces études ont un intérêt d'une part pour *établir des recommandations* méthodologiques sur les indices acoustiques pertinents et fiables à rechercher et à mesurer pour analyser les voix de substitution, et d'autre part pour *guider la rééducation*. Dans notre population, le but de la rééducation est d'améliorer la production des catégories phonétiques en insistant d'une part sur le travail de placement de la langue et d'autre part sur les contraintes de voisement pour une meilleure intelligibilité. La durée des consonnes peut être un indice intéressant à travailler en rééducation pour favoriser le contrôle du voisement des patients après chirurgie partielle du larynx. Les variations de débit phonatoire peuvent aussi participer à l'amélioration de l'identification du voisement.

## Communications en rapport avec ce thème

- Crevier-Buchman L. (2004). "Articulatory compensations after supracricoid partial laryngectomy", *European Union of Federations of OtoRhinoLaryngological Societies (EUFOS)*, Proceedings, sept 04, Rhodes, Grèce;
- L. Crevier-Buchman, D. Brasnu, J. Vaissiere.(1999) "Voice intelligibility after supracricoid partial laryngectomy" *International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS)*, Août 1999;3:1815-18, San Francisco, USA;
- L. Crevier-Buchman, S. Maeda, D. Brasnu, P. Halimi, J. Vaissiere.(2000) "Phonetic consequences of supracricoid partial laryngectomy : phonation-articulation trade-off : articulatory compensation". *5<sup>th</sup> seminar on Speech Motor Control*, Mai 2000, Kloster Seeon, Munich;
- L. Crevier-Buchman, J. Vaissiere, D. Brasnu, S. Maeda. (2002) "French consonant identification after supracricoid partial laryngectomy" *International Clinical Phonetics Linguistics Association (ICPLA)*, May 2002, Hong-Kong, Chine
- Crevier-Buchman L. (2004). "Perceptual and acoustic correlation in consonant identification after partial laryngectomy", *International Conference on Voice Physiology and Biomechanics (ICVPB)*, Proceedings,17-20 août 04, Marseille, France
- Dominique Cléro, 12.12.2000 « *Les consonnes du français en position intervocalique après laryngectomie partielle supracricoidienne avec crico-hyoïdo-épiglotto-pexie* » DEA, Université Paris 3 - Sorbonne Nouvelle (dir: J. Vaissière ; L. Crevier-Buchman).
- L. Crevier-Buchman, S. Maeda, D. Brasnu, J. Vaissiere. (2003). "Perceptual and Acoustic correlation in consonant identification after partial laryngectomy". Actes du « *International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS)*, Barcelone, Espagne, Août 2003.
- E. Behm, L. Crevier-Buchman, S. Hans, J. Vaissiere, D. Brasnu, S. Maeda. (2002) "Perceptual scale for laryngeal substitution voices". *International Clinical Phonetics Linguistics Association (ICPLA)*, Hong-Kong, May 2002
- L. Crevier-Buchman, S. Hans, J. Vaissiere, S. Maeda, D. Brasnu (2002) « Identification des consonnes du français en syllabes isolées après laryngectomie partielle supracricoidienne ». *JEP* 2002, Nancy, Juin 2002 : pp189-192
- L. Crevier-Buchman, S. Maeda, D. Brasnu, P. Halimi, J. Vaissiere (2001). "Specific voice treatment after supracricoid partial laryngectomy : a phonetic study" *PEVOC IV*, Stockholm, Suède, Août 2001

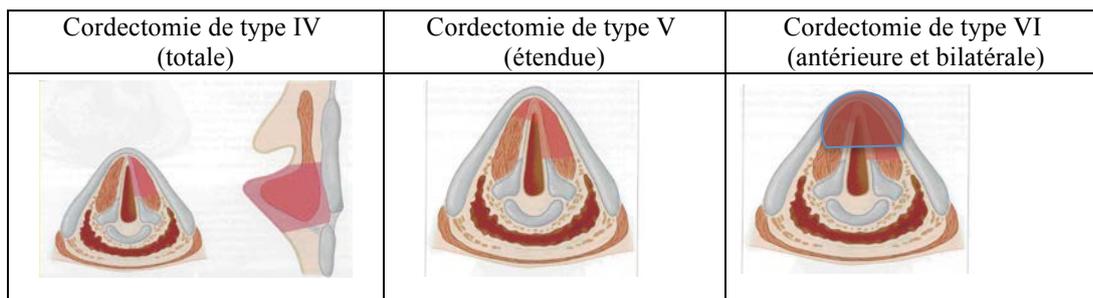
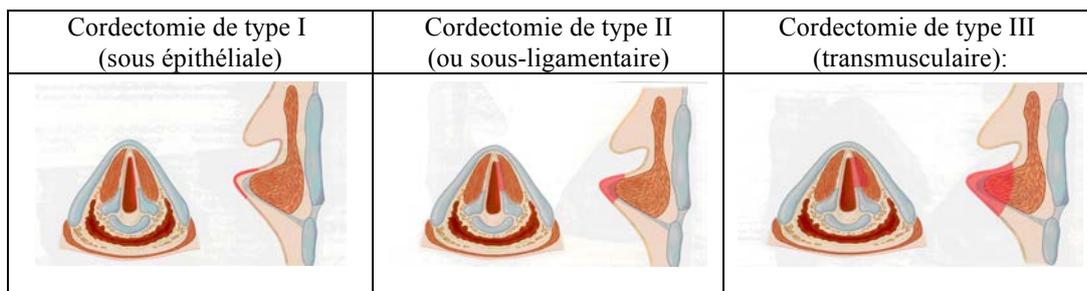
### II-3.3. Evolution des voix après cordectomies par voie endoscopique

#### II-3.3.1. Particularités de ces chirurgies minimalement invasives

Progressivement au cours des années 90, les travaux anatomiques sur la structure des PV (Hirano, 1974 ; Hirano and Kakita, 1985), les progrès technologiques des lasers, des optiques et du microscope opératoire et les connaissances des modes d'extension des cancers du pli vocal ont permis le développement de la chirurgie minimalement invasive par voie endoscopique pour les cancers limités au plan glottique.

Les laryngectomies partielles par voie endoscopique (ou cordectomies) représentent une réelle avancée technique des traitements de cancers de stade précoce. Elles s'adressent aux tumeurs « limitées » du pli vocal : états précancéreux, carcinomes in situ (Tis) et tumeurs de stade T1 et parfois T2 du plan glottique, selon la nomenclature internationale (UICC) (Union Internationale Contre le Cancer, 2003). Elles sont validées pour les cancers du larynx de faible volume avec des résultats équivalents en terme de taux de préservation laryngée et de sécurité carcinologique par rapport à la chirurgie conservatrice par voie externe (Ledda *et al.*, 2006). Le type de cordectomie sera dicté par la localisation et l'extension de la tumeur sur le pli vocal et en profondeur dans son infrastructure, selon la classification de « European Laryngological Society » (ELS) (Remacle *et al.*, 2000) (voir schémas). On peut résumer la

classification des cordectomies comme suit : Type I correspond aux cordectomies sub-épithéliales, Type II et III correspond aux cordectomies sous-ligamentaires et trans-musculaires, respectivement, Type IV correspond aux cordectomies trans-musculaire étendues au péri-chondre interne du cartilage thyroïde, et Type V (a, b, c) correspond aux cordectomies étendues soit en avant à la commissure antérieure et au pli vocal controlatéral soit en arrière au cartilage aryténoïde. Plus la résection est importante, plus il y a des risques que les résultats fonctionnels vocaux soient altérés par insuffisance de fermeture glottique (voix soufflée). En 2007, une révision de cette classification a été proposée avec adjonction d'un Type VI correspondant aux traitements proposée pour les lésions étendue de la commissure antérieure (Proposal for revision of the European Laryngological Society classification of endoscopic cordectomies. Remacle et al. European Archives of Oto-rhinolaryngology ; vol. 264, no. 5, pp. 499-504, 2007)



Les avantages de la chirurgie par voie endoscopique au Laser CO2 sont, la réduction de la durée d'hospitalisation, l'absence de cicatrice cervicale, l'absence de trachéotomie transitoire, l'absence d'alimentation par sonde, et l'obtention d'une meilleure qualité de vie et de la qualité vocale (Schindler *et al.*, 2004). Le traitement chirurgical classique de ces tumeurs était la laryngectomie partielle verticale par voie externe ou la radiothérapie.

Nos études ont suivi l'évolution des techniques chirurgicales et se sont intéressées aux modifications articulatoires et phonatoires par des analyses multiparamétriques, acoustiques, aérodynamiques, tests de perception et analyses morphologiques. Un des objectifs était de dresser une typologie acoustico-perceptive et un profil de récupération et de compensation de la voix et de la parole.

Un autre objectif qui est en cours de réalisation (projet de recherche STIC CE2L : ID RCB 2008-A00205-50), est de préciser la différence entre les voix de substitution et les voix après cordectomie par voie endoscopique au Laser CO2 en terme de qualité de voix et de qualité de vie.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Crevier-Buchman L, Colomb I, Hans S, Vaissière J, Brasnu D. (2007) Evolution de la voix et de la qualité de vie après cordectomie au laser CO2 par voie endoscopique. *Rev Laryngol Otol Rhinol*; 128: 315-20].

