

ACADEMIE DE PARIS  
UNIVERSITE PARIS VI PIERRE et MARIE CURIE  
MEMOIRE POUR LE CERTIFICAT DE CAPACITE D'ORTHOPHONISTE

La boucle audio-phonatoire, une compétence cognitive indispensable à la  
rééducation vocale par les orthophonistes

Année universitaire 2018-2019

Numéros d'anonymat 18 – 106

## La boucle audio-phonatoire, une compétence cognitive indispensable à la rééducation vocale par les orthophonistes

Mots-clés : boucle audio-phonatoire – orthophonie – rééducation vocale – production vocale – feedback auditif – spectrogramme

### Résumé :

La boucle audio-phonatoire, processus de rétrocontrôle de la voix, permet à l'émetteur d'un message vocal d'ajuster ses productions vocales à mesure de l'émission sonore. C'est une compétence cognitive qui se développe au cours du processus de maturation cérébrale, et qui permet de s'adapter au mieux à l'environnement sonore. Elle est une compétence indispensable dans tout échange, et donc pour tout professionnel de la communication, en particulier pour les orthophonistes.

Afin d'explorer le phénomène de boucle audio-phonatoire et de montrer son utilité pour les professionnels pratiquant la rééducation vocale, une revue de littérature a été réalisée. Pour effectuer nos recherches, nous avons interrogé différentes bases de données scientifiques : Google Scholar, PubMed, Science Direct, Cairn et Glossa, à l'aide des mots-clés précédemment cités. Nous avons sélectionné des articles en anglais et en français, qui pour la plupart datent de moins de dix ans. Nous avons rassemblé les articles qui nous ont semblé représentatifs des recherches récentes effectuées sur le sujet. Nous avons fait la synthèse de nos lectures, et douze articles scientifiques et chapitres de livres spécialisés sur la voix ont été exploités pour rédiger notre revue de littérature.

Si les recherches nous montrent que la boucle audio-phonatoire est un mécanisme neurologique indispensable dans tout échange vocal, ce phénomène a peu été étudié chez les professionnels responsables de la rééducation des troubles de la voix. C'est pourquoi il nous semble pertinent, par le biais d'une étude analytique expérimentale, d'explorer la boucle audio-phonatoire chez de futurs orthophonistes, futurs rééducateurs de la voix.

## Introduction

La boucle audio-phonatoire est un processus de rétrocontrôle ou feedback auditif de la voix, qui permet d'ajuster sa production vocale en temps réel. Elle constitue un mécanisme neurologique essentiel qui se développe au cours du processus de maturation cérébrale. Dans cette revue de littérature, nous nous sommes attachées, en faisant la synthèse des recherches récentes, à décrire le fonctionnement de cette compétence cognitive et l'utilité particulière qu'elle peut avoir pour tout professionnel de la voix, (enseignants, chanteurs, phoniâtres, professeurs de chant...), spécifiquement pour les orthophonistes pratiquant la rééducation vocale.

Dans l'acte de pleurer, rire, parler ou chanter, le sujet, quel que soit son âge, est à la fois émetteur et récepteur de son émission vocale. Nous nous intéressons donc, en premier lieu à la perception auditive, en décrivant le processus de maturation de l'audition, la notion de plasticité cérébrale, ainsi que les centres neuroanatomiques de détection de la voix et de la parole. En deuxième lieu, nous présentons succinctement les mécanismes physiologiques de l'appareil phonatoire ainsi que les propriétés acoustiques de la voix, en détaillant les centres neuroanatomiques de production de la voix et de la parole.

Nous nous attachons ensuite à décrire plus précisément le fonctionnement de la boucle audio-phonatoire, en expliquant les processus de rétrocontrôle de la voix et de la parole sur lesquels elle repose. La perception de notre propre voix donne lieu à des processus de feedback qui permettent d'ajuster ce que nous produisons. Nous illustrons notre propos par deux exemples opposés de l'utilisation de la boucle audio-phonatoire : chez les personnes atteintes de surdité et chez les chanteurs expérimentés.

Enfin, nous détaillons les principes et méthodes d'intervention de la rééducation orthophonique des troubles de la voix. La littérature met en évidence des compétences techniques, musicales et relationnelles nécessaires à l'exercice de la rééducation vocale (DeJonckere, 2016). Sur la base de nos recherches, nous avons mis en évidence un lien fort entre l'ensemble de ces méthodes et compétences de rééducation vocale et la nécessité de développer la compétence cognitive qu'est la boucle audio-phonatoire.

