



HAL
open science

Comment analyser la voix humaine dans la parole et dans le chant ? Les outils scientifiques et méthodes de la recherche fondamentale à disposition de la recherche clinique sur la voix et leurs implications en orthophonie

Nathalie Henrich Bernardoni, Audrey Acher

► To cite this version:

Nathalie Henrich Bernardoni, Audrey Acher. Comment analyser la voix humaine dans la parole et dans le chant ? Les outils scientifiques et méthodes de la recherche fondamentale à disposition de la recherche clinique sur la voix et leurs implications en orthophonie. *Rééducation orthophonique*, 2014, Recherche en orthophonie-logopédie et identité professionnelle, 257, pp.155-176. hal-01427026

HAL Id: hal-01427026

<https://hal.science/hal-01427026>

Submitted on 11 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comment analyser la voix humaine dans la parole et dans le chant ?
Les outils scientifiques et méthodes de la recherche fondamentale à disposition de la recherche clinique sur la voix et leurs implications en orthophonie

Nathalie Henrich Bernardoni, Audrey Acher
Département Parole et Cognition, GIPSA-lab, Grenoble, France

Auteurs :

Nathalie Henrich Bernardoni, Docteur en Acoustique, Chercheure CNRS en Sciences de la Voix, nathalie.henrich@gipsa-lab.fr

Audrey Acher, Orthophoniste, Doctorante en Sciences Cognitives, Assistante Temporaire d'Enseignement et de Recherche en Sciences du Langage, audrey.acher@gipsa-lab.fr

GIPSA-lab, Département Parole et Cognition - UMR 5216 CNRS/Grenoble INP/UJF/U. Stendhal
Domaine Universitaire, 11 rue des Mathématiques, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex France

Résumé :

Cet article s'intéresse à la question de l'analyse de la voix humaine dans la parole et dans le chant et présente l'approche actuelle mise en œuvre par les scientifiques. Après une description de nombreuses techniques exploratoires qui s'articulent autour des niveaux fondamentaux de la production de la voix et de la parole que sont la respiration, la phonation et l'articulation, une réflexion méthodologique est proposée. La question des possibilités et limites de la mesure est discutée, ainsi que la façon dont ces outils peuvent être appliqués dans un cadre clinique, dans la pratique orthophonique quotidienne. Des cas concrets permettent d'illustrer la mise en pratique de ces outils dans le contexte actuel de la recherche scientifique sur la production de la voix parlée et chantée.

Mots-clés : analyse de la voix, phonétique clinique, méthodes et outils scientifiques, précision et incertitude

Abstract :

This paper focuses on the question of human-voice analysis in speech and singing. Current approach conducted by speech and voice scientists is presented. Several assessment techniques are described, related to the foundations of voice and speech production: breathing, phonation, and articulation. The possibilities and limitations of the measurement tools are discussed, together with their applicability in clinical practice and in a daily speech therapy. Practical examples illustrate the way these experimental tools are currently applied in a scientific research approach of voice production in speech and singing.

Keywords: voice analysis, clinical phonetics, scientific methods and tools, accuracy and uncertainty

Introduction

L'orthophoniste qui cherche à rééduquer un comportement vocal pathologique est en permanence dans une écoute analytique de son patient. Du premier contact vocal aux exercices à visée thérapeutique proposés, il aiguise son oreille à détecter les signes du dysfonctionnement ainsi que ceux en faveur d'une amélioration du comportement vocal. L'oreille est ainsi le premier et le meilleur outil de l'orthophoniste pour une réhabilitation fonctionnelle de la voix. Il existe néanmoins d'autres outils que

notre oreille qui nous permettent d'observer, d'évaluer, de mesurer le comportement vocal. Quels sont ces outils que les sciences de la voix et de la parole ont à disposition pour nous permettre d'analyser la voix humaine ? Comment les utiliser à bon escient, avec précision et rigueur ? De quelle façon sont-ils mis à profit dans les recherches sur la voix en orthophonie ? Comment pourraient-ils être utilisés en bilan et rééducation orthophonique ? Ce sont ces questions que nous nous proposons de traiter dans cet article, afin d'apporter un éclairage sur les outils de recherche en analyse de la voix.

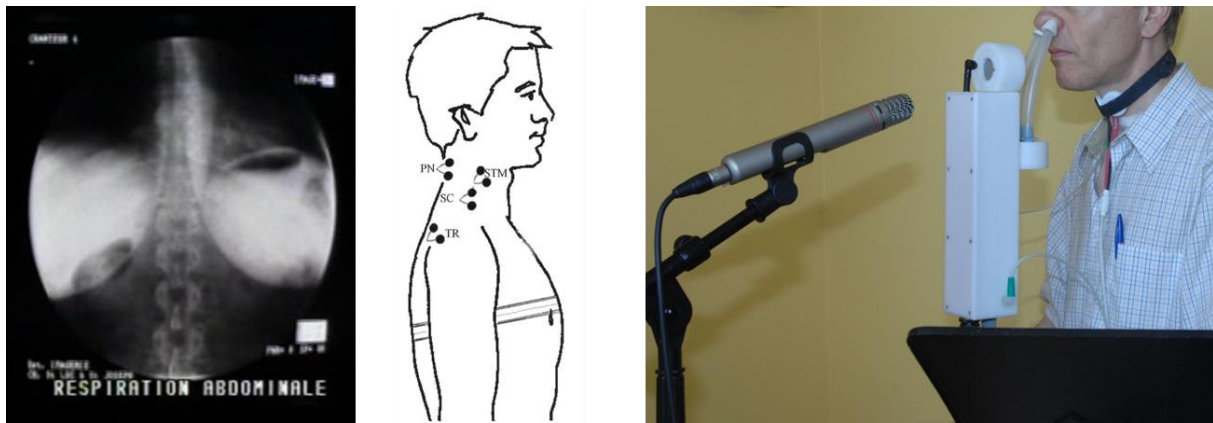
1. Les techniques expérimentales à disposition du chercheur

La production de la voix humaine fait intervenir trois niveaux essentiels pour la parole, le chant et toute forme d'expression vocale (Henrich, 2012). Le premier niveau porte sur le contrôle respiratoire. Il permet de fournir une énergie aérodynamique au système vocal. Le second niveau porte sur le contrôle laryngé de la phonation. L'énergie de l'air se transforme en son après interaction avec des parois mobiles, comme les plis vocaux ou tout autre pli au sein du larynx, ou par rencontre d'obstacles sur son parcours dans le conduit vocal (comme par exemple les dents ou le rapprochement de la langue vers le palais). Une source sonore est ainsi produite. Le troisième et dernier niveau est celui du contrôle articulatoire. La source acoustique est modélisée par les variations temporelles lentes de l'aire des cavités qui constituent le conduit vocal, sous l'effet du mouvement des articulateurs que sont le larynx, le palais, la langue, les dents, les lèvres, la mandibule. Nous allons voir à présent comment analyser la voix selon ces trois niveaux de contrôle.

a. Analyse des gestes respiratoires

Comment observer les gestes respiratoires ? La technique la plus directe et la plus aboutie reste la cinéradiographie par rayons X, qui ne peut néanmoins plus être appliquée à des fins de recherche en raison de la dangerosité des expositions. Illustrée sur la Figure 1, cette technique d'imagerie permet notamment de visualiser de façon statique ou dynamique les mouvements des organes essentiels au contrôle respiratoire, tels la cage thoracique ou les deux hémicoupoles diaphragmatiques. Elle permet également l'observation d'organes adjacents, tels la structure de la colonne vertébrale dorso-lombaire, l'ombre du cœur ou la « bulle » gastrique (Trolliet-Cornut, 2002). Des films illustratifs sont à disposition du lecteur dans l'ouvrage collectif de Cornut (2002).

Nous pouvons évaluer les actions musculaires qui participent à la gestion respiratoire. Pour ce faire, la technique la plus usitée est l'électromyographie de surface (EMG, voir Figure 1). Les activités électriques des muscles pendant leurs phases de détente et de contraction sont détectées à l'aide d'électrodes de contact plates et circulaires positionnées sur la peau au niveau des muscles à étudier. Des couples d'électrodes sont communément utilisées. Cette technique requiert de repérer avec précision la position des muscles chez le sujet, par palpation et observation de l'amplitude du signal mesuré. Les électrodes sont positionnées de façon écartée dans le sens des fibres musculaires. Cette technique est souvent complétée par une mesure simultanée des pressions thoracique et abdominale à l'aide d'une ceinture de contrainte mesurant les variations de circonférence des zones ciblées (e.g. Pettersen et al., 2005).