### **Communications en rapport avec ce thème :**

- L. Crevier-Buchman, S. Borel, S. Hans, M. Menard, J. Vaissiere. "Standard information from patients: the usefulness of self-evaluation measured with the French version of the VHI". *Interspeech 2009*, Sept 2009, Brighton, UK

- Hans S, Gorphe P, Luna Azoulay B, Crevier-Buchman L, Ménard M, Brasnu D. Exposition du plan glottique et cordectomies par voie endoscopique au Laser CO2. 118<sup>ème</sup> *Congrès Français d'Oto-Rhino-Laryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale*. Paris, Paris 16 octobre 2011

### *II-3.3.2. Les études prospectives longitudinales*

Dans un but de définition et de suivi des voix après cordectomies par voie endoscopique au laser CO2, nous avons mené plusieurs études acoustiques, perceptives et d'autoévaluation. D'une part nous avons comme objectif d'en confirmer l'intérêt chirurgical par rapport aux laryngectomies par voie externe, en particulier dans les formes étendues (cordectomies Type IV et V), et de les comparer aux voix de substitution. D'autre part, nous voulions établir un profil de récupération vocale par le suivi longitudinal de ces patients pour mieux guider la prise en charge.

Une première étude prospective, longitudinale sur 15 patients avait pour but d'évaluer l'évolution à court terme entre les temps préopératoire et postopératoires à 1 et 3 mois de l'intervention, selon les différents types de cordectomies, pour i) les différents paramètres acoustiques et perceptifs de la voix, et ii) la qualité de vie en rapport avec la voix, par le patient lui-même sur une échelle d'autoévaluation (Crevier-Buchman L, Colomb I, Hans S, Vaissière J, Brasnu D. (2007) Evolution de la voix et de la qualité de vie après cordectomie au laser CO2 par voie endoscopique. *Rev Laryngol Otol Rhinol*, 2007; 128: 315-20). Les échelles d'autoévaluation de qualité de

vie dans le domaine de la voix permettent de connaître comment le patient perçoit sa voix et comment il se situe par rapport à son problème vocal. Les mesures objectives et les tests de perception ne permettent pas de répondre à des interrogations simples mais fondamentales comme : le patient est-il satisfait de sa voix ? Peut-il communiquer avec aisance en famille, au travail ? Ces échelles permettent aussi de se rendre compte de la différence entre l'appréciation du clinicien et celle du patient. Elles permettent enfin d'évaluer l'efficacité linguistique, c'est-à-dire la qualité de communication telle qu'elle est ressentie par le patient. L'échelle VHI (Voice Handicap Index) développée par Jacobson *et al.* (1997), est actuellement la plus utilisée. Elle comprend 30 questions divisées en 3 domaines de dix questions chacun: domaine fonctionnel (impact du problème vocal sur les activités du quotidien), domaine physique (perception propre des caractéristiques physiques de la voix) et domaine émotionnel (impact psychologique). Pour chaque question, il y a 5 réponses possibles correspondant à un degré de sévérité de la plainte : 0 (absence plainte) à 4 (plainte permanente). Au terme de ce questionnaire un score global sur 120 est obtenu. Plus il est élevé plus le patient ressent une gêne dans son quotidien (Borel S, Crevier-Buchman L, Tessier C, Hans S, Laccourreye O, Brasnu D. (2004) *Quality of life before and after thyroplasty for vocal fold paralysis. Rev Laryngol Otol Rhinol*; 125:287-290). Outre les informations quantifiées du degré de handicap vocal global, l'intérêt du VHI dans le bilan initial et au cours de l'évolution permet de guider la rééducation car il apporte des précisions concernant la demande et les attentes du patient (Crevier-Buchman L, Colomb I, Hans S, Vaissière J, Brasnu D. (2007) *Evolution de la voix et de la qualité de vie après cordectomie au laser CO2 par voie endoscopique. Rev Laryngol Otol Rhinol* ; 128: 315-20).

Nos résultats ont permis de constater que la F0 des patients est plus élevée en postopératoires par rapport au temps préopératoire, sauf pour le groupe des cordectomies de Type V, car les voix postopératoires sont trop soufflées à 1 et 3 mois pour détecter la F0. Ainsi les paramètres d'instabilité (jitter et shimmer) n'ont pas pu être calculés pour les voix du groupe des cordectomies Type V. Pour les autres types de cordectomies, le jitter s'améliore lentement mais faiblement entre 1 et 3 mois postopératoires. Par contre le shimmer reste stable et supérieur à la normale. L'évaluation perceptive réalisée avec l'échelle GRBAS montre une amélioration progressive du Grade de dysphonie et de la Raucité pour les groupes des cordectomies de Type I, et II-III en post opératoire. Pour le groupe des Type V on observe une aggravation progressive entre le temps préopératoire et à 3 mois postopératoires. De même le Temps Maximum de Phonation s'améliore lentement en postopératoires mais reste inférieur à la normale à 3 mois postopératoires. Enfin, la qualité de vie (échelle VHI) suit la même tendance avec amélioration de la notion de handicap global à 3 mois postopératoires

pour les cordectomies de Type I à III. Par contre, le VHI s'aggrave pour les cordectomies type V à 3 mois postopératoires car la voix est quasi chuchotée.

Les résultats vocaux, dans leur ensemble, sont très liés au type d'intervention et à l'étendue de l'exérèse. Les délais d'enregistrement pour les cordectomies de Type V nécessitent des études à plus long terme pour pouvoir envisager une éventuelle amélioration de la voix. Pour les cordectomies de Type I à III, une amélioration est perceptible dès trois mois postopératoires.

Deux autres études que j'ai dirigées ont fait l'objet d'un mémoire de Master de Phonétique option phonétique clinique (Haitham Mirghani, 2009, Evolution de la voix après cordectomie de type I par voix endoscopique au laser); et d'un mémoire d'orthophonie (Frédérique Cleays, 2010 « Evaluation multiparamétrique de la voix après cordectomie endoscopique au laser CO2 ») portant respectivement sur 10 patients évalués pendant 1 an et sur 23 patients enregistrés en préopératoire et à 3 et 6 mois postopératoires et comparés à une population témoin. Le but était de préciser l'évolution de la récupération de la fonction vocale et de la physiologie du vibrateur laryngé selon le type de cordectomie pour établir des profils vocaux.

Nous avons étudié les corrélations possibles entre l'analyse acoustique et l'évaluation perceptive : à six mois postopératoires, des corrélations fortes et significatives apparaissent entre le Grade G et la déviation standard de F0 ( $p=0,001$ ), ainsi que entre Grade et Jitter ( $p=0,001$ ), entre Breathy et la F0 ( $p=0,02$ ) et entre Breathy et Jitter ( $p=0,001$ ). Ces résultats vont dans le même sens que ceux retrouvés dans la littérature [108].

Les corrélations entre GRBAS et VHI sont significatives pour G (grade) et le score total du VHI ( $p=0,02$ ), et entre B (souffle) et le score total du VHI ( $p=0,01$ ). Par conséquent, il existe une adéquation des résultats entre la gêne vocale éprouvée par le patient et le jugement perceptif clinique du thérapeute (Crevier-Buchman L, Borel S, Hans S, Menard M, Vaissiere J. (2009) "Standard information from patients: the usefulness of self-evaluation measured with the French version of the VHI". Interspeech 2009, Brighton, UK).

Par contre, la recherche de corrélation entre le VHI et le Type de cordectomie a permis de constater que la gêne vocale ressentie n'est pas proportionnelle à l'étendue anatomique de la cordectomie. Nos résultats rejoignent ceux de Roh (Roh *et al.*, 2007). Cette dissociation entre l'importance de l'atteinte physique et son vécu a été soulignée dans de nombreuses publications, aussi bien en pathologie ORL mais aussi dans d'autres pathologies (Woisard *et al.*, 2007).

Les différentes évaluations perceptives réalisées dans notre étude (GRBAS et échelle d'autoévaluation de qualité de voix), mettent également en évidence une altération de la voix les premiers mois post opératoires suivie d'une nette amélioration entre le troisième et le sixième mois postopératoires. A partir du sixième mois, la qualité de la voix pour les cordectomies de Type I à III se stabilise et devient comparable à celle de notre groupe témoin.

Les paramètres aérodynamiques (autres que le Temps Maximum de Phonation) qui se dégradent en postopératoires, quel que soit le type de cordectomie, devraient être étudiés dans de futurs travaux de recherche.

Nos études ont permis de confirmer des valeurs de F0 plus aiguës en postopératoires quel que soit le Type de cordectomie. Ces valeurs, tout en s'améliorant, ne se normalisent pas complètement. En effet, nos observations en vidéostroboscopie mettent en évidence une l'altération des possibilités vibratoires du côté du pli vocal opéré ; cette raideur est consécutive à la fibrose cicatricielle qui s'installe à l'emplacement du pli vocal enlevé et elle est responsable de l'élévation de la F0.

Plus l'exérèse chirurgicale est importante, plus les paramètres acoustiques sont dégradés. Les principales caractéristiques acoustiques sont des voix légèrement aiguës, avec une composante de souffle d'autant plus élevée que la cordectomie est de Type IV et V. Les paramètres de débit phonatoire ne sont pas modifiés mais le temps maximum de phonation est raccourci en rapport avec la relative incompétence glottique.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Crevier-Buchman L, Colomb I, Hans S, Vaissière J, Brasnu D. Evolution de la voix et de la qualité de vie après cordectomie au laser CO2 par voie endoscopique. *Rev Laryngol Otol Rhinol*, 2007; 128: 315-20
- Borel S, Crevier-Buchman L, Tessier C, Hans S, Laccourreye O, Brasnu D. Quality of life before and after thyroplasty for vocal fold paralysis. *Rev Laryngol Otol Rhinol*, 2004; 125:287-290
- Haitham Mirghani, 2009, Evolution de la voix après cordectomie de type I par voie endoscopique au laser. Université Paris III - Sorbonne Nouvelle. (dir. : L. Crevier-Buchman), Master de Phonétique M2

### **Communications en rapport avec ce thème**

- Crevier-Buchman L, Borel S, Hans S, Menard M, Vaissiere J. (2009) "Standard information from patients: the usefulness of self-evaluation measured with the French version of the VHI". *Interspeech* 2009, Sept 2009, Brighton, UK

## ***II-4. La phonétique articulatoire après chirurgies oro-pharyngées***

Les articulateurs de la parole sont principalement représentés par la langue, les lèvres, le voile du palais, le pharynx ainsi que la mandibule. Ils jouent un rôle primordial dans la production de la parole et sur son intelligibilité. La cavité buccale et l'oropharynx, en tant que cavités de résonance, jouent un triple rôle : un rôle de filtre acoustique en enrichissant le timbre du son laryngé, un rôle de propagation du son permettant ainsi la continuité de la parole et enfin, un rôle articulatoire. Les variations de forme des cavités du conduit vocal qui sont à l'origine des résonances acoustiques. Ces résonances correspondent aux fréquences des formants caractéristiques pour la reconnaissance des voyelles. Les articulateurs servent aussi à créer des rétrécissements ou des occlusions du conduit vocal pour générer des bruits pour la réalisation des consonnes.