## 1. La voix humaine : de la perception auditive à l'émission sonore

### 1.1. Percevoir, entendre, ouïr, discriminer

#### 1.1.1. Fonctionnement global du système auditif périphérique et central

Le système auditif humain repose sur deux grands systèmes (Peterson et Hamel, 2018) :

- Le système périphérique, composé de l'oreille externe (pavillon et conduit auditif externe), de l'oreille moyenne (tympan, chaîne des osselets, cavités mastoïdiennes et trompe d'Eustache) et de l'oreille interne (canaux semi-circulaires et cochlée).
- Le système central, comprenant les aires cérébrales et un ensemble de noyaux sous-corticaux.

Le stimulus sonore se propage dans l'oreille externe, sous la forme d'ondes mécaniques, par l'intermédiaire du conduit auditif externe jusqu'au tympan, puis dans l'oreille moyenne jusqu'à la cochlée, où le signal devient électrique ; les informations fréquentielles du signal sonore sont traitées dans la cochlée, organisée selon une tonotopie : l'apex traitant les fréquences graves et la base, les fréquences aigües.

Le spectre de l'audition représente l'ensemble des fréquences sonores pouvant être perçues par l'oreille humaine. Il s'étend de 20 Hz à 20 kHz. Néanmoins, la perception auditive des sons peut varier d'une personne à l'autre, en fonction des traumatismes subis par le système auditif, ainsi qu'en fonction de l'âge, les sons aigus étant moins bien perçus par les personnes âgées (presbyacousie).

Le signal électrique est ensuite transporté jusqu'au cerveau par le nerf auditif, selon un circuit ascendant qui va de la cochlée jusqu'au cortex auditif, en passant par les noyaux du système auditif central. En parallèle de ce circuit ascendant, un circuit descendant, reposant sur un principe de rétrocontrôle, permet de moduler le traitement auditif (Peterson & al., 2018).

#### 1.1.2. Maturation de l'audition, au cours de la vie

##### 1.1.2.1. Ontogénèse des voies auditives, de la reconnaissance de la voix et du développement des centres cérébraux associés

L'audition fœtale se développe très progressivement au cours du dernier trimestre de la grossesse (Granier-Deferre et Busnel, 2011). A environ 25 semaines de gestation, la cochlée est fonctionnelle. A partir de 27-28 semaines, le fœtus commence à percevoir les

sons intra et extra-utérins mais l'oreille est encore immature ; il n'y a pas de codage fin du signal sonore et les seuils auditifs sont à 100dB. A partir de la 30<sup>ème</sup> semaine, le fœtus manifeste des réactions motrices (clignements de paupières, sursauts) et cardiaques en réponse aux stimuli sonores (Granier-Deferre et Busnel, 2011).

A partir de la 33<sup>ème</sup> semaine de grossesse, l'audition fœtale devient nettement plus élaborée, le seuil absolu est à 30dB. L'IRM fonctionnelle montre une activation du lobe temporal gauche (Jardri, Pins et al., 2008, cités par Granier-Deferre Busnel, 2011). La biomécanique cochléaire est quasiment mature (Morlet, Collet et al., 1993, cités par Granier-Deferre et Busnel, 2011).

La sensibilité fréquentielle évolue au cours de la gestation, allant des basses fréquences inférieures à 500Hz, à partir de la 20<sup>ème</sup> semaine jusqu' à 3 KHz à la 35<sup>ème</sup> semaine. Il a été démontré que le fœtus proche du terme est sensible aux différences de hauteurs et à des différences spectrales, presque instantanément (Granier-Deferre et Busnel, 2011).

Des études montrent également qu'il est capable de traiter des séquences auditives d'une durée de quelques secondes au moins et de percevoir les variations temporelles au sein de ces séquences (Granier-Deferre et Busnel, 2011). Les capacités à traiter ces variations dans le temps constituent des prérequis de la perception de stimulations auditives complexes, telles que la musique et la parole, d'où l'importance de ces études.

Les stimulations auditives intra utérines (particulièrement celles d'origine maternelle car non atténuées) peuvent être sources de développement et d'acquisitions perceptives qui favoriseront l'adaptation de l'enfant après la naissance, et constituer une base pour des apprentissages ultérieurs (Granier-Deferre et Busnel, 2011). En effet, il a été démontré que l'exposition répétée à un stimulus sonore pouvait engendrer un changement de la réactivité spontanée pré et postnatale à ce stimulus.