Trolliet-Cornut, 2002 Pettersen et al., 2005

Figure 1 : Exemples d'outils d'analyse des gestes respiratoires. A gauche : cinéradiographie ; au centre : EMG ; à droite : mesures aérodynamiques par EVA2™. Abréviations pour les muscles en EMG : STM sternocléidomastoïdien, TR trapèze supérieur, SC scalène, et PN muscles postérieurs du cou.

Nous pouvons enfin mesurer l'évolution au cours du temps de paramètres aérodynamiques, comme le volume pulmonaire, la pression d'air sous-glottique, la pression d'air intra-orale, le débit d'air oral et nasal. Les variations de volume pulmonaire se mesurent à l'aide d'un pléthysmographe respiratoire à variation d'inductance, tels les systèmes Visuresp® ou Respirace®. Un gilet sans manche élastique est enfilé par-dessus les vêtements du sujet et les variations de surface de section des compartiments thoracique et abdominal permettent d'estimer les variations du volume pulmonaire. Le signal relatif aux variations pulmonaires peut être filtré puis dérivé par rapport au temps pour fournir une estimation du débit respiratoire instantané. Cet outil permet aussi une estimation des contributions de chacun des compartiments thoracique et abdominal. De nombreuses mesures aérodynamiques sont possibles simultanément grâce au système d'Evaluation Vocale Assistée EVA2™ (Teston, 1992 ; Teston et al., 1995 ; Giovanni et al., 1995 ; Ghio et al., 2010 ; Ghio, 2012). Ce système a été conçu pour la mesure aérodynamique et acoustique de la parole. Il est doté de nombreux capteurs, parmi lesquels des capteurs de pression aérodynamique qui permettent la mesure des pressions d'air sous-glottique et intra-orale et des capteurs de débit en sortie des lèvres et des narines pour la mesure des débits d'air oral et nasal (voir Figure 1). Les logiciels proposés avec le système EVA2 permettent une investigation clinique du comportement vocal dans son ensemble. Cet outil est adapté à l'évaluation et au suivi thérapeutique dans le cadre de la rééducation orthophonique d'un comportement vocal pathologique grâce à des mesures objectives du comportement dysphonique d'un patient . Il permet de fournir un grand nombre de paramètres aérodynamiques qui peuvent s'avérer pertinents :

- capacité et endurance vocale du patient à travers le temps maximal de phonation, le volume d'air maximal expiré, le débit moyen et un ensemble de mesures spirométriques
- comportement d'effort ou de forçage vocal, à travers le rendement glottique, l'efficacité glottique, la résistance glottique
- insuffisances vélares à travers le volume et le débit d'air nasal, le pourcentage de « fuites vélares » et le calcul de la résistance nasale

b. Analyse des gestes phonatoires

Bien que l'espace laryngé soit logé au cœur de notre cou, nous avons à disposition un grand nombre d'approches directes ou indirectes pour appréhender son fonctionnement.

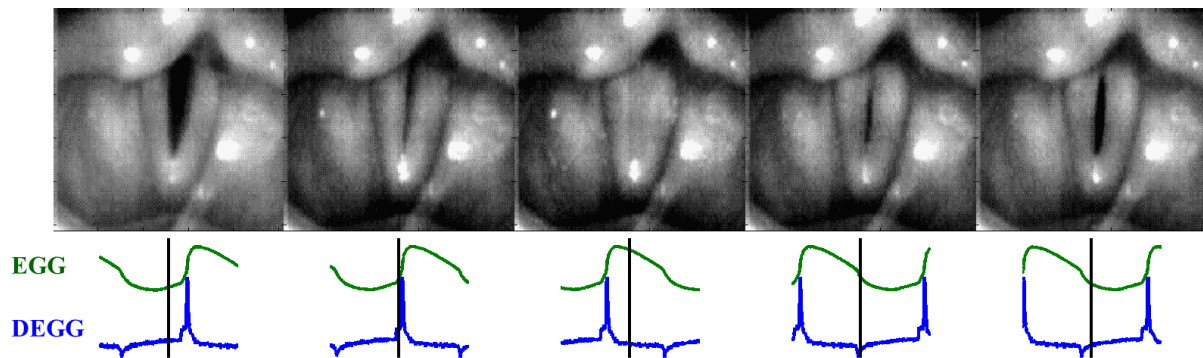


Figure 2 : Observation endoscopique du mouvement vibratoire glottique par cinématographie ultra-rapide et mesure de contact par électroglottographie (EGG) au cours d'un cycle glottique. La dérivée d'un signal EGG (DEGG) renseigne sur les instants de mise en contact et de perte du contact glottique.

De façon directe mais invasive, nous pouvons utiliser les techniques actuelles d'endoscopie laryngée. Perfectionnement du laryngoscope à miroir inventé par Babington en 1827 et largement utilisé en phonation par Garcia, le laryngoscope est l'outil de visualisation des plis vocaux par excellence. Il nécessite l'apport de lumière en fond de gorge à l'aide d'une source de lumière blanche. Il peut être complété par un stroboscope qui, réglé sur la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux, permet une reconstitution visuelle du mouvement vibratoire glottique. Les possibilités technologiques actuelles permettent de prendre des images en couleur et d'accroître la vitesse d'acquisition à plusieurs milliers d'images par seconde (Crevier-Buchman et Vincent, 2009). La Figure 2 présente quelques images du plan glottique acquises par cinématographie ultra-rapide à 4000 images/s sur la durée d'un cycle glottique. L'aspect invasif peut être limité par l'usage d'un nasopharyngoscope, c'est-à-dire d'un fibroscope flexible qui s'introduit par une narine et se positionne dans l'espace pharyngé au-dessus du larynx. Cette approche a l'avantage de permettre la visualisation des mouvements laryngés dans la production de parole, alors que le laryngoscope rigide ne permet que d'examiner le comportement vibratoire des plis vocaux sur des voyelles produites avec la langue tirée vers l'avant. Elle a l'inconvénient d'une moins bonne résolution des images laryngées. L'application des techniques de cinématographie ultra-rapide à la nasopharyngoscopie n'a pas encore été concluante en raison du niveau de luminosité requise pour ces techniques. Nous pouvons mentionner aussi la technique de vidéokymographie (Svec et Schutte, 1996), qui exploite les propriétés d'affichage des écrans par succession de lignes horizontales pour permettre d'accroître la vitesse de visualisation d'une ligne sélectionnée du plan glottique. Une caméra standard, qui enregistre 50 images par seconde, peut alors enregistrer quelques 8000 lignes par seconde. Si cette méthode permet l'observation à moindre coût des phénomènes transitoires au niveau glottique et laryngé, elle est limitée par la perte de vue d'ensemble du plan glottique.

De façon indirecte, l'accolement des plis vocaux peut être détecté par électroglottographie, une technique très usitée du fait de sa simplicité et de son caractère informatif (pour une revue de la littérature, voir Henrich, 2001). Cette technique mesure la résistance au passage d'un courant électrique de faible intensité entre deux électrodes placées sur le cou du patient. Cette résistance est fonction du degré de contact des plis vocaux au sein du larynx, étant donné que l'air est moins bon conducteur que les tissus humains et oppose donc une plus grande résistance au passage d'un courant électrique. Le signal électroglottographique résultant est donc modulé par les mouvements d'accolement et décollement des plis vocaux lors de la phonation, ainsi illustré par la Figure 2. A partir d'un tel signal, de nombreuses mesures physiologiques sont possibles, comme par exemple la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux, la durée des phases de contact, l'amplitude relative du contact, la vitesse du contact. Si les électroglottographes utilisés dans les laboratoires de

recherche restent relativement onéreux (plusieurs milliers d'euros), certains dispositifs simplifiés sont devenus accessibles à un coût beaucoup moins élevé, comme par exemple le dispositif *EKGs for singers*.