En cas de pathologie responsable d'une modification de forme, de volume, ou de motricité de ces articulateurs, le patient cherchera à compenser ces déficits en élaborant des stratégies alternatives. Ces stratégies peuvent relever d'un mécanisme visant à trouver une autre forme du conduit vocal qui sera « équivalent » du point de vue acoustique à celle qu'il utilisait avant la pathologie. Il peut aussi bénéficier de la mise en place d'une prothèse maxillaire permettant de recréer les points d'articulations et de compenser certains déficits en particulier vélaire.

### **II-4.1. Conséquences des chirurgies de la cavité orale sur la communication**

Les cancers de la cavité orale ont bénéficié de l'amélioration des techniques chirurgicales (Allal *et al.*, 2003) et des procédés de reconstruction qui contribuent à diminuer considérablement les séquelles fonctionnelles comme pour la déglutition, la parole et l'esthétique (Babin *et al.*, 2005). La chirurgie oro-buccale et maxillo-faciale va provoquer un délabrement et souvent une perte de substance qu'il faudra combler pour restituer les volumes. Ce comblement peut être réalisé par un lambeau musculaire ou muqueux qui sera greffé sur le lieu de l'exérèse, ou par une prothèse construite sur mesure. Ainsi, en postopératoire, le patient va devoir réapprendre à articuler avec des structures anatomo-physiologiques modifiées, des sensations kinesthésiques désorganisées, une perte des repères dans son espace oral. Il va devoir élaborer des stratégies de compensation. Ces différents aspects ont été abordés au cours d'études que j'ai dirigées sur les conséquences phonatoires, articulatoires et du handicap de parole après chirurgie oropharyngée et de la langue.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Breil, H Crepin, M Smadja, L Crevier-Buchman. (2006) « Qualité de vie après bucco-pharyngectomie transmandibulaire ». *Rev Laryngol Otol Rhinol.*; 127:305-14 ;
- De Groote G, Simon J, Borel S, Crevier-Buchman L. (2012) “The French version of Speech Handicap Index: validation and comparison with the Voice Handicap Index, *Folia Phoniatr Logop*; 64:20-25.
- Crevier-Buchman L, Smadja M, Tessier C, Menard M, Brasnu D. (2007) « Evaluation de la qualité de vie après glossectomie partielle ». *Revue Française d'ORL*; 92 :288-301.

### **Communications en rapport avec ce thème**

- Crevier-Buchman L. Subjective and objective evaluation of quality of life after partial glossectomy: speech intelligibility *Pan European Voice Conference (PEVOC)*, 31 Aug - 3 Sept 2005, London, UK ;
- Acher A, Fougeron C, Crevier-Buchman L, Mirghani H, Vaissiere J. Etude perceptive et articulatoire de la parole à partir de données échographiques en 2D : étude de la parole de deux patients hémiglossectomisés. Actes des 3èmes Journées de Phonétique Clinique (JPC3), 2009, Aix en Provence

## **II-4.2. Facteurs de perturbation articulatoire des prothèses palatines**

La relation entre phonétique et prothèse est depuis longtemps une réalité pour les cliniciens, et notamment en prothèse amovible complète. En effet, toute modification du volume de l'espace oral créée par l'introduction d'une prothèse amovible ou, dans certains cas, d'une prothèse fixée, va avoir une influence sur l'articulation du locuteur et provoquer parfois des dysfonctions phonétiques avec adjonction de bruits parasites comme des sifflements, des chuintements ou un zézaiement. La nature des matériaux prothétiques entrave le volume libre de la cavité orale, ce qui va avoir une influence sur les organes intervenant dans l'articulation de la parole comme les joues, la langue, les lèvres, et le voile du palais entre autres. Cette prothèse est un corps étranger qui demande un certain temps d'acceptation par notre organisme, puis une adaptation pour une utilisation efficace dans l'acte de parole.

Une des questions centrales en lien avec l'adaptabilité de l'être humain, dans le domaine de la parole, est de savoir si les mécanismes de contrôle moteur de la parole et de sa coordination peuvent être, entre autres, sous la dépendance d'un rétrocontrôle sensoriel (McFarland *et al.*, 1995 ; McFarland *et al.*, 1996 ; Baum *et al.*, 1997).

Des études comme celle de Savariaux (Savariaux *et al.*, 1995) ont montré que les compensations dépendent entre autres de la nature de la perturbation, des caractéristiques de certaines réalisations articulatoires, et des stratégies de compensation propres à un individu. D'autres études comme celles de Hamlet et Stone (Hamlet *et al.*, 1978 ; Hamlet *et al.*, 1979) ont montré que la présence endo-buccale d'un palais artificiel provoquait un allongement de la durée des fricatives et des erreurs articulatoires qui augmentent avec l'épaisseur de la plaque palatine. Ces erreurs seraient dues à une imprécision de la position de la langue contre le palais, avec cependant une amélioration progressive, de délais variables selon les locuteurs.

Par ailleurs, McFarland *et al.* (1996) avaient montré qu'une augmentation du rebord alvéolaire d'une plaque palatine était particulièrement responsable d'altérations portant principalement sur le [s]. De ces observations est née l'hypothèse d'une réorganisation des schémas articulatoires pour s'adapter aux changements des structures endo-buccales.

Dans le cadre d'une thèse en chirurgie dentaire que j'ai co-dirigée (Pierre-Marie Voisin (08.07.11) « Contribution à l'étude de l'intégration des prothèses amovibles par une étude phonatoire », Thèse de Doctorat en Chirurgie Dentaire, Université Paris Diderot, Paris 7), nous avons mené une étude acoustique et perceptive dans le but de mesurer la tolérance à un corps étranger intra-buccal sous forme de prothèse amovible, et de mesurer les délais nécessaires pour obtenir une compensation articulatoire. Cette situation peut se rapprocher de celle imposée à tout sujet qui devra porter un appareil dentaire soit pour des soins en orthodontie, soit pour remplacer des dents, soit dans un contexte thérapeutique.

En effet, l'introduction d'une prothèse amovible, partielle ou complète, et dans certains cas, d'une prothèse fixée, entraîne des modifications de volume et de forme de la cavité buccale. Ces modifications, aussi légères soient-elles, sont vécues par le patient comme une contrainte qui s'exerce sur toutes les structures de la cavité buccale et en particulier sur les organes de la phonation. Ces contraintes entraînent des modifications de la phonation qui vont diminuer au fur et à mesure de l'intégration prothétique.

Notre étude a consisté à enregistrer quatre sujets sains et dentés selon un protocole très précis, puis à leur poser une plaque palatine en résine de 2 mm d'épaisseur fixée par des crochets-boules, et à les réenregistrer au moment de la pose puis 30 minutes après. Une fois ces 3 enregistrements réalisés, une contrainte supplémentaire est appliquée sous la forme d'un apport de résine de 8 mm dans la partie antérieure de la plaque palatine ; les sujets sont alors réenregistrés au moment de l'application de la contrainte supplémentaire puis 30 minutes après. Le sujet est son propre témoin. Entre chaque enregistrement, les sujets devaient parler librement, en conversation, pour favoriser l'accoutumance au corps étranger. On a enregistré également le ressenti subjectif des sujets par rapport à la gêne provoquée par la pose des plaques et l'application de la contrainte.

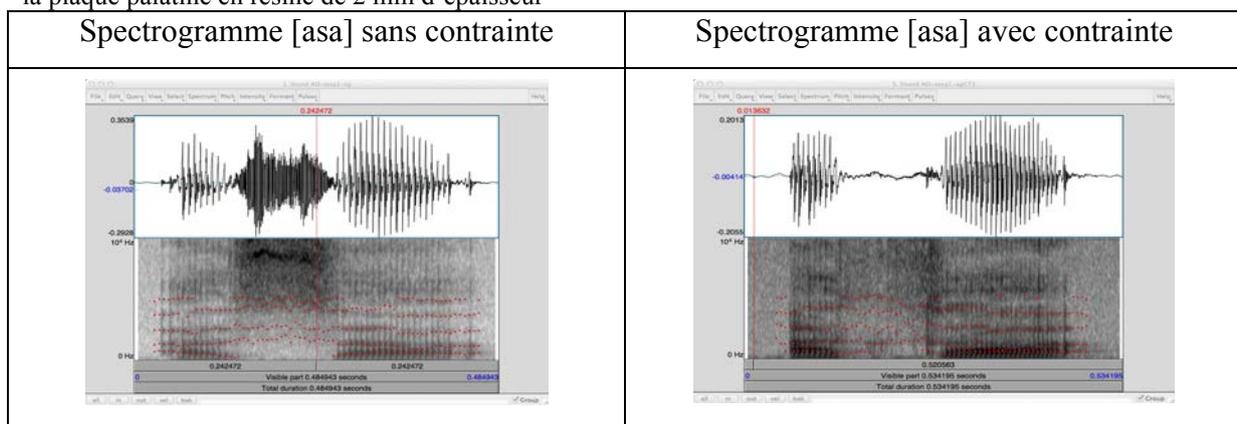
L'étude s'est concentrée sur la prononciation des consonnes, et dans l'analyse des enregistrements, nous avons privilégié les consonnes qui sont les plus modifiées par l'application de cette contrainte, à savoir [k], [g], [s] et [ʃ]. Nous avons réalisé deux analyses distinctes de ces enregistrements. L'une subjective par un jury d'écoute, l'autre objective par analyse acoustique de ces consonnes. On recherche, par ces analyses, à déterminer quelles sont les modifications phonatoires provoquées par la pose de ces plaques et l'application

d'une contrainte buccale supplémentaire, les délais d'installation de la gêne et de son amélioration.