Dans les dernières semaines de gestation, le fœtus reçoit parfaitement la prosodie de la voix de sa mère, portée par les voyelles, dont il perçoit rythme et intonation. Les recherches menées ont étudié essentiellement les réactions cardiaques fœtales à la voix maternelle. Les techniques de conditionnement de la succion non nutritive ont permis de prouver la préférence du nouveau-né pour les bruits cardio-vasculaires intra-utérins (DeCasper et Sigafos, 1983, cités par Granier-Deferre et Busnel, 2011), et pour la voix de la mère par rapport à celle d'une autre femme (DeCasper, Sigafos et Fifer, 1980 ; Spence et DeCasper, 1987 ; Fifer et Moon, 1995 cités par Granier-Deferre et Busnel, 2011), la langue maternelle (Moon, Cooper et al., 1993 ; DeCasper, Prescott, 2009 cités par Granier-

Deferre et Busnel, 2011), et même les langues maternelles pour le cas des mères bilingues, par rapport à une autre langue (Byers-Heinlein, Burns et al., 2010 cités par Granier-Deferre et Busnel, 2011).

Ils manifestent qu'ils ont discriminé le timbre d'une voix et/ou la prosodie particulière d'une personne, et d'autre part, le contour mélodique et/ou des traits structuraux de la langue maternelle, indépendamment de la voix (Granier-Deferre et Busnel, 2011). Néanmoins, les nourrissons ne manifestent pas de préférence pour la voix de leur papa par rapport à celle d'un homme inconnu (DeCasper et Prescott, 1984 cités par Granier-Deferre et Busnel, 2011), certainement dû à la moindre exposition à la voix paternelle par rapport à la voix maternelle.

Toutes ces expériences amènent à penser que le fœtus possède déjà des aptitudes à discriminer et mémoriser les sons.

#### 1.1.2.2. Rôle de l'environnement sonore, notion de plasticité cérébrale

Le système auditif, par l'analyse du monde sonore, donne accès à la communication langagière et à l'apprentissage. La perception est influencée à la fois par des changements génétiquement programmés du système auditif et par l'expérience auditive.

Lors de la maturation des aires auditives cérébrales, le rôle de l'environnement sonore est non négligeable pour le bon développement fonctionnel de ce système auditif central.

Il faut donc souligner l'importance d'une stimulation acoustique précoce, adéquate et fréquente : le système auditif, obéissant au principe de la plasticité cérébrale, s'adapte aux stimuli.

La plasticité cérébrale désigne la réorganisation neuronale qui intervient dans le développement normal de l'être humain, mais également en cas de pathologie ou lésion cérébrale, pour lesquelles le cerveau a recours à des stratégies de compensation pour effectuer les fonctions cérébrales habituelles (Plaza, 2014).

Après la naissance, des études soulignent que les orientations du nouveau-né manifestent une préférence pour les stimulations auditives entendues in utero ; cependant la plasticité du système nerveux central est telle que ces préférences ne sont pas définitives : elles dépendent beaucoup de facteurs environnementaux et sont aussi le fruit d'une exposition à de nouvelles stimulations sensorielles (Granier-Deferre et Busnel, 2011), comme l'exposition précoce à la musique et aux langues étrangères.

### 1.1.3. Les sièges anatomiques cérébraux du traitement auditif

#### 1.1.3.1. Spécialisation hémisphérique

Le cortex cérébral est séparé en différentes zones qui sont le siège des différentes modalités (motrice, sensorielle, etc.). L'hémisphère gauche est classiquement identifié comme orchestrant les aspects cognitifs du langage, la reconnaissance des rythmes rapides et des fréquences (oreille absolue), alors que l'hémisphère droit gère plutôt les aspects temporels de longue durée, de l'information acoustique, à savoir la prosodie et certains aspects de la musique (mélodie, accord, intervalle). La latéralisation hémisphérique semble s'effectuer dès la deuxième année de la vie, l'hémisphère gauche étant plus activé lors de la discrimination des sons de parole, et le droit lors de l'écoute de sons musicaux (Plaza, 2014). Cette distinction fonctionnelle entre les hémisphères donne lieu à une asymétrie anatomique et histologique. Cela est toutefois à nuancer, car les fonctions plus élaborées sont dirigées par des aires associatives, connectées entre elles par des faisceaux de substance blanche et par le corps calleux.

L'audition est le fruit de la combinaison entre les informations traitées par l'hémisphère gauche, dirigeant l'oreille droite et celles traitées par l'hémisphère droit dirigeant l'oreille gauche : l'audition non pathologique est donc binaurale. La binauralité est d'ailleurs une caractéristique nécessaire pour localiser la source sonore.