Le comportement phonatoire peut également s'estimer à partir de la simple mesure par un microphone du signal acoustique en sortie des lèvres. Cette approche d'estimation de la source de débit acoustique par filtrage inverse est élégante par sa simplicité technique, mais elle est limitée par le cadre théorique fortement contraint qu'elle impose. Elle s'appuie sur l'hypothèse forte de linéarité du système source-filtre. Elle s'abstrait de la problématique des interactions entre phonation et articulation, ce qui peut être discutable dans l'analyse de productions vocales où l'équilibre pneumo-phono-résonantiel joue un rôle essentiel.

c. Analyse des gestes articulatoires

La voix a pour essence d'être articulée en parole. Là encore, plusieurs techniques de pointe nous renseignent sur les gestes articulatoires de façon plus ou moins invasive.

Si les premières observations des mouvements articulatoires s'appuient sur de l'imagerie par rayons X (Fant, 1960), cette approche n'est plus autorisée aujourd'hui à des fins de recherche. L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) est devenue l'approche communément utilisée pour étudier la position et la forme des articulateurs. Elle est illustrée sur la Figure 3. Il s'agit d'une technique relativement peu invasive, mais qui implique d'allonger le patient dans une machine IRM dont le niveau sonore peut être perturbant pour la production vocale. Même si l'acquisition dynamique se développe peu à peu (voir par exemple les études récentes de Echternach et al. sur la voix chantée lyrique, e.g. 2010), l'acquisition statique par tenue d'un son vocal sur plusieurs secondes reste prédominante, limitant donc les possibilités exploratoires de cette technique aux configurations articulatoires quasi-statiques.

Le mouvement dynamique des articulateurs peut se mesurer à partir d'un articulographe sur le principe de l'électromagnétographie (EMA). Cette technique consiste à suivre le mouvement de marqueurs positionnés sur des points de chair liés aux articulateurs à étudier. Les marqueurs sont de petites bobines qui génèrent des courants électriques sous l'effet du champ magnétique auquel elles sont soumises. Les modèles actuels d'articulographes permettent de mesurer le déplacement de 12 marqueurs à une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz. Si cette technique ne permet pas de rivaliser en résolution spatiale avec celle de l'IRM, elle permet une résolution temporelle très intéressante et nécessaire pour certaines études.

De plus en plus répandue, la visualisation des mouvements de la langue par échographie est une alternative intéressante à la technique EMA (Hueber, 2009, 2013). Une sonde ultrasonore est positionnée sous le menton du patient. Elle permet d'observer le mouvement de la langue dans les plans sagittal et coronal avec une résolution temporelle de 60 à 100 images par seconde. Cette technique permet également un retour visuel des mouvements de la langue pendant la parole, ce qui a potentiellement de belles applications en perspective en rééducation orthophonique. En effet, l'affichage sur un écran de la forme de la langue en temps réel rend cette technique très attractive pour les orthophonistes comme outil de rétroaction visuelle, comme nous le verrons sur quelques exemples mentionnés en Partie 3.

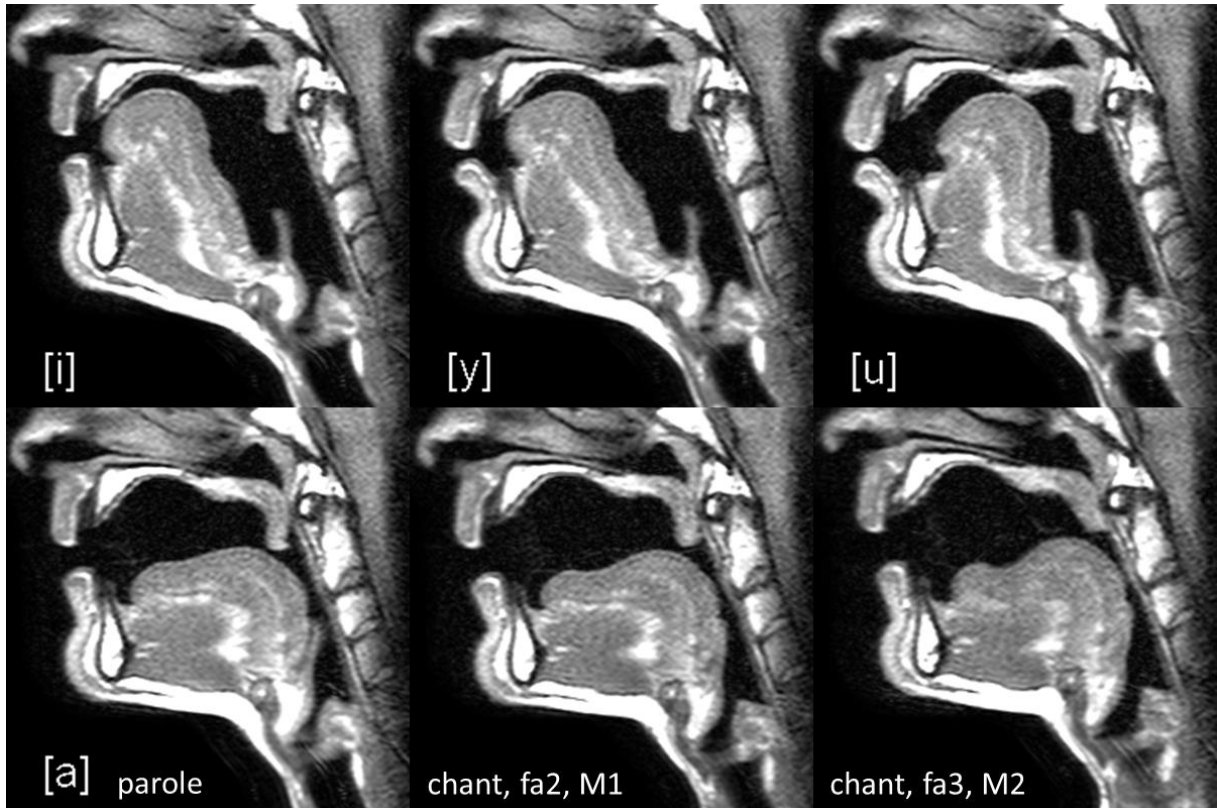


Figure 3 : Exemples de configurations articulatoires observées par IRM sur un sujet masculin. En haut : voyelles tenues parlées. En bas : sur une même voyelle, geste articulatoire dans la parole et le chant sur deux hauteurs et deux mécanismes laryngés (voix de poitrine en M1, voix de tête en M2).

d. Analyse acoustique de la voix

Bien souvent, en cabinet, l'orthophoniste n'a pas à disposition les outils technologiques que nous venons de décrire. Pour analyser la voix de son patient, il s'appuie sur la puissance informative de son écoute analytique. Néanmoins, comment garder trace de cette écoute d'une séance à l'autre ? Comment vérifier objectivement les ressentis subjectifs ? A peu de frais, il est possible de s'équiper d'un système d'enregistrement des signaux audio : un microphone adapté, une carte son, un ordinateur. Le choix du matériel est important, en particulier celui du microphone (Ternström et Granqvist, 2010). Suivant les recommandations publiées par Svec et Granqvist (2010), la réponse en fréquence du microphone doit être plate (à 2dB près) dans la zone de fréquence d'intérêt (dans l'idéal de 20Hz à 20kHz), la dynamique appropriée pour permettre l'enregistrement sans distorsion des productions les plus sonores et le rapport signal sur bruit suffisamment élevé (au moins 15dB) pour permettre l'enregistrement des productions les moins sonores. Nous reviendrons en Partie 2 sur quelques aspects techniques à prendre en compte.