Les résultats suivants ont été trouvés :

- les sujets expriment leur ressenti par rapport à la présence en bouche de la prothèse amovible responsable d'une modification de volume de la cavité buccale ; ils la décrivent comme une gêne réelle avec perturbation dans le placement de la langue pour les mouvements de déglutition et d'articulation. Cette perturbation nécessite un « effort » supplémentaire lors de la réalisation des mouvements articulaires. De plus, la stimulation des récepteurs sensitifs, sensoriels et somesthésiques de la cavité buccale par les plaques (considérées comme un corps étranger), va aussi stimuler la production salivaire, responsable d'une gêne supplémentaire.
- les tests de perception sur l'identification des consonnes montrent une altération maximale pour la consonne [s] (29%) avec la contrainte supplémentaire. Les occlusives sont mieux reconnues que les fricatives. Il y aurait une amélioration de la perception après 30 minutes mais cependant sans retour à la normale. En accord avec McFarland (1996)], le [s] est la consonne la plus altérée car cette catégorie de consonne demande une plus grande précision articulaire que les autres. Les perturbations spectrales vont dans le sens d'une diminution globale de la fréquence du bruit de friction.

Exemple de spectrogramme pour la consonne [s] pour un sujet avant et immédiatement après mise en bouche de la plaque palatine en résine de 2 mm d'épaisseur



- les paramètres acoustiques sont variables d'un sujet à l'autre, probablement en rapport avec la forme initiale du palais (variations anatomiques). D'une façon générale, notre étude a permis de montrer une diminution du centre de gravité du spectre des consonnes fricatives (diminution de l'énergie acoustique spectrale en rapport avec une modification du lieu d'articulation). Nos résultats sont concordants avec ceux de Baum et McFarland (1997) pour qui cette dimension acoustique semble être un bon indicateur pour mesurer l'altération des fricatives. De plus, nous avons mis en évidence une diminution de l'intensité du bruit des consonnes en présence de la plaque, avec une normalisation en fin d'enregistrement après 30mn. Par ailleurs, on a noté une élévation de la fréquence fondamentale de la voyelle [a], une augmentation de la fréquence du premier formant et une baisse du deuxième formant de la voyelle [a]. La variation de ces fréquences formantiques est probablement liée aux variations de la morphologie des résonateurs, et en particulier de la cavité buccale. Ces modifications s'estompent après 30 mn avec un quasi retour à la normale, mesurée avant toute pose de plaque.

Enfin, aucune perturbation majeure ne semble pouvoir être imputée à la mise en place de la contrainte supplémentaire. Nos résultats vont dans le sens des constatations de McFarland (1996)] pour qui les occlusives ont plus de perturbations sur l'enregistrement immédiat avec la plaque fine qu'avec la plaque épaisse. L'explication avancée par les auteurs serait en rapport avec la notion d'une plus grande difficulté, pour un locuteur, à s'adapter à un changement aussi minime soit-il, alors qu'à l'inverse, le port d'une plaque épaisse obligerait le sujet à des changements radicaux dans ses stratégies articulatoires. Par contre, pour ces auteurs, 15mn ne semble pas suffisant comme délai d'adaptation. Nous observons une nette amélioration des paramètres après un temps d'adaptation de 30mn. Une étude en électropalatographie serait un complément intéressant pour observer les comportements de la langue en fonction des volumes des contraintes palatales.

Notre étude retrouve la notion de variabilité inter-individuelle même si un schéma général peut être dégagé. Quelle que soit l'importance de ces perturbations, une adaptation est le plus souvent possible, mais parfois incomplète après 30mn. Une hypothèse intéressante évoquée par Baum et McFarland (1997) concerne l'amélioration progressive en rapport avec deux explications qui peuvent se combiner : la proprioception qui cherche toujours à obtenir la meilleure position articulatoire et un système de rétrocontrôle médié par l'audition, où le cerveau adapterait la position articulatoire en fonction des sons produits et entendus par le sujet.

La réalisation articuloire s'améliore au cours du temps, ce qui permet de pouvoir rassurer nos patients qui peuvent ressentir une certaine angoisse lorsqu'ils perçoivent que leur phonation est perturbée. La récupération est d'autant plus rapide que le sujet, dont la phonation est perturbée, suit un entraînement phonatoire, c'est-à-dire qu'il s'exerce à prononcer à haute voix les phonèmes les plus problématiques.

Cette étude, très riche en enseignement pour la qualité de parole en chirurgie dentaire et odontologie, sera poursuivie en explorant les différentes situations articuloires des phonèmes du français. Des études électropalatographiques compléteront l'exploration des gestes articuloires d'adaptation aux contraintes palatines. La variabilité inter-individuelle sera explorée, en particulier en relation avec la forme anatomique du palais, ce qui permettrait de prévoir des difficultés attendues.

Pour guider la réadaptation, on pourrait envisager la création d'un texte en français contenant un grand nombre de phonèmes les plus perturbés par la mise ne place de la prothèse. Ce texte serait un outil d'aide à l'adaptation prothétique ; le locuteur aurait pour consigne de le lire à haute voix, plusieurs fois par jour pour accélérer le rétrocontrôle perceptif et sensoriel articuloire.

### **Publications en rapport avec ce thème**

- Pierre-Marie Voisin (08.07.11) Contribution a l'étude de l'intégration des prothèses amovibles par une étude phonatoire, Thèse de Doctorat en Chirurgie Dentaire, Université Paris Diderot, Paris 7 (co-direction)
- Abdelhafid Seddar (25.10.05), Actualité sur la voix et les maxillectomies, Thèse de Doctorat en Chirurgie Dentaire ; Université Paris VII, (co-direction)

### **Communications en rapport avec ce thème**

- D. Maurice, L. Crevier-Buchman, O. Laccourreye, M.C. Augier, B. Courrier, M. Vignon, D. Brasnu. « Evaluation fonctionnelle phonatoire par analyse vocale des restaurations prothétiques immédiates chez les malades ayant subi une maxillectomie ». *11<sup>ème</sup> Colloque de l'Association Internationale Francophone de Recherche Odontologique*, Mai 1996, Reims
- L. Crevier-Buchman, D Maurice, D Brasnu. « La voix chez les malades ayant subi une maxillectomie ; Réhabilitation fonctionnelle par la prothèse maxillo-faciale ». *Congrès de l'Association Dentaire Française*, Nov 1997, Paris

### III PROJETS DE RECHERCHE

L'étude de la parole est interdisciplinaire. Elle fait appel à des techniques empruntées à un grand nombre de domaines scientifiques, de la physique à la physiologie en passant par l'acoustique. L'avancée des connaissances théoriques sur la parole et sur les instrumentations sert la recherche en phonétique clinique. La dynamique interactive qui existe entre clinique et recherche, entre l'enseignement, l'encadrement des étudiants et la pratique, sont un environnement tout à fait propice à la poursuite des mes travaux de recherche par une stimulation de la réflexion.

Notre fil conducteur est l'analyse des modifications vocales et des réalisations articulatoires en rapport avec les différentes pathologies des organes vélo-pharyngo-laryngés et de leur commande motrice. Nous voulons évaluer l'importance de ces modifications par rapport aux voix dites normales, et mesurer leur évolution dans le temps, selon les pathologies et les traitements. De plus, nous souhaitons élargir nos connaissances et notre compréhension des voix normales en situation de production extrême. Pour cela, nous avons recours aux explorations perceptives, acoustiques et physiologiques grâce à la plateforme multi-instrumentale du LPP et de l'HEGP. Le but scientifique commun à mes recherches est de mieux comprendre les processus de production de la parole, en particulier les mécanismes de sa variabilité normale et pathologique et les possibilités de compensation. Le but clinique est d'avoir un impact sur la prise en charge des patients au quotidien.

En partant des connaissances classiques de phonétique théorique, j'ai élaboré mes recherches en me référant i) au fonctionnement de l'articulateur laryngé et ii) aux caractéristiques acoustiques du signal de la parole. Notre recherche porte sur la réalisation concrète des traits distinctifs et sur la batterie d'indices permettant de définir ce signal articulé qui est produit, dans des conditions normales, par un vibreur situé au niveau de la glotte et modulé lors du passage par les résonateurs tout le long du conduit vocal. A partir de ces connaissances, j'ai cherché à appliquer ces notions à la clinique en me basant sur l'observation, comme celle que j'ai faite sur les modifications après chirurgie partielle. J'ai ainsi bénéficié de l'interdisciplinarité de ma formation pour contribuer au développement de la phonétique descriptive expérimentale et aérodynamique. Par exemple, j'ai cherché à comprendre les mécanismes de compensation qui se produisent en utilisant les structures restantes après chirurgie laryngée ; cela m'a permis de décrire une utilisation indépendante des structures aryépiglottiques 1) comme néovibreur à la place des plis vocaux avec une

fonction phonétique de voisement, 2) comme articulateur consonantique dans certaines langues avec des fonctions phonétiques et phonologiques, 3) comme articulateur vocalique, enrichissant le timbre vocalique dans certaines situations phonatoires et artistiques.