#### 1.1.3.2. Perception de la voix

Le système auditif humain est particulièrement sensible à la voix humaine et ce, dès l'embryogenèse (Granier-Deferre et Busnel, 2011). Les recherches menées par Imagerie Fonctionnelle (IRMf) ont permis d'identifier des aires spécifiques de la perception vocale, au niveau du cortex temporal, les « Temporal Voice Areas » (TVA) (Aglieri, Chaminade, Takerkart et Belin, 2018). La grande activation de ces zones lors de stimuli vocaux confirme une préférence pour ces derniers, par rapport aux stimuli non vocaux. En réponse aux stimuli vocaux, l'IRMf montre d'ailleurs des zones d'activation bilatérale le long du gyrus temporal supérieur et du sulcus temporal supérieur, de façon antéro-postérieure (Aglieri et al., 2018). Ces TVA seraient plutôt localisées dans les régions antérieures et médiales du cortex temporal, alors que les régions postérieures seraient plutôt dédiées au traitement audio-visuel (Aglieri et al., 2018).

Le traitement de la voix appartient cependant à un réseau plus large. Des aires extra-temporales, telles que le cortex préfrontal, « frontal voice areas » ou « FVA »

(Aglieri et al., 2018) et des structures sous-corticales comme les amygdales, sont également sensibles à la voix. L'IRMf a par ailleurs montré une activation plus importante des FVA (surtout antérieures) ainsi que des TVA antérieures dans l'hémisphère gauche, hémisphère contrôlant les aspects cognitifs du langage (Aglieri et al., 2018). L'activation de ce large réseau laisse penser que la perception de la voix est étroitement liée aux autres perceptions sensorielles et émotionnelles.

#### 1.1.3.3. Discrimination de la parole et du langage

La parole est un ensemble de séquences auditives complexes, sujettes à des variations temporelles ; afin de discriminer des informations phonologiques, le cerveau doit traiter des variations temporelles très rapides ; pour les contours mélodiques et la prosodie, il doit en revanche traiter des variations temporelles assez lentes (Granier-Deferre et Busnel, 2011).

Chez l'adulte, la parole provoque une activation plus forte que les autres stimuli vocaux au niveau du lobe préfrontal (le dernier à atteindre sa maturation). Les aires frontales, surtout celles situées dans l'hémisphère gauche à prédominance langagière, sont d'ailleurs connues pour leur spécialisation dans le traitement linguistique (Aglieri et al., 2018), même si elles appartiennent à un réseau plus large de perception de la voix. Toujours dans l'hémisphère gauche, la partie orbitale du gyrus frontal inférieur serait responsable du traitement des informations à la fois sémantiques et émotionnelles d'un stimulus de parole (Aglieri et al., 2018).

La perception de la parole résulte donc du traitement d'informations complexes et multimodales, à la fois acoustiques, linguistiques, émotionnelles... Qui plus est, sa perception semble nécessiter une importante connectivité entre les aires auditives et motrices, qui elles, sont impliquées dans sa production (Selleck et Sataloff, 2014).

### 1.2. Émettre, parler, chanter

#### 1.2.1. Mise en place des organes phonatoires et production des sons

##### 1.2.1.1. Le développement du langage

Comme expliqué précédemment, le fœtus perçoit précocement les sons du langage. Il est sensible à la prosodie, à la voix, à la phonologie et à sa langue maternelle, tout particulièrement si celle-ci est accentuée par le « babytalk », langage particulier adressé au

bébé dont la prosodie et la voix sont modulées et les contours de parole accentués (Plaza, 2014). Les jeunes enfants disposent également d'aptitudes phonologiques : ils sont sensibles aux contrastes acoustiques entre les sons de toutes les langues. Puis, à partir du 6<sup>ème</sup> mois, le bébé se spécialise dans sa langue maternelle et perd cette faculté discriminatoire des sons qui ne font pas partie de sa langue maternelle (Plaza, 2014).

Grâce à la prosodie et aux indices phonémiques, l'enfant apprend à discriminer les mots et à discerner leur frontière. Mais à 12 mois, la découverte du sens des mots mettra temporairement la phonologie segmentale au second plan. Le développement lexical, lui, ne peut s'acquérir que par mémorisation (Plaza, 2014). A partir de 18-20 mois, l'enfant comprend une vingtaine de mots. Il existe un décalage entre la compréhension et l'expression langagière (cette dernière débutant 5 mois plus tard), décalage qui laisse penser que la compréhension et la production lexicales impliquent des mécanismes cognitifs et des systèmes neuronaux en partie différents.