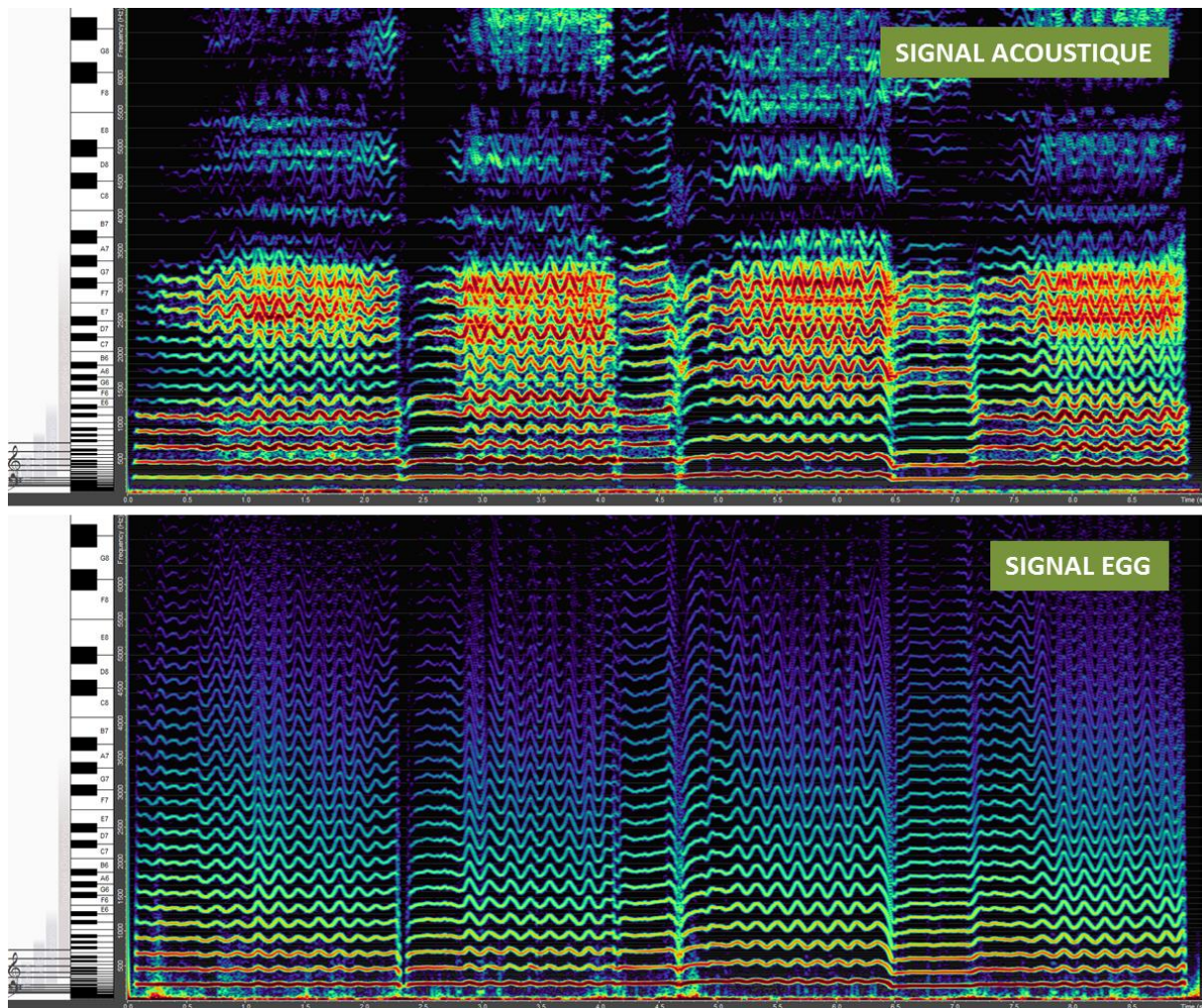


Figure 4 : Analyse temps-fréquence du signal acoustique en sortie des lèvres et du signal électroglottographique (EGG) correspondant, à partir du logiciel *OvertoneAnalyzer*. Phrase chantée par un baryton ("ave maria").

L'analyse la plus simple à effectuer à partir d'un enregistrement du signal audio est de représenter visuellement le son par les fréquences acoustiques qu'il contient et leur évolution au cours du temps, comme le montre la Figure 4. L'oreille humaine est intégrative et elle ne permet pas toujours de distinguer avec précision les zones fréquentielles où l'énergie acoustique est renforcée ou atténuée. L'analyse temps-fréquence d'un son met en évidence les fréquences qui le constituent, leurs niveaux d'amplitude et leurs variations temporelles. Cette représentation visuelle d'un son est appelée spectrogramme ou sonagramme. De nombreux logiciels permettent cette visualisation de façon plus ou moins automatique. Ils permettent de mesurer, sur le signal audio, des paramètres acoustiques d'intérêt pour l'analyse de la voix parlée ou chantée, interprétables pour un clinicien et complément indispensable de l'analyse perceptive. Des caractéristiques acoustiques de la voix dans la parole peuvent être objectivées, telles la fréquence fondamentale, l'intensité vocale, la coordination pneumophonatoire, les fréquences formantiques et la richesse harmonique. Quel logiciel choisir ? Le logiciel *WaveSurfer* est un logiciel gratuit et simple d'utilisation pour visualiser et analyser le son, la fréquence fondamentale et la richesse harmonique. Le logiciel *Praat* est également un logiciel gratuit d'édition et d'analyse du son, mais il diffère par la complexité de son usage. Une connaissance préalable de l'outil est nécessaire pour pouvoir en faire un bon usage (voir les tutoriaux et scripts proposés par Gendrot, 2013). Une fois maîtrisé, le logiciel *Praat* est un outil complet et paramétrable par l'utilisateur. Conçu pour l'analyse phonétique de la parole, il permet l'annotation des corpus. Le logiciel *Overtone Analyzer*, développé initialement comme un outil de pédagogie vocale, se distingue

par une interface très conviviale complétée d'un clavier et d'une portée musicale, pour un coût modéré (99€ en 2013). Il présente l'avantage de pouvoir filtrer visuellement des fréquences harmoniques dans le signal analysé pour un travail ciblé sur l'écoute du timbre par exemple. Par ailleurs, le logiciel *Vocalab* est présenté en détail dans un autre article de cette revue.

Le premier paramètre d'importance est la fréquence fondamentale, qui renseigne sur la hauteur de la voix, sa stabilité au cours de la production, sa plage de variabilité. La fréquence fondamentale se mesure sur les parties voisées du signal acoustique, c'est-à-dire pour la production vocale qui met en jeu la vibration des plis vocaux. Sa définition et son calcul requièrent une stabilité de la durée du cycle vibratoire glottique sur plusieurs cycles consécutifs. Quand cette durée est modifiée de façon notable d'un cycle glottique à l'autre lors de la production de voix pathologique, la mesure de fréquence fondamentale perd de son sens. Il peut être alors intéressant de comparer les durées de cycles glottiques successifs. C'est ce que propose le paramètre vocal connu sous le nom de *jitter*, qui représente une mesure des perturbations à court terme de la fréquence fondamentale du signal sonore exprimée en pourcentage. Le *jitter* se calcule comme le rapport entre la moyenne de toutes les différences de durées entre deux cycles glottiques successifs (en valeur absolue) et la durée moyenne d'un cycle. Selon le manuel du logiciel *Praat*, le seuil normal/pathologique de *jitter* est fixé à 1,04%. Un *jitter* élevé reflète une variabilité importante dans la durée du cycle glottique. Un autre paramètre de perturbation, le *shimmer*, reflète les perturbations à court terme de l'amplitude du signal sonore. La moyenne des différences entre l'amplitude maximale de deux cycles glottiques successifs (en valeur absolue) est divisée par la moyenne des amplitudes maximales de chaque cycle. Le seuil normal/pathologique est fixé à 3,81 % (Roublot, 2003). Ces deux paramètres de perturbation sont mesurés lors de la production d'une voyelle tenue. La pertinence de ces mesures dans l'analyse des voix pathologiques est souvent questionnée (Bielamowicz et al., 1996). Comme le soulignent Baken et Orlikoff (1997), les mesures acoustiques de la voix, et en particulier les mesures de perturbation, ne présentent pas de corrélation cliniquement utile avec des catégories de troubles vocaux spécifiques. Elles ne permettent en aucun cas le diagnostic.

La capacité à parler fort est reflétée par la mesure de l'intensité moyenne. Seule une intensité calibrée, indépendante du volume d'enregistrement, permet une mesure comparative entre enregistrements.

La coordination pneumo-phonatoire peut être évaluée à travers la mesure du temps maximum de phonation sur une voyelle (TMP en moyenne de 15s pour les femmes et de 20s pour les hommes), le rapport de durée de la consonne sourde /s/ divisé par celui de son équivalent sonore /z/ (rapport équivalent à 1 dans le cas d'une coordination optimale). Le rapport de durée entre parties voisées et parties non voisées est également informatif de l'usage vocal du sujet ou du patient.