Ces recherches m'ont conduite à formuler des hypothèses pour la parole normale. Ainsi, les observations cliniques devraient nous guider pour définir ce qu'il faut préserver pour maintenir une communication orale efficace. Si ces hypothèses sont exactes, nous devrions être en mesure de déterminer des tests plus légers mais robustes pour les bilans de la voix et de la parole pathologique, de trouver des arguments prédictifs pour les conséquences postopératoires ou pour l'évolution des pathologies neurologiques, et d'établir des principes de réhabilitation en adaptant la rééducation.

Les perspectives de mes recherches se situent dans quatre domaines principaux qui sont liés entre eux : i) poursuivre l'exploration des mécanismes laryngés et leurs corrélats acoustiques qui sous-tendent le *voisement* en voix modale et chuchotée et les particularités de ces mécanismes en pathologie, ii) développer les explorations multi-instrumentales dont l'imagerie à grande vitesse pour mieux comprendre la réalité des gestes laryngés normaux et pathologiques, iii) définir les caractéristiques articulatoires de la parole silencieuse, et iv) analyser les compensations acoustiques et aérodynamiques mises en place pour maintenir une dimension prosodique à la parole pathologique.

Mon premier projet s'intéresse au larynx comme étant le principal articulateur permettant la réalisation du voisement. Les ajustements laryngés impliqués dans les différents comportements phonatoires se situent au niveau du plan glottique avec l'adduction - abduction des plis vocaux, les caractéristiques biomécaniques des plis vocaux (raideur, tension, épaisseur...), la constriction supraglottique au niveau des bandes ventriculaires, et les mouvements verticaux du larynx dans le cou. Les facteurs aérodynamiques vont permettre de moduler la vibration des plis vocaux selon le degré et la qualité de leur fermeture pour produire différents types phonatoires allant de la voix silencieuse à la voix modale en passant par la voix chuchotée et soufflée d'une part, et la voix rauque et serrée (*creaky* et *harsh voice*) d'autre part.

La voix chuchotée est un terrain de recherche qui a suscité de nombreuses interrogations quant à ses mécanismes physiologiques de productions mais aussi ses aspects phonétiques et phonologiques. La principale distinction entre la voix modale et la voix chuchotée est l'absence de vibration des plis vocaux et par conséquent une absence de fréquence fondamentale (F0) et d'harmoniques. Selon Catford (1964) et Laver (Laver, 1994),

une différence existe entre la voix soufflée qui est produite avec une glotte ouverte et peu de bruit de turbulence, et la voix chuchotée où la glotte est resserrée mais sans accolement des plis vocaux et favorisant ainsi la production d'un bruit de turbulence qui peut être modulé par les cavités supraglottiques. La représentation spectrale de la voix chuchotée montre la présence de bruit de friction avec des renforcements et des atténuations correspondant aux formants, permettant ainsi la reconnaissance des voyelles. Cependant, pour Laver (1994), la distinction entre voix soufflée et chuchotée correspond à une différence de degré de constriction glottique mais non a un mode phonatoire différent. Les deux principaux paramètres qui permettent de signaler le contraste sont la F0 et l'amplitude, contrôlés au niveau du larynx. Le troisième paramètre est la durée des ajustements articulatoires supra laryngés. Une autre différence entre voix modale et chuchotée est soulignée par Stevens (1998) qui décrit une répartition d'énergie spectrale prédominante dans les basses fréquences en voix modale et répartie plus uniformément et vers les hautes fréquences en voix chuchotée.

Une meilleure compréhension des mécanismes de production de la voix chuchotée va motiver la suite de mes recherches. Les questions que nous allons poser pour éclairer les particularités de la voix chuchotée sont d'une part la détermination des indices acoustiques qui peuvent encore être perçus et qui permettraient la distinction phonologique de voisement, et d'autre part, quels sont les mécanismes physiologiques qui sous-tendent ces productions. Concernant la distinction entre les consonnes sourdes et sonores, le voisement disparaît en voix chuchotée et est probablement remplacé par d'autres indices pour maintenir la distinction sourde - sonore. Pour les occlusives de l'anglais produites en voix modale, Lisker (1986)] décrit un ensemble d'indices acoustiques qui pourraient participer au contraste de voisement, selon la position avant, pendant ou après l'occlusion.

Nous allons tester les indices de voisement en voix modale pour nous permettre de formuler l'hypothèse de leur application à la voix chuchotée. Ces indices sont, entre autre, 1) la durée de l'occlusion, qui, en voix modale, est plus longue pour l'occlusive sourde que sonore, 2) la durée allongée de la voyelle précédant une consonne occlusive sonore, 3) la durée de la transition du formant F1 ainsi que sa valeur à la fin de la voyelle précédant la consonne. Mais en voix chuchotée, la mesure du F1 peut être entravée par la largeur de bande du formant qui risque d'être augmentée en raison du bruit de turbulence (Stevens, 1998). De nombreuses études acoustiques et perceptives ont été menées en anglais et pour la langue anglaise mais peu de publications existent pour le français. La comparaison et l'adaptation de l'anglais au français ne sont pas toujours possibles ne serait-ce que pour les consonnes occlusives voisées qui sont en général dévoisées en initiale de mot en anglais. Outre

l'acoustique et la physiologie, mes perspectives sont d'approfondir les connaissances sur la notion de processus aérodynamique qui sous-tend la production de voix chuchotée.

La voix chuchotée comme mode de communication présente un attrait particulier par ses multiples applications et utilisations qui touchent entre autres le domaine médical ; par exemple, une question récurrente et qui n'a pas encore trouvé de consensus au sein de la communauté des laryngologistes, est la place de son utilisation en postopératoire après phonochirurgie pour « mettre au repos les plis vocaux » et favoriser la cicatrisation de la muqueuse cordale. Par ailleurs, une meilleure connaissance des caractéristiques de la voix chuchotée peut améliorer l'évaluation de la voix des patients ayant une paralysie récurrentielle (immobilité d'un pli vocal, d'origine neurologique par atteinte du nerf récurrent), véritable modèle de voix voilée, soufflée ou chuchotée selon la position du pli vocal paralysé ; cette problématique a une dimension thérapeutique pour répondre aux questions des modalités de compensations possibles pour optimiser ces types de voix (voilée, soufflée, chuchotée) comme outil de communication. La voix chuchotée reste encore peu étudiée. Il s'agit donc du premier axe de recherche émergent que je vais développer.

Mon second projet plus interdisciplinaire concerne le développement et l'exploitation des ressources de la plateforme d'exploration physiologique PEP2 du laboratoire LPP (Vaissière *et al.*, 2010). Cette plateforme est multi-instrumentale, aérodynamique et physiologique, avec des instruments comme le photoglottographe externe (ePGG, pour mesurer le degré d'ouverture glottique), l'électroglottographie (EGG, pour mesurer le degré de fermeture des plis vocaux), l'échographie de la langue et peut-être du larynx, la palatographie et les différents instruments pour l'imagerie et la visualisation du conduit vocal. Les données peuvent être synchronisées et alignées. Parmi ces instruments, l'imagerie à grande vitesse va nous servir à explorer de façon très précise et en temps réel les comportements laryngés entre autre au service de mon premier projet.

Nous envisageons de développer les explorations laryngées glottiques et supraglottiques pour l'identification des gestes laryngés nécessaires pour compenser le contraste sourd-sonore et le voisement en voix chuchotée. Connaissant l'existence d'une variabilité de configuration des comportements articulatoires laryngés en voix modale, nous suspectons autant de variabilité en contexte de voix chuchotée. La glotte peut être plus ou moins ouverte, les plis vocaux peuvent être plus ou moins allongés, et le flux transglottique peut être variable. Nous cherchons à évaluer l'importance de ces variations en voix chuchotée pour la réalisation phonétique du voisement.

L'endoscopie avec fibroscopie laryngée est utilisée en phonétique depuis 1968 grâce aux travaux de Sawashima & Hirose aux laboratoires Haskins (Sawashima *et al.*, 1968). Cependant l'imagerie à 25 images/seconde ne permet pas de visualiser tous les cycles glottiques et encore moins des événements transitoires très brefs comme la mise en position phonatoire, l'installation du voisement ou la fin du voisement, les dyspériodicités ou les phénomènes de co-articulation (Crevier-Buchman L, Vincent C. (2009) Visualisation du larynx : endoscopie rigide et fibroscopie, stroboscopie et caméra haute vitesse ». In "*Imagerie médicale pour l'étude de la parole*" Marchal 2009, eds Hermès; chap. 2, p 43-61). La nasofibroscopie a l'avantage de permettre une phonation la plus physiologique possible sans entraver les mouvements articulaires oropharyngés et laryngés. Cependant il est constitué d'un nombre limité de fibres transportant la lumière générée par une source externe. La qualité des images est en général satisfaisante à 25 ou 30 images/ secondes mais devient tout à fait insuffisante si on augmente la vitesse au delà de 500 images/seconde. La cinématographie ultra-rapide permet de filmer, en temps réel, avec une cadence d'image élevée (entre 500 et 4000 images/sec), la réalité des mouvements ou des oscillations des PV. Elle s'est développée à partir de 1975 (Honda *et al.*, 1985). Une des grandes contraintes de cette instrumentation est liée au fait que plus la vitesse augmente plus le temps d'acquisition est réduit (de l'ordre de quelques secondes) ce qui n'est pas compatible avec l'enregistrement de corpus de parole. Une étude préliminaire que j'ai encadrée dans le cadre d'un mémoire de master (Jérôme Nevoux, J. (28-09-2007). *La caméra ultra-rapide : apports et limites en laryngologie*. Paris, France, Université Paris 3 - Sorbonne Nouvelle, Master de Phonétique M2) avait permis de poser les bases et les limites de l'utilisation de cette instrumentation. Enfin, le traitement de l'image reste encore du domaine expérimental et les analyses sont essentiellement qualitatives. Pour faire progresser les systèmes d'analyse vers une quantification des données, nous devons établir des collaborations avec des ingénieurs spécialisés en traitement des signaux et des images. Ces collaborations seront rendues possibles grâce au Labex EFL (*Empirical Foundations of Linguistics*), porté par le Pr Jacqueline Vaissière. Les recherches actuelles s'orientent vers une automatisation des mesures des mouvements laryngés pour analyser de façon quantitative et reproductible, leur vitesse, leur amplitude, leur direction et la symétrie ainsi que des mesures d'aire glottique et supraglottique.