L'analyse du signal audio mesuré en sortie des lèvres permet aussi d'estimer la fonction de transfert acoustique du conduit vocal et d'en déduire les fréquences et largeurs de bande des formants. Les formants sont des zones spectrales d'énergie renforcée par l'action de résonance des cavités qui constituent le conduit vocal. Leur positionnement conditionne notre perception des voyelles. Pour l'analyse formantique, le logiciel *Praat* est le logiciel d'analyse de la voix le plus approprié, car il permet de tracer l'évolution des fréquences formantiques sur l'analyse spectrographique du signal. D'autres paramètres de timbre reflètent la richesse harmonique, à travers la mesure de rapports d'amplitude entre les différents harmoniques d'un son voisé.

e. Analyse perceptive de la voix et du ressenti vocal

L'analyse acoustique utilisée en recherche repose sur des paramètres vocaux interprétables pour un clinicien et complément indispensable de l'analyse perceptive. De nombreuses approches sont proposées dans la littérature, dont l'échelle GRBAS, sa version raccourcie, l'index RBH, ou le protocole CAPE-V (Ziethe et al., 2011) pour n'en citer que trois. L'analyse perceptive de la voix grâce à l'échelle GRBAS(+I) reste le 'gold standard' utilisé en clinique et une des approches les plus communément utilisées en recherche (Hirano, 1981 ; Dejonckere, 1993). Cette échelle évalue la sévérité de la dysphonie d'une voix, à partir de l'écoute orientée sur 5 à 6 facteurs :

- grade G (*Grade*), le degré global de dysphonie perçue
- raucité R (*Roughness*), l'irrégularité de la voix
- souffle B (*Breathiness*), la présence de bruit de souffle sur la voix
- asthénie A (*Asthenia*), la faiblesse vocale en terme d'intensité et de timbre
- forçage S (*Strain*), le ressenti d'un effort vocal inadapté
- instabilité I (*Instability*)

L'analyse perceptive subjective reste encore de nos jours controversée en recherche (Kreiman et al., 1993). La perception humaine est catégorielle, individuelle et différentielle (Henrich et al., 2008). L'analyse perceptive de la voix va donc dépendre fortement du jury d'écoute, de son niveau d'expertise et du degré de consensus entre les juges sur les termes employés et leurs référents en mémoire. Là où la recherche peut apporter de la rigueur à la clinique est la modalité des passations. En effet, là où la recherche constitue des jurys d'écoute avec écoute à l'aveugle, le clinicien est en présence du patient pour l'évaluer. Il reste à mettre en œuvre une écoute plus détachée de la personnalité et de l'histoire du patient (en proposant éventuellement cette évaluation à un confrère) afin de réaliser une analyse perceptive plus fiable.

		(0)	(1)	(2)	(3)	(4)
		J	PJ	P	PT	T
F1	On m'entend difficilement à cause de ma voix					
F3	On me comprend difficilement dans un milieu bruyant					
P10	On me demande : " Qu'est-ce qui ne va pas avec ta voix ? "					
P14	J'ai l'impression que je dois forcer pour produire la voix					
F16	Mes difficultés de voix limitent ma vie personnelle et sociale					
P17	La clarté est imprévisible					
F19	Je me sens écarté(e) des conversations à cause de ma voix					
F22	Mes problèmes de voix entraînent des pertes de revenus					
E23	Mes problèmes de voix me contrarient					
E25	Je me sens handicapé(e) à cause de ma voix					

SCORE

TOTAL : | _ | _ | _ |

Figure 5 : Questionnaire pour l'évaluation du ressenti vocal en parole par VHI-10. J=jamais ; PJ=presque jamais ; P=parfois ; PT=presque toujours ; T=toujours. D'après le rapport INSERM, Autesserre et al., 2006.

Concernant l'évaluation du ressenti du trouble vocal chez le patient, l'exemple du Voice Handicap Index (VHI), échelle d'auto-évaluation de la voix mise au point par Jacobson et al. (1997), reste une des évaluations de choix pour quantifier l'aspect "invalidant" qu'un trouble vocal peut provoquer sur la qualité de vie. Le VHI fournit une mesure des conséquences fonctionnelles, émotionnelles et

physiques des troubles vocaux, à l'aide d'une échelle applicable à une grande variété de troubles vocaux. La version initiale, qui comprenait 85 items, a été réduite à 30 items (Jacobson et al., 1997), puis à 10 items (Rosen et al., 2004) comme illustré sur la Figure 5 dans sa version française, afin de permettre une application en clinique. L'évaluation du ressenti vocal par VHI fait également partie d'une batterie d'évaluation clinique de la dysarthrie (BECD, Ortho-Editions, Pascal Auzou et Véronique Rolland-Monnoury) et trouve donc une légitimité dans le domaine de l'auto-évaluation non seulement des troubles de la voix liés à une dysphonie dysfonctionnelle mais également à un trouble de la réalisation motrice dû à une atteinte neurologique. Cet outil ayant rencontré un succès important dans la communauté voix et prenant en compte les aspects psycho-sociaux des troubles vocaux, deux autres questionnaires ont été développés spécifiquement pour la parole (Speech Handicap Index, Rinkel et al., 2008) et pour le chant (Morsomme et al., 2007).

2. Réflexion méthodologique : possibilités et limites des outils

a. Des signaux analogiques aux données numériques : quantification des données, précision des mesures et incertitude

Nous vivons à l'ère du numérique et les signaux analogiques captés par ces différents outils de mesure sont convertis en signaux numériques avant d'être sauvegardés sur un ordinateur. Cette opération de conversion analogique/numérique a un impact sur les signaux qu'il est important de connaître.

Le premier aspect de cette conversion est l'échantillonnage du signal : il existe une durée non nulle entre deux mesures successives. La fréquence de prise de mesure, qu'on appelle fréquence d'échantillonnage, va définir la précision de l'information enregistrée. Plus cette fréquence sera élevée, plus les variations rapides du signal (fluctuations hautes fréquences) seront prises en compte. Dans le cas d'un signal audio de parole, il est nécessaire d'avoir de l'information fréquentielle dans toute la bande audible, donc de préférence jusqu'à des fréquences de 16kHz à 20kHz. Ceci impose d'avoir une fréquence d'échantillonnage au moins deux fois supérieure à la fréquence limite d'intérêt (Théorème de Shannon). Les cartes d'acquisition proposent des fréquences d'échantillonnage à 44,1kHz ou 48 kHz, ce qui permet de couvrir la gamme des fréquences audibles. Si ces fréquences d'échantillonnage conviennent bien à l'enregistrement de signaux audio, il n'est parfois pas nécessaire de recourir à une telle précision temporelle pour des signaux qui évoluent lentement au cours du temps. Certains signaux, les signaux de débit ou de pression aérodynamique par exemple, ne demandent pas de fréquence d'échantillonnage très élevée car ils évoluent lentement au cours du temps.

Le second aspect de cette conversion est la quantification du signal : le signal est décrit par une quantité finie de valeurs du fait de la capacité de codage (généralement sur 16 bits). La quantification entraîne, comme l'échantillonnage, une perte de données et un bruit éventuel (bruit de quantification).

La quantification des données entraîne une imprécision sur les données inhérentes à ce processus. Cette imprécision peut également dépendre de l'outil de mesure, des conditions d'acquisition. Aucune mesure ne permet d'approcher la réalité de façon exacte. Evaluer la précision d'une mesure et l'intervalle d'incertitude reflète la qualité d'une approche expérimentale, gage d'une démarche scientifique rigoureuse et réfléchie. Nombreuses sont les études qui donnent des mesures à 2 ou 3 chiffres après la virgule, alors que l'outil de mesure ne permet pas, et de loin, une telle précision. L'évaluation de l'incertitude d'une mesure nécessite de connaître les caractéristiques de précision de l'outil de mesure et celles de la conversion analogique-numérique. Il est à mentionner ici que la

sauvegarde de données sous des formats compressés, comme par exemple l'encodage mp3 de signaux audio, est à proscrire car il y a toujours une perte d'information dans ces encodages.

b. Ce que nous dit la mesure et ce qu'elle ne nous dit pas

L'observation, l'estimation ou la mesure d'un phénomène ne sont que le reflet de sa réalité à travers les lunettes de l'expérimentateur. Soyons donc prudents à ne pas vouloir faire dire à une mesure plus qu'elle n'a à nous dire. Chaque outil d'analyse de la voix a ses possibilités, mais également ses limites pour appréhender la complexité du monde réel. Mesurer un phénomène, c'est tout d'abord s'en faire une idée au préalable, connaître l'ordre de grandeur des valeurs attendues, avoir des hypothèses sur les résultats attendus.

Citons comme premier exemple les outils de visualisation endoscopique. Ils projettent des volumes tri-dimensionnels sur un plan en deux dimensions. Les images nous montrent les structures laryngées et supra-laryngées mise en jeu, mais elles ne permettent pas de restituer fidèlement les distances entre ces structures. Un mouvement même faible d'éloignement ou de rapprochement du plan glottique implique une diminution ou une augmentation de la taille apparente des structures. Une légère rotation de l'axe de l'endoscope entraîne une modification de l'angle de prise de vue qui modifie le positionnement relatif des structures les unes par rapport aux autres. L'information de profondeur est absente, donnant parfois l'illusion de structures en contact ou à proximité. Les techniques d'imagerie par résonance magnétique ou par ultrason donnent accès à des plans de coupe. L'observation de positions articulatoires dans le plan médio-sagittal, par exemple, ne permet pas de rendre compte de positionnements ou de mouvements latéraux de la langue.

L'électroglottographie, technique très employée pour mesurer le contact glottique, en est un autre exemple. Elle ne renseigne que sur les phénomènes glottiques en lien avec un contact. Cette technique ne permet pas d'approcher l'onde de débit acoustique, les caractéristiques d'ouverture glottique, le degré d'écartement des plis vocaux, la localisation de l'ouverture le long de l'axe glottique.

c. Des outils scientifiques en application clinique ?

Ces outils et techniques dont le chercheur dispose peuvent-ils s'appliquer dans un cadre clinique, dans la pratique orthophonique quotidienne ?

Il y a très certainement un intérêt à s'inspirer des approches développées dans le milieu scientifique pour effectuer des mesures objectives du comportement vocal d'un patient. Même si certains paradigmes expérimentaux nécessitent un équipement sophistiqué et coûteux, c'est le cas de l'IRM par exemple, de nombreux protocoles reposent sur des évaluations parfaitement réalisables en cabinet orthophonique. L'usage du logiciel Praat qui se répand de plus en plus dans la pratique orthophonique en est un bel exemple illustratif. Il permet à la fois de prendre les données et de les analyser. Corrélée à l'analyse perceptive de la voix du patient et à l'auto-évaluation de la qualité de voix, l'analyse acoustique apporte des éléments quantitatifs nécessaires à l'abord de la pathologie vocale. L'analyse de scènes vidéo permet de conserver une trace de l'évaluation du patient et d'évaluer à posteriori les gestes posturaux, respiratoires et articulatoires du patient.

Certains outils développés très récemment en recherche présentent un potentiel à court terme pour l'évaluation vocale en clinique. La dosimétrie ou accumulation vocale est une technique permettant d'étudier le comportement vocal en situation écologique. Différents types d'accumulateurs vocaux existent actuellement sur le marché. Ils consistent en des appareils portables qui mesurent la durée de

phonation, l'intensité et la fréquence fondamentale moyenne de la voix grâce à un accéléromètre fixé sur le larynx. Une étude s'est intéressée à quantifier la charge vocale au sein d'une population d'enseignants, reconnue comme étant des professionnels de la voix (Remacle, 2013). Plusieurs de ces appareils sont disponibles sur le marché mais actuellement leur prix reste élevé pour une utilisation en clinique. L'imagerie ultrasonore miniature se développe également et des sondes ultrasonores se connectant directement en USB sur ordinateur sont désormais accessibles aux cliniciens et chercheurs non médecins mais leur prix reste encore élevé (environ 5000 euros). L'imagerie ultrasonore pourrait permettre d'évaluer le serrage des articulateurs de la parole et fournir un outil intéressant de rétroaction visuelle pour travailler la position de la langue dans la parole et dans le chant.

3. Mise en pratique des outils dans les recherches actuelles sur les troubles de la voix et de la parole

a. Les questions de recherche

De nombreuses recherches s'intéressent aux troubles de la voix et de la parole. Récemment, un panorama des recherches en phonétique clinique a été présenté par Claire Pillot-Loiseau à l'occasion de la cinquième édition des Journées de Phonétique Clinique. Les thèmes de recherche abordés depuis dix ans portent de façon générale sur la dysphasie, la dyslexie, les dysarthries, les dysphonies, l'aphasie (Pillot-Loiseau, 2013). Les chercheurs étudient les différents troubles de la communication dans ses expressions parlées, chantées, chuchotées, les questions d'effort et de forçage vocal. Ils s'intéressent à l'impact sur la voix et la parole :

- 1) de modifications anatomiques ou physiologiques de l'appareil de production vocale : paralysies récurrentielles et immobilités cordales, laryngectomies et cordectomies, rhinolalie et fentes palatines ;
- 2) de perturbations dans la perception multimodale : implants cochléaires, auditeurs non voyants
- 3) de déficits cognitifs, de troubles sensori-moteurs et neurologiques : autisme et syndrome d'Asperger, schizophrénie, maladie d'Alzheimer, bégaiement, maladie de Parkinson, ...

Ils modélisent la physique du comportement, la physiologie du geste vocal, son impact phonétique.

Depuis plusieurs années à Grenoble, les chercheurs en parole se sont intéressés à modéliser le fonctionnement de l'appareil vocal normal (Henrich et Savariaux, 2012). Pour citer quelques exemples concrets et sans prétendre à une quelconque exhaustivité, ils modélisent le fonctionnement pathologique avec ajout de masses sur des modèles de cordes vocales (Pelorson et al., 2013), le rôle des bandes ventriculaires dans l'effort vocal et le cri (Bailly, 2009 ; Bailly et Henrich, 2010), ou le mouvement de la langue partiellement amputée (Buchillard et al., 2007). Ces études s'intéressent à simuler le fonctionnement perturbé des cavités glottiques et supra-glottiques afin d'offrir une meilleure compréhension des troubles de la phonation ou de l'articulation, et d'offrir ainsi de nouvelles possibilités thérapeutiques. Nombreuses sont les études actuelles sur la voix et la parole tournées vers l'application en clinique des résultats des travaux de recherche, que ces travaux soient réalisés *in vitro* (sur des maquettes reproduisant le comportement physique), *ex vivo* (sur larynx excisés) ou *in vivo* (sur l'humain). Les études sur l'humain s'appuient sur une évaluation stricte et reproductible du patient à risque de présenter des troubles de la voix ou présentant des troubles de la voix avérés .

Concernant l'usage de technologie de pointe, des chercheurs se sont servis des techniques d'imagerie échographique pour décrire des articulations spécifiques de certaines langues (Zeroual et al., 2011), les aspects statiques et dynamiques de la forme de la langue dans la parole et la déglutition (Stone, 2005) ou encore pour étudier la parole pathologique comme celle de patients glossectomisés (Bressmann et

al., 2007 ; Acher et al., *Clinical Linguistics and Phonetics*, accepté). Bernhardt et ses collègues (2003, 2005, 2008) ont utilisé l'échographie en 2D en rééducation chez des enfants présentant des déficiences auditives, des retards de parole, un bilinguisme de manière efficace. L'étude de 2008 de Bernhardt et al. démontre que les enfants ayant le moins de troubles articulatoires et les plus motivés pour faire ce type de rééducation ont eu besoin de moins de 3 heures de rééducation avec rétroaction visuelle pour avoir des bénéfices positifs. La rétroaction visuelle apportée par l'échographe a permis le développement des voyelles chez l'enfant malentendant d'après Bacsfalvi et al (2007).

Avec l'avènement des techniques d'imagerie fonctionnelle comme l'IRM fonctionnelle qui permettent de mettre en évidence l'activité cérébrale chez un locuteur grâce à la mesure des variations de son volume sanguin cérébral, des études de neurophonétique font leur apparition. Grâce à la connaissance des régions cérébrales impliquées dans le contrôle moteur de la voix et de la parole (voir Jurgens 2002 pour une revue, Grabski et al., 2012 ; Acher et al., *Revue Parole*, accepté), il est désormais possible de réaliser des recherches portant sur l'adaptation du contrôle moteur central après perturbation périphérique des organes phonatoires.

b. Comment se construit un protocole de recherche

Un protocole de recherche a pour but d'étudier une problématique innovante et ciblée. Le protocole doit répondre à une ou plusieurs questions de recherche formulées sous forme d'hypothèses.