Une étude préliminaire que j'avais réalisée devrait servir de cadre ou de recommandations pour les études à venir. Un sujet féminin a prononcé les syllabes /ifi/ et /ivi/ dans les deux modalités modale et chuchotée. La caméra utilisée est celle commercialisée par Wolf qui ne s'utilise qu'avec un endoscope rigide constitué d'un tube creux avec un système

de miroir à l'extrémité endobuccale. Ce tube permet d'obtenir une image de bonne qualité et suffisamment lumineuse pour être exploitée et analysée. Il est introduit dans la cavité buccale et son extrémité distale, contenant l'optique, est placée au dessus de la base de langue, sous le voile du palais. Lors de l'examen, il est demandé au sujet de produire une émission vocalique prolongée : /e/ ou /i/. Ce matériel ne permet que l'articulation des voyelles antérieures [e] ou [i] et des consonnes labiales et alvéolaires. En effet, les sons postérieurs nécessitent un recul de la langue qui vient masquer le plan glottique et les PV. La vitesse d'acquisition est de 4000 images/sec avec une durée d'enregistrement de 2 secondes. Un enregistrement audio et EGG synchronisé étaient associés à l'image vidéo et nous avons réalisé des mesures d'aire glottique grâce à un logiciel de vidéokymographie. Les résultats de cette étude préliminaire ont permis de constater qu'il n'y avait pas de comportement d'effort (contraction des bandes ventriculaires) associé à la voix chuchotée contrairement aux descriptions faites par Esling (2005). Les indices de durée et d'énergie semblent conservés en voix chuchotée et l'aire glottique est plus importante i) en voix modale pour la fricative sourde /f/ par rapport à la fricative voisée /v/ (/f/ > /v/), ainsi que ii) en voix chuchotée pour la fricative sourde /f/ par rapport à la fricative voisée /v/ (/f/ > /v/) et iii) pour la fricative sourde /f/ en voix chuchotée par rapport à la voix modale (/f/chuchoté > /f/modal). Notre première étude préliminaire a été présentée au symposium annuel de la Voice Foundation à Philadelphia en 2009 (Crevier-Buchman L, Vaissiere J, Vincent C, Henrich N, Hans S, Brasnu D. (2009) Laryngeal Behaviour in Whispered Speech: a Study using High Speed Imaging Care of the Professional Voice, 38th Annual Symposium 2009, Philadelphia 07.06.2009). Les résultats de cette étude préliminaire sont encourageants et nous allons poursuivre nos recherches en augmentant le nombre de sujets et en y associant des études acoustiques, perceptives et aérodynamiques.

Mon troisième projet concerne la voix silencieuse qui est produite sans turbulence et devient inaudible et donc inintelligible. Catford (1964) décrit un mode de phonation qu'il appelle « voicelessness » ou « nil phonation » qui est réalisé soit en bloquant l'air expiratoire avec des plis vocaux complètement fermés (équivalent à un serrage laryngé complet), soit avec une grande ouverture des plis vocaux et un flux d'air laminaire (sans turbulence). Dans les deux cas, aucun son n'est généré et aucun signal acoustique ne traverse le conduit vocal. Cependant, pour Catford, la « nil phonation » est utilisée pour la réalisation des fricatives sourdes alors que la voix soufflée est utilisée pour produire le [h]. Cela nous semble un peu contradictoire, car les fricatives produisent un bruit de friction qui ne permet pas de les classer dans la « nil phonation ». De plus, selon Laver (1994), la « nil phonation » correspond à une

production sans turbulence et « whisper phonation » une production avec beaucoup de turbulence. Il ressort de l'analyse de la littérature que le concept de « voix silencieuse » ne fait pas encore l'unanimité, raison pour laquelle mes recherches auront pour objectif de la définir aussi bien d'un point de vu acoustique que physiologique articuloire et aérodynamique.

La situation « sans voix » du patient laryngectomisé total a été le point de départ de ma réflexion sur la « voix silencieuse ». Notre recherche initiée dans le cadre du projet REVOIX va se poursuivre grâce aux enregistrements avec le système « *Ultraspeech* » (échographie de la langue et vidéo des mouvements des lèvres) pour explorer les mécanismes articuloires labial et lingual impliqués en voix silencieuse. Au préalable, cette modalité phonatoire sera explorée au niveau physiologique et acoustique, chez le sujet normal pour i) décrire et analyser les gestes articuloires, au niveau segmental vocalique et consonantique, qu'ils mettent en jeu tout le long du conduit vocal et de la source glottique, ii) comparer la voix silencieuse à la voix sonore pour en mesurer les écarts et iii) la comparer à une autre situation normale mais sans voisement comme la voix chuchotée. Nous souhaitons préciser, en parole silencieuse, les modifications d'amplitude et de vitesse des gestes articuloires, selon les situations de coarticulation, et les comparer à la parole sonore et chuchotée. Nous allons compléter les explorations par un examen de la dynamique laryngée pour confirmer la participation ou non du plan glottique. Enfin, des mesures aérodynamiques permettront de vérifier l'absence de flux d'air. Un des objectifs serait de favoriser les gestes articuloires les plus efficaces pour aider le patient laryngectomisé dans l'utilisation d'une « prothèse vocale » ou d'un synthétiseur produisant de la parole à partir de signaux non acoustiques comme ceux de la langue et des lèvres. De plus, ces recherches devraient orienter la conception ou l'adaptation d'outils d'aide à la communication, selon les besoins, en proposant d'établir un cahier des charges.

Dans un domaine complémentaire de *l'analyse multi-instrumentale* de la parole, mon quatrième projet doit me permettre de poursuivre mes recherches sur les compensations acoustiques et aérodynamiques mises en place pour maintenir une dimension prosodique à la parole pathologique. Malgré la mutilation due à la chirurgie laryngée, les patients conservent une fonction linguistique liée aux possibilités de reproduire un schéma prosodique ; cependant, ce schéma ne fait plus référence aux classiques variations de F0 pour exprimer la mélodie, puisque le vibreur présente des caractéristiques de masse et de mouvements différents. Le couplage de différents instruments est une des meilleures techniques d'exploration pour la compréhension du fonctionnement physiologique et physiopathologique

après chirurgie partielle pharyngo-laryngée car elle se rapproche de la *réalité multidimensionnelle de la voix*.

Forte de notre expérience méthodologique mise en place au cours des diverses études réalisées, nous allons développer les enregistrements et les prises de données multi instrumentales à la recherche d'indices prosodiques de « substitution ». Nous avons comme objectif d'explorer les différents paramètres qui peuvent servir à compenser l'absence ou la limitation de variation de la F0. Nous allons pour cela mesurer les paramètres i) de durée au niveau segmental (le patient modifie-t-il la durée des voyelles et/ou des consonnes), la durée des pauses ainsi que la place des pauses dans la phrase, ii) de variations d'intensité iii) de variations aérodynamiques en particulier les débits d'air oral et les pressions intra-orales. Les résultats attendus de ces études sur la prosodie ont un intérêt double : en clinique, ces études détaillées devraient éclairer les relations de compensation pour la conservation du trait distinctif de voisement et les variations prosodiques, et en recherche fondamentale, elles sont tout aussi indispensables pour améliorer nos connaissances sur la physiologie laryngée dans le contrôle des indices prosodiques proposés et construire des modèles.

En résumé, mes recherches vont se poursuivre dans le domaine de la phonétique expérimentale et clinique pour développer la connaissance des mécanismes laryngés qui soutiennent le voisement et son corrélat acoustique, des variabilités normales et pathologiques et des compensations articulatoires qui sont mises en place. Ces études seront multiparamétriques, en exploitant et développant i) la plateforme multi-instrumentale pour tendre vers une vision globale de la dynamique de la production de la voix et de la parole, ii) une quantification et une normalisation des données pour aller vers la modélisation de la parole pathologique.

Mes travaux futurs dans le domaine interdisciplinaire de la phonétique clinique visent à créer des bases de données multimodales avec l'ensemble des données prises dans le cadre des projets présentés ci-dessus. Toutes ces situations vocales extrêmes ou pathologiques sont pour nous des modèles de comportement laryngé et du conduit vocal. Notre objectif scientifique est de compléter les descriptions impressionnistes habituelles par des mesures objectives reproductibles, de façon rigoureuse et systématique, les comportements aérodynamiques et physiologiques qui se rattachent aux différents modes de phonation. Ma position interdisciplinaire devrait me permettre de tendre vers une modélisation au service de la phonétique et de la phonologie de laboratoire.