Dans le cadre des protocoles utilisés dans le domaine de la voix, les protocoles les plus développés comportent un interrogatoire du sujet, l'observation de son comportement vocal, l'analyse perceptive de sa voix, une évaluation instrumentale poussée et la prise en compte de son ressenti vocal. Ces évaluations s'apparentent à celles effectuées en bilan orthophonique sur un seul locuteur. Ainsi, les protocoles de recherche, notamment en pathologie vocale, ne se développent pas au détriment de leur utilisation en bilan et rééducation orthophonique. A la différence d'un bilan orthophonique, le protocole de recherche a pour but de répondre à une question de recherche dont la réponse va pouvoir être généralisable à la population d'étude et plus largement si l'échantillon est suffisamment grand et homogène.

Le contenu du protocole va être déterminé en fonction des questions de recherche. C'est en particulier le cas pour le choix de la modalité de parole : lecture de texte, parole spontanée, voyelles tenues ou séquences syllabiques produites hors contexte ou insérées dans des phrases porteuses, ... Les paramètres à mesurer et les outils techniques correspondants seront également choisis préalablement. Même si certains de ces outils ne sont pas accessibles dans un cadre clinique de rééducation orthophonique, de nombreux protocoles reposent sur des évaluations écologiques parfaitement réalisables en cabinet orthophonique. Leur pertinence sera éventuellement testée dans une étude pilote de petite envergure.

La question de l'éthique de l'étude sera réfléchi en amont, car les recherches menées sur l'humain ne doivent pas porter atteinte à l'intégrité de l'individu. Selon le caractère plus ou moins invasif du protocole de recherche, il faudra éventuellement avoir recours à une demande d'avis auprès d'un comité d'éthique local (le Comité d'éthique pour les recherches non interventionnelles (CERNI) créé sur le site de Grenoble en 2010 en est un bon exemple), ou au dépôt d'une demande d'avis à un Comité de protection des personnes (CPP) qui est un acteur essentiel de l'encadrement de la recherche biomédicale. Il existe également des sites sur la toile qui répertorient les protocoles de recherche clinique sur des sujets humains (ClinicalTrials.gov par exemple, mis en place par l'Institut National de Santé américain).

c. L'analyse des données

Acquérir des données n'est qu'une étape d'un long processus qui englobe une réflexion sur la question de recherche et sa discussion à la lumière des expériences de recherche menées sur le terrain ou en laboratoire. L'analyse des données en est une autre, qu'il est souhaitable de mettre en place et de valider par une étude pilote avant même la prise de mesure sur les sujets.

La première étape de l'analyse des données porte sur la mise en forme des données brutes acquises. Il s'agit ainsi de faire une synthèse des résultats individuels obtenus pour chaque sujet, de transformer un nombre important de données brutes (des images en grand nombre, par exemple) en chiffres, en courbes, en contours, qui auront du sens par rapport à la question de recherche. L'aboutissement de cette étape est la mise en place d'un tableau de données et de figures descriptives. Différents logiciels de calcul sont à disposition pour ce faire, comme Praat ou Matlab.

La seconde étape de l'analyse des données s'intéresse à l'exploration statistique des hypothèses émises sur la question de recherche. Les tendances observées ont-elles un sens, ou sont-elles liées à la variabilité inhérente à toute expérience ? Peut-on confirmer les hypothèses formulées ou doit-on les rejeter ? L'analyse statistique des données est une étape de prise de recul sur la mesure, afin de faire ressortir ce qui est significatif de ce qui ne l'est pas. Différents logiciels sont là aussi à disposition pour conduire ces analyses de façon plus ou moins automatique : citons par exemple le logiciel R, ou SPSS. Néanmoins, l'outil statistique doit être maîtrisé ou utilisé en collaboration avec une personne compétente en statistique, car le choix des analyses statistiques menées n'est pas anodin : il doit être bien réfléchi en amont des expériences et requiert en soi une expertise indépendante de l'outil logiciel.

Conclusion

Les progrès technologiques et les avancées scientifiques permettent au chercheur qui s'intéresse à l'analyse de la voix dans ses diverses formes d'expressions (parole, chant, murmure, cri, ...) de disposer d'outils exploratoires de plus en plus évolués et maîtrisés. Certains des outils scientifiques d'aujourd'hui portent les germes des outils orthophoniques de demain. D'autres peuvent déjà s'appliquer dans un cadre clinique, de l'objectivation d'un comportement vocal dans le cadre d'un bilan de voix au suivi d'une rééducation de la voix, de la parole ou du chant.

La communication vocale humaine est un phénomène complexe, dont la compréhension appelle à une interaction et des collaborations fortes entre le milieu orthophonique et le milieu de la recherche scientifique. Le défi actuel est de développer une recherche clinique qui appuie sa base sur les connaissances acquises et les questionnements issus d'une pratique rééducative quotidienne, et qui se construit dans une approche scientifique rigoureuse et reproductible.

L'approche scientifique la plus rigoureuse en recherche sur la voix et la parole s'appuie sur un protocole qui met en correspondance des données acoustiques, articulatoires, comportementales, praxiques et de qualité de vie. La confrontation de ces différentes données permet d'envisager l'évaluation du patient dans son ensemble sans s'affranchir d'une approche la plus écologique possible.

Références bibliographiques

- Acher, A., Savariaux, C., Fougeron, C. et al. Speech production after glossectomy: Methodological aspects. *Clinical Linguistics and Phonetics* (accepté, disponible sur le web).
- Acher, A., Sato, M., Vilain, C. et al. Méthodologie en IRM fonctionnelle pour l'étude des activations corticales associées au réapprentissage de la parole. *Revue Parole* (accepté).
- Bacsfalvi, P., Bernhardt, B., Gick, B. (2007). Electropalatography and ultrasound in vowel remediation for adolescents with hearing impairment. *Advances in Speech-Language Pathology*, 9(1), 36-45.