## IV BIBLIOGRAPHIE

1. Allal, A., Nicoucar, K., Mach, N., Dulguerov, P. 2003. Quality of life in patients with oropharynx carcinomas: assessment after accelerated radiotherapy with or without chemotherapy versus radical surgery and postoperative radiotherapy. *Head Neck*, 25(10): 833-9; discussion 9-40. Epub 2003/09/11.
2. Arnoux-Sindt, B. 1992. Crico-arytenoid articulation and reconstructive laryngectomy. *Revue de Laryngol Otol Rhinol (Bord)*, 113(4): 339-42. Articulation crico-arytenoïdienne et laryngectomie reconstructive.
3. Babin, E., Joly, F., Vadillo, M., Dehesdin, D. 2005. Oncology and quality of life. Study in head and neck cancer. *Annales d'Oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale*, 122(3): 134-41.
4. Baum, S., McFarland, D. 1997. The development of speech adaptation to an artificial palate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4): 2353-9.
5. Bless, D. 1991. Assessment of laryngeal function. Phonosurgery: assessment and surgical management of voice disorders. New York: Raven Press.
6. Blood, G. 1984. Fundamental frequency and intensity measurements in laryngeal and alaryngeal speakers. *Journal of Communication Disorders*, 17(5): 319-24.
7. Boé, L.-J., Heim, J.-L., Honda, K., Maeda, S. 2002. The potential Neandertal vowel space was as large as that of modern humans. *Journal of Phonetics*, 30(3): 465-84.
8. Borel-Maisonny, S. 1956. Méthode de lecture. Paris: ARPLOE.
9. Bréal, M. 1897. Essais de sémantique : science des significations. Paris: Hachette.
10. Browman, C.P., Goldstein, L. 1992. Articulatory Phonology: An Overview. *Phonetica*, 49(3-4): 155-80.
11. Catford, J. 1964. Phonation types : the classification of some laryngeal components of speech production. In honour of Daniel Jones : papers contributed on the occasion of his eightieth birthday, 12 September 1961. London: Longmans.
12. Catford, J.C. 1977. Fundamental problems in phonetics. Bloomington: Indiana University Press. 278p.
13. Catford, J.C., Esling, J.H. 2006. Phonetics, Articulatory. In: Brown, K. (eds). *Encyclopedia of Language & Linguistics (Second Edition)*. Oxford: Elsevier. 425-42.

14. Chevalier, D., Laccourreye, O., Brasnu, D., Laccourreye, H., Piquet, J.J. 1997. Cricohyoidoepiglottopexy for glottic carcinoma with fixation or impaired motion of the true vocal cord: 5-year oncologic results with 112 patients. *The Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, 106(5): 364-9.
15. Czeremák, J.N. 1860. Du laryngoscope et de son emploi en physiologie et en médecine. Paris, : Baillière, J.-B. 112p.
16. Dandrey, P. 1990. La voix au XVIIe siècle. Paris: Aux amateurs de livres.
17. De Bodt, M.S., Wuyts, F.L., Van de Heyning, P.H., Croux, C. 1997. Test-retest study of the GRBAS scale: influence of experience and professional background on perceptual rating of voice quality. *Journal of Voice*, 11(1): 74-80.
18. de Krom, G. 1994. Consistency and reliability of voice quality ratings for different types of speech fragments. *Journal of Speech and Hearing Research*, 37(5): 985-1000.
19. Dejonckere, P.H. 1981. Théorie oscillo-impédantielle de la vibration des cordes vocales. Thèse d'agrégation de l'enseignement supérieur: Université Catholique de Louvain, Belgique.
20. Dejonckere, P.H. 1987. Phonatory physiology of the larynx: the oscillo-impedance concept. *Revue de Laryngologie - Otologie - Rhinologie*, 108 Spec No: 365-8.
21. Delangle, G. 1995. Titres, travaux et éléments biographiques de la vie professionnelle de Suzanne Borel-Maisonny. Rééducation Orthophonique. 321-38p.
22. Denby, B., Schultz, T., Honda, K., Hueber, T., Gilbert, J.M., Brumberg, J.S. 2010. Silent speech interfaces. *Speech Communication*, 52(4): 270-87.
23. Desjacques, A. 1990. La dimension orphique de la musique mongole. *Cahiers de Musiques Traditionnelles*, 3: 97-107.
24. Edmondson, J.A., Esling, J.H. 2006. The valves of the throat and their functioning in tone, vocal register, and stress: laryngoscopic case studies. *Phonology*, 23: 157-91.
25. Edmondson, J.A., Esling, J.H., Harris, J.G., Huang, T. 2005. A laryngoscopic study of glottal and epiglottal/pharyngeal stop and continuant articulations in Amis: An Austronesian language of Taiwan. *Language and Linguistics*, 6: 381-96.
26. Esling, J., Harris, J. 2005. States of the glottis: An articulatory phonetic model based on laryngoscopic observations. In: Associates, L.E. (eds). *A figure of speech: a festschrift for John Laver*. London: Mahwah, NJ.
27. Esling, J.H. 1996. Pharyngeal consonants and the aryepiglottic sphincter. *Journal of the International Phonetic Association*, 26(02): 65-88.
28. Fougeron, C. 2005. La phonologie articulatoire : une introduction. In: Nguyen, N., Wauquier-Gravelines, S., Durand, J. (eds). *Phonologie et Phonétique, forme et substance*. Hermes Science. 265-90.

29. Fournié, E. 1866. *Physiologie de la voix et de la parole*. Adrien-Delahaye.
30. Freud, S., Jankélévitch, S. 1923. *Introduction à la psychanalyse*. Payot.
31. Giovanni, A. 2000. Phonochirurgie des tumeurs bénignes des cordes vocales, EMC, Techniques Chirurgicales. *Tête et cou*: 46-350.
32. Giovanni, A., Ouaknine, M., Triglia, J. 1999. Determination of largest Lyapunov exponents of vocal signal: application to unilateral laryngeal paralysis. *Journal of Voice*, 13(3): 341-54.
33. Hamlet, S.L., Cullison, B.L., Stone, M.L. 1979. Physiological control of sibilant duration: insights afforded by speech compensation to dental prostheses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(5): 1276-85.
34. Hamlet, S.L., Stone, M. 1978. Compensatory alveolar consonant production induced by wearing a dental prosthesis. *Journal of Phonetics*, 6: 227-48.
35. Hammarberg, B., Fritzell, B., Gauffin, J., Sundberg, J., Wedin, L. 1980. Perceptual and acoustic correlates of abnormal voice qualities. *Acta Oto-Laryngologica (Stockh)*, 90(5-6): 441-51.
36. Hirano, M. 1974. Morphological structure of the vocal cord as a vibrator and its variations. *Folia Phoniatica*, 26(2): 89-94.
37. Hirano, M. 1981a. *Clinical examination of voice*. Wien & New York: Springer-Verlag.
38. Hirano, M. 1981b. *Clinical examination of voice*. Wien ; New York: Springer-Verlag.
39. Hirano, M., Hibi, S., Terasawa, R., Fujiu, M. 1986. Relationship between aerodynamic, vibratory, acoustic and psychoacoustic correlates in dysphonia. *Journal of Phonetics*, 14: 445-56.
40. Hirano, M., Kakita, Y. 1985. Cover-body theory of vocal fold vibration. *Speech Science: recent advances*. London: Taylor & Francis.
41. Hirose, H. 1976. Posterior cricoarytenoid as a speech muscle. *The Annals of Otolology, Rhinology, and Laryngology*, 85(3): 335-42.
42. Hirose, H. 1977. Laryngeal adjustments in consonant production. *Phonetica*, 34(4): 289-94.
43. Hirose, H. 1997. Investigating the physiology of laryngeal structures. *The Handbook of phonetic sciences*. Oxford; Cambridge: Blackwell.
44. Honda, K., Fujimura, O. 1991. Intrinsic vowel F0 and phrase-final F0 lowering: phonological vs. biological explanations. In: Gauffin, J., Hammarberg, B. (eds). *Vocal Fold Physiology: Acoustic, Perceptual and Physiological aspects of voice mechanisms* San Diego: Singular Publishing Group Inc. 149-57.

45. Honda, K., Hirai, H., Dang, J. 1994. Published. A physiological model of speech production and the implication of tongue-larynx interaction. *Proceedings ICSLP*.
46. Honda, K., Kiritani, S., Imagawa, H., Hirose, H. 1985. High-Speed Digital Recording of Vocal Fold Vibration Using a Solid-State Image Sensor. *Annual Bulletin Research Institute of Logopedics and Phoniatrics*, 19: 47-53.
47. Jacobson, B.H., Johnson, A., Grywalski, C., Silbergleit, A., Jacobson, G., Benninger, M.S., et al. 1997. The Voice Handicap Index (VHI): Development and Validation. *Am J Speech Lang Pathol*, 6(3): 66-70.
48. Jakobson, R., Fant, G., Halle, M. 1963. Preliminaries to speech analysis : the distinctive features and their correlates. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press.
49. Jiang, J.J., Zhang, Y., Ford, C.N. 2003. Nonlinear dynamics of phonations in excised larynx experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(4 Pt 1): 2198-205.
50. Kahane, J. 1998. Functional histology of the vocal folds. . St Louis: Mosby-year book 1853-68p.
51. Karnell, M.P., Hall, K.D., Landahl, K.L. 1995. Comparison of fundamental frequency and perturbation measurements among three analysis systems. *Journal of Voice*, 9(4): 383-93.
52. Kent, R.D. 1997. The speech sciences. Clifton Park, NY: Delmar.
53. Kimura, M., Sakakibara, K.-I., Imagawa, H., Chan, R., Niimi, S., Tayama, N. 2002. Histological investigation of the supraglottal structures in humans for understanding abnormal phonation. *Journal of Acoustical Society of America*, 112: 2446.
54. Kreiman, J., Gerratt, B. 2000. Measuring vocal quality. In: Kent, R., Bail (eds). *Voice Quality Measurements*. San Diego: Singular. 73-102.
55. Kreiman, J., Gerratt, B.R. 1996. The perceptual structure of pathologic voice quality. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(3): 1787-95.
56. Kreiman, J., Gerratt, B.R., Precoda, K., Berke, G.S. 1992. Individual differences in voice quality perception. *Journal of Speech and Hearing Research*, 35(3): 512-20.
57. Kremer, J.-M., Lederlé, E. 2005. L'orthophonie en France. Paris: Presses universitaires de France.
58. Laccourreye, H., Fabre, A., Ménard, M., Janot, F., Brasnu, D. 1988. Partial surgery of epithelioma of the glottic area. *Annales d'Oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale*, 105(1): 3-12.
59. Laccourreye, H., Laccourreye, O., Weinstein, G., Menard, M., Brasnu, D. 1990. Supracricoid laryngectomy with cricohyoidoepiglottopexy: a partial laryngeal procedure for glottic carcinoma. *The Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, 99(6): 421-6.