- Baken, R.J. & Orlikoff, R.F. (1997). Voice measurement: is more better? *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 22(4), 147-151.
- Bernhardt, B., Bacsfalvi, P., Adler-Bock, M. et al. (2008). Ultrasound as visual feedback in speech habilitation: exploring consultative use in rural British Columbia, Canada. *Clinical Linguistics and Phonetics*, 22(2), 149-162.
- Bernhardt, B., Bacsfalvi, P., Gick, B. et al. (2005). Exploring the use of electropalatography and ultrasound in speech rehabilitation. *Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*, 29(4), 169-182.
- Bernhardt, B., Gick, B., Bacsfalvi, P. et al. (2005). Ultrasound in speech therapy with adolescents and adults. *Clinical Linguistics and Phonetics*, 19(6-7), 605-617.
- Bernhardt, B., Gick, B., Bacsfalvi, P. et al. (2003). Speech habilitation of hard of hearing adolescents using electropalatography and ultrasound as evaluated by trained listeners. *Clinical Linguistics and Phonetics*, 17(3), 199-216.
- Bielamowicz, S., Kreiman, J., Gerratt, B.R. et al. (1996). Comparison of voice analysis systems for perturbation measurement. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 39(1), 126.
- Bressmann, T., Ackloo, E., Heng, C.L. et al. (2007). Quantitative three-dimensional ultrasound imaging of partially resected tongues. *Otolaryngology Head & Neck Surgery*, 136(5), 799-805.
- Buchaillard S., Brix M., Perrier P. et al. (2007). Simulations of the consequences of tongue surgery on tongue mobility: Implications for speech production in post-surgery conditions. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 3(3), 252-261.
- Crevier-Buchman, L., Vincent, C. (2009). "Visualisation du larynx : endoscopie rigide et fibroscopie, stroboscopie et caméra haute vitesse", in A. Marchal & C. Cavé (Eds.), *Imagerie médicale pour l'étude de la parole*. Paris : Hermès-Lavoisier (Traité IC2, série cognition et TI), 43–63.
- Cornut, G. (2002). *Moyens d'investigation et pédagogie de la voix chantée*, Symétrie.
- Dejonckere, P., Obbens, C., De Moor, G.M. et al. (1993). Perceptual evaluation of dysphonia: Reliability and relevance. *Folia Phoniatrica*, 45, 76-83.
- Echternach, M., Sundberg, J., Arndt, S. et al. (2010). Vocal tract in female registers—A dynamic real-time MRI study. *Journal of Voice*, 24(2), 133-139.
- Fant G. (1960). *Acoustic theory of speech production*. Mouton, La Hague.
- Ghio, A. (2012). « Bilan instrumental de la dysphonie », in R. Garrel, B. Amy de la Bretèque, V. Brun (eds.), *La voix parlée et la voix chantée. (Echanges en réadaptation)*. Montpellier : Sauramps Médical, 69-104.
- Ghio, A., Pouchoulin, G., Crevier-Buchman, L. et al. (2010). Expériences et recommandations pour la structuration des données sonores, physiologiques et cliniques dans le cas de dysfonctionnements de la parole. In Actes, Journées d'Etude sur la Parole (p. 57-60). Mons, Belgique.
- Giovanni, A., Estublier, N., Robert, D. et al. (1995). Evaluation vocale objective des dysphonies par la mesure simultanée des paramètres acoustiques et aérodynamiques à l'aide de l'appareillage EVA. *Annales d'oto-laryngologie et de chirurgie cervico faciale*, 112, 85-90.
- Grabski, K., Lamalle, L., Vilain, C. et al. (2012). Functional MRI assessment of orofacial articulators: neural correlates of lip, jaw, larynx, and tongue movements. *Human Brain Mapping*, 33(10), 2306-21.
- Henrich N. (2012). Physiologie de la voix chantée: vibrations laryngées et adaptations phono-résonantielles, Entretiens de Médecine Physique et de réadaptation, Montpellier Mars 2012. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00680692>
- Henrich N., Savariaux C. (2012). Singing voice research at the Speech and Cognition Department, GIPSA -lab, Grenoble, France. *Psychomusicology: Music, Mind & Brain* 21 (1 & 2). <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00680693>
- Henrich, N., Bezard, P., Expert, R. et al. (2008). Towards a common terminology to describe voice quality in western lyrical singing: Contribution of a multidisciplinary research group. *Journal of interdisciplinary music studies*, 2(1&2), 71-93. http://www.musicstudies.org/Henrich_JIMS_0821205.html
- Henrich, N. (2001), Etude de la source glottique en voix parlée et chantée : modélisation et estimation, mesures acoustiques et électroglottographiques, perception. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00123133>
- Hirano, M. (1981). *Clinical examination of voice*. Springer Verlag, New York (1981), 81–84.
- Hueber T. (2013). Ultraspeech-player: Intuitive visualization of ultrasound articulatory data for speech therapy and pronunciation training, Proceedings of Interspeech (show&tell), Lyon, France, 2013, 752-753.
- Hueber, T. (2009). Reconstitution de la parole par imagerie ultrasonore et vidéo de l'appareil vocal : vers une communication parlée silencieuse. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6.
- Jacobson, B.H., Johson, A., Grywalski, C. et al. (1997). The voice handicap index (VHI): Development and validation. *American Journal of Speech Pathology*, 66-70.
- Jürgens, U. (2002). Neural pathways underlying vocal control. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 26(2), 235–258.

- Kreiman, J., Geratt, B.R., Kempster, G.B. et al. (1993). Perceptual evaluation of voice quality: review, tutorial, and a framework for future research. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36, 21–40.
- Morsomme, D., Gaspar, M., Jamart, J., et al. (2007). Adaptation du Voice Handicap Index à la voix chantée. *Revue de laryngologie, d'otologie et de rhinologie*, 128(5), 305-314.
- Pelorson, X., Van Hirtum, A., Wu, B. et al. (2013). Theoretical and experimental study of glottal geometry in phonation. 21st International Congress on Acoustics (ICA 2013) - 165th Meeting of the Acoustical Society of America, Montréal : Canada.
- Pettersen, V., Bjørkøy, K., Torp, H. et al. (2005). Neck and shoulder muscle activity and thorax movement in singing and speaking tasks with variation in vocal loudness and pitch. *Journal of Voice*, 19 (4), 623–634.
- Pillot-Loiseau C. (2013) Synthèse sur les recherches présentées aux Journées de Phonétique Clinique, JPhC5, Liège, Belgique, Octobre 2013.
- Pillot-Loiseau, C. (2011). Pression sous-glottique et débit oral d'air expiré comme aides à la pose du diagnostic de dysodie ; implications pour la rééducation vocale, in Entretiens de Bichat 2011; entretiens d'Orthophonie 2011, 32-45.
- Remacle, A. (2013) La charge vocale : De sa quantification à l'étude de son impact sur la fonction phonatoire et sur la qualité vocale. Thèse de Doctorat , Université de Liège, Belgique. <http://hdl.handle.net/2268/147560>
- Rinkel, R.N., Verdonck-de Leeuw, I.M., Van Reij, E.J. et al. (2008). Speech Handicap Index in patients with oral and pharyngeal cancer: better understanding of patients' complaints. *Head & Neck*, 30(7), 868-74.
- Rosen, C. A., Lee, A. S., Osborne, J., Zullo, T., & Murry, T. (2004). Development and Validation of the Voice Handicap Index-10. *The Laryngoscope*, 114(9), 1549-1556.
- Roublot, P. (2003). Analyse subjective et objective de la voix avant et après bloc interscalénique du plexus brachial - Implications pratiques dans la prise en charge post-opératoire des patients anesthésiés. Mémoire d'orthophonie, Nancy.
- Sarr, M., Ghio, A., Espesser, R. et al. (2011). Relevance of Aerodynamic Evaluation, in Parkinsonian Dysarthria. In Dushanova (ed.) *Diagnostics and Rehabilitation of Parkinson's Disease*, 207-224.
- Stone M. (2005). A Guide to Analyzing Tongue Motion from Ultrasound Images. *Clinical Linguistics and Phonetics*, 19(6-7), 455-502.
- Švec, J.G., & Schutte, H.K. (1996). Videokymography: high-speed line scanning of vocal fold vibration. *Journal of Voice*, 10(2), 201-205.
- Svec, J.G., & Granqvist, S. (2010). Guidelines for selecting microphones for human voice production research. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 19(4), 356.
- Ternström, S., Granqvist, S. (2010). Personal computers in the voice laboratory: Part two-audio devices. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 35(2), 98-102.
- Teston, B., Galindo, B. (1995). A diagnostic and rehabilitation aid workstation for speech and voice pathologies. *Proceedings of Eurospeech (ISCA) (4 : 1995 septembre 18-21 : Madrid)*. Madrid: International Speech Communication Association, 1883-1886.
- Teston, B. (1992). Un système d'évaluation objective de la dysphonie pour l'aide au diagnostic et à la rééducation fonctionnelle. Actes, Journées d'Etude sur la Parole (JEP) (19 : 1992 : Bruxelles, BELGIUM). Bruxelles: Société Française d'Acoustique (SFA), 457-462.
- Trollet-Cornut, A. (2002). « La dynamique diaphragmatique », *Moyens d'investigation et pédagogie de la voix chantée*, coordination de Guy Cornut, Symétrie, p. 1-7.
- Yamauchi, E. J., Imaizumi, S., Maruyama, H. et al. (2010). Perceptual evaluation of pathological voice quality: A comparative analysis between the RASATI and GRBASI scales. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 35(3), 121-128.
- Zeroual, C., Esling, J.H., Hoole, P. et al. (2011). Ultrasound study of Moroccan Arabic labiovelarization, ICPHS 17, Chine.
- Ziethé, A., Patel, R., Kunduk, M., Eysholdt, U. et al. (2011). Clinical analysis methods of voice disorders. *Current Bioinformatics*, 6(3), 270-285.

Produits commerciaux mentionnés

EGGs for singers : <http://www.eggsforsingers.eu>

Overtone Analyzer : <http://www.sygyt.com>

Praat : <http://www.fon.hum.uva.nl/praat>

WaveSurfer : <http://www.speech.kth.se/wavesurfer>

Tutoriel Praat

Gendrot, C. (2013) http://lpp.in2p3.fr/Equipe/cedric_gendrot/scripts.htm