60. Laccourreya, H., Ménard, M., Fabre, A., Brasnu, D., Janot, F. 1987. Partial supracricoid laryngectomy. Techniques, indications and results. *Annales d'Oto-Laryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale*, 104(3): 163-73.
61. Ladefoged, P. 1983. The linguistic use of different phonation types. Vocal fold physiology: contemporary research and clinical issues. San Diego: College-Hill Press.
62. Laitman, J., Reidenberg, J. 1993. Comparative and developmental anatomy of laryngeal position. Head and Neck Surgery-Otolaryngology. Philadelphia: Lippincott.
63. Laver, J. 1980. The Phonetic description of voice quality. Cambridge; London; New York: Cambridge University Press.
64. Laver, J. 1994. Principles of phonetics. Cambridge ; New York: Cambridge University Press.
65. Laver, J., Hanson, R. 1980. Describing the normal voice. In: Laver, J. (eds). The gift of speech: readings in the analysis of speech and voice. Edinburgh: Edinburgh University Press.
66. Laver, J., Hiller, S., Beck, J.M. 1992. Acoustic waveform perturbations and voice disorders. *Journal of Voice*, 6(2): 115-26.
67. Ledda, G.P., Puxeddu, R. 2006. Carbon dioxide laser microsurgery for early glottic carcinoma. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 134(6): 911-5.
68. Lieberman, P., Crelin, E., Klatt, D. 1972. Phonetic ability and related anatomy of the newborn and adult human, neanderthal man, and chimpanzee. *American Anthropologist*, 74: 287-306.
69. Lisker, L. 1986. "Voicing" in English: a catalogue of acoustic features signaling /b/ versus /p/ in trochees. *Language and Speech*, 29(1): 3-11.
70. Maeda, S. 1972. Conversion of Midsagittal Dimensions to Vocal Tract Area Function. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 51(1A): 89-90.
71. McFarland, D.H., Baum, S.R. 1995. Incomplete compensation to articulatory perturbation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3): 1865-73.
72. McFarland, D.H., Baum, S.R., Chabot, C. 1996. Speech compensation to structural modifications of the oral cavity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(2): 1093-104.
73. Ohala, J. 1991. Published. The integration of phonetics and phonology. *Proceedings of the XIIIth International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS)*; Aix-en-Provence.
74. Pech, C., Giovanni, A., Henin, N. 1988. The voice without vocal cords. *Revue de Laryngologie - Otologie - Rhinologie*, 109(4): 373-7.
75. Pech, C., Giovanni, A., Henin, N. 1990 La voix après laryngectomies reconstructives. In: Médecine-Pharmacie, A.S. (eds). Bulletin d'Audiophonologie. Besançon.

76. Pierrehumbert, J. 1990. Phonological and Phonetic representation. *Journal of Phonetics*, 18: 375-94
77. Pierrehumbert, J., Beckman, M., Ladd, D. 2000. Conceptual foundations of phonology as a laboratory science. In: Burton-Roberts, N., Carr, P., Docherty, G. (eds). *Phonological Knowledge: its nature and Status*. Cambridge: Cambridge University Press. 273-303.
78. Piquet, J.J., Chevalier, D. 1991. Subtotal laryngectomy with crico-hyoido-epiglottopexy for the treatment of extended glottic carcinomas. *American Journal of Surgery*, 162(4): 357-61.
79. Reidenbach, M.M. 1998a. Aryepiglottic fold: normal topography and clinical implications. *Clinical Anatomy (New York, NY)*, 11(4): 223-35.
80. Reidenbach, M.M. 1998b. The muscular tissue of the vestibular folds of the larynx. *European archives of oto-rhino-laryngology: official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (EUFOS): affiliated with the German Society for Oto-Rhino-Laryngology - Head and Neck Surgery*, 255(7): 365-7.
81. Remacle, M., Eckel, H., Antonelli, A., Brasnu, D., Chevalier, D., Friedrich, G., et al. 2000. Endoscopic cordectomy. A proposal for a classification by the Working Committee, European Laryngological Society. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 257(4): 227-31.
82. Ritter, N. 1999. The sounds of the world's languages: Peter Ladefoged and Ian Maddieson, Oxford: Blackwell, 1996. xxi + 426 pp. *Lingua*, 107(3): 279-81.
83. Roh, J.-L., Kim, D.-H., Kim, S.Y., Park, C.I. 2007. Quality of life and voice in patients after laser cordectomy for Tis and T1 glottic carcinomas. *Head & Neck*, 29(11): 1010-6.
84. Rousselot, J. 1923. *Principes de Phonétique Expérimentale*. tome II. Paris: Welter, H.
85. Sakakibara, K.-I., Kimura, M., Imagawa, H., Niimi, S., Tayama, N. 2004. Published. Physiological study of the supraglottal structure. *ICVPB Marseille*.
86. Sato, K., Hirano, M., Nakashima, T. 2000. Comparative histology of the maculae flavae of the vocal folds. *The Annals of Otology, Rhinology, and Laryngology*, 109(2): 136-40.
87. Savariaux, C., Perrier, P., Orliaguet, J.P. 1995. Compensation strategies for the perturbation of the rounded vowel [u] using a lip tube: A study of the control space in speech production. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5): 2428-42.
88. Sawashima, M., Hirose, H. 1968. New laryngoscopic technique by use of fiber optics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 43(1): 168-9.
89. Schaffer, S. 1999. *Enlightened Automata. The sciences in enlightened Europe*. Chicago; London: the University of Chicago Press.

90. Schindler, A., Palonta, F., Preti, G., Ottaviani, F., Schindler, O., Cavalot, A.L. 2004. Voice quality after carbon dioxide laser and conventional surgery for T1A glottic carcinoma. *Journal of Voice*, 18(4): 545-50.
91. Schoentgen, J. 1989. Jitter in sustained vowels and isolated sentences produced by dysphonic speakers. *Speech Communication*, 8(1): 61-79.
92. Schoentgen, J., Bucella, F. 1997. Published. d'Acoustique, S.F. (eds). Acoustic analysis of dysphonic voices: descriptors and methods. *Proceedings Larynx 97*; Marseille.
93. Schoentgen, J., de Guchteneere, R. 1995. Time series analysis of jitter. *Journal of Phonetics*, 23(1): 189-201.
94. Stevens, K. 1991. Vocal fold vibration for obstruent consonants. In: Gauffin, J., Hammarberg, B. (eds). *Vocal Fold Physiology: acoustic, perceptual and physiological aspects of voice mechanisms*. San Diego: Singular Publishing Group. 29-36.
95. Stevens, K.N. 1998. *Acoustic Phonetics*. Cambridge (Mass.): MIT Press.
96. Talandier, C., Pavy, B., Huart, J., Majourau, A. 2003. Chirurgie et phonétique des fentes palatines ou comment Suzanne Borel a jeté le fondement de la recherche orthophonique. *Rééducation orthophonique*, 41(216): 13-23.
97. Tarneaud, J., Borel-Maisonny, S. 1941. *Traité pratique de phonologie et de phoniatrie : la voix, la parole, le chant*. Paris: Librairie Maloine.
98. Titze, I. 1990. *Measurements for the Assessment of Voice Disorders. Assessment of Speech and Voice Production: Research and Clinical Applications*. Maryland: NIDCD. 42-6.
99. Titze, I. 2006. *The Myoelastic Aerodynamic Theory of Phonation*. Iowa City: National Center for Voice and Speech.
100. Titze, I., Baken, R.J., Hertzfel, H. 1993. Evidence of chaos in vocal fold vibration. In: Titze, I. (eds). *Vocal Fold Physiology: frontiers in basic science*. San Diego: Singular Publishing Group. 143-88.
101. Titze, I.R. 2008. Nonlinear source-filter coupling in phonation: Theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5): 2733-49.
102. Tucker, H. 1994. Gross and microscopic anatomy of the larynx. In: Benninger, M., Jacobson, B., AF., J. (eds). *Vocal arts medicine: the care and prevention of professional voice disorders*. New York: Thieme Medical Publishers. 11-29.
103. Union Internationale Contre le Cancer, U. 2003. *TNM : Classification des tumeurs malignes*. 6e édition ed. Sobin, L.-H., Wittekind, C., editors. Paris Cassini.
104. Vaissière, J., Honda, K., Amelot, A., Maeda, S., Crevier-Buchman, L. 2010. Multisensor platform for speech physiology research in a phonetics laboratory. *The Journal of the Phonetic Society of Japan*, 14((2)): 65-77.

105. Van Den Berg, J. 1958. Myoelastic-aerodynamic theory of voice production. *Journal of Speech and Hearing Research*, 1(3): 227-44.
106. Wallace, K. 1954. *History of Speech Education in America*. New York: Appleton Century Crofts.
107. Weir, N.F. 1973. Theodore Billroth: the first laryngectomy for cancer. *The Journal of Laryngology and Otology*, 87(12): 1161-9.
108. Woisard, V., Bodin, S.v., Yardeni, E., Puech, M. 2007. The voice handicap index: correlation between subjective patient response and quantitative assessment of voice. *Journal of Voice*, 21(5): 623-31.