D'autre part, pour parler, l'enfant doit maîtriser son appareil vocal (Plaza, 2014), c'est à dire les mouvements et la coordination de tous les organes phonatoires : les lèvres, la langue, le voile du palais, la luette, la glotte, le larynx, mais également de nombreux muscles. Parler implique également une simultanéité et une synchronisation de la respiration et de la mise en vibration des cordes vocales. A sa naissance, l'enfant ne possède pas encore des organes phonatoires matures et optimaux au développement de la parole. Son conduit vocal est encore physiologiquement inapte. Néanmoins dès les premiers mois, le bébé va subir des changements physiques qui vont lui permettre de développer la production de sons. Jusqu'à deux mois, le bébé produit uniquement des vocalisations quasi réflexes (pleurs, sons végétatifs) (Plaza, 2014). Puis entre 2 et 4 mois il produit des sons prévocaux. Entre 4 et 8 mois, apparaît la première production langagière, le babillage (Plaza, 2014) composé de quasi voyelles, de clics, de pré-consonnes palatales, arrondies, puis de syllabes complètes et bien formées. L'ordre d'acquisition des phonèmes produits au cours du babillage n'est pas hasardeux, il correspond à leur degré de difficulté articulaire (Plaza, 2014). Les premiers mots apparaissent entre le 11<sup>ème</sup> et le 14<sup>ème</sup> mois. Leur vocabulaire augmente sensiblement entre 16 et 20 mois. Vers la fin de la deuxième année se produit « l'explosion lexicale » : l'enfant énonce entre quatre et dix nouveaux mots par jour (Plaza, 2014). Vers 20 – 24 mois apparaît le langage combinatoire. A partir de 30 mois environ, la plupart des énoncés sont correctement ordonnés.

### 1.2.1.2. Neurones miroirs et imitation

Quand des activités langagières sont produites, mais également perçues, les neurones miroirs déchargent des potentiels d'action. Les neurones miroirs seraient une catégorie de neurones du cerveau, situées dans le cortex prémoteur et qui permettent l'imitation, en miroir, de ce qui est observé. Le développement du langage chez l'enfant est donc tributaire des interactions avec son entourage : c'est parce qu'on interagit avec lui, qu'on lui parle, que le bébé développe des compétences d'imitation, rendues possibles par l'activation de ces neurones miroirs (Plaza, 2014).

### 1.2.2. Lien entre perception auditive et production sonore

Nous entendons notre propre voix par le biais de deux types de conduction (Cornut, 2009) :

- la conduction aérienne : le son émis revient à l'oreille par l'intermédiaire du conduit auditif
- la conduction osseuse : les os du crâne vibrent à la réception des vibrations de l'air et transmettent directement ces vibrations à la cochlée

Cette double modalité explique que nous ayons une perception subjective de notre propre voix, différente de ce qu'entendent les autres personnes, réceptrices de notre voix qu'elles entendent uniquement par le biais de la conduction aérienne. C'est ce qui explique aussi pourquoi nous ne reconnaissons pas notre voix enregistrée et que nous avons du mal à l'apprécier.

La production sonore en voix parlée ou chantée est fonction de la manière dont l'oreille est plus ou moins sensible aux caractéristiques acoustiques (intensité, fréquence fondamentale, harmoniques...) des vibrations sonores perçues, dont on a vu, au chapitre précédent, la variation en fonction de l'âge.

Le spectre vocal représente toutes les fréquences possiblement produites par la voix humaine. Il s'étend de 60 Hz à environ 1200 Hz. Le spectre varie d'une personne à l'autre, en fonction de l'âge et du sexe, du fait notamment que les cordes vocales des enfants et des femmes sont plus courtes que celles des hommes (phénomène de la mue).

### 1.2.3. Les sièges anatomiques cérébraux de l'émission sonore et langagière

La production de la parole suppose l'intégration de différents types d'informations : auditive, somato-sensorielle et motrice. Ces informations sont traitées dans les lobes temporaux (avec notamment l'aire de Wernicke, spécialisée dans la compréhension du

langage), pariétaux (qui comprend l'aire de Broca dédiée à la compréhension) et frontal. Le processus qui a lieu avant la production en elle-même suppose d'élaborer une idée, ensuite de trouver un mot adapté et d'émettre des sons pour former des mots. L'articulation est ensuite rendue possible par l'utilisation d'un chemin moteur entre le cervelet, la voie pyramidale et la voie extrapyramidale. Ces structures convergent dans le bulbe rachidien qui contrôle les muscles impliqués dans la production de la parole (Selleck & al., 2014).

Perception auditive et émission sonore sont étroitement liées : on trouve des structures neuroanatomiques impliquées à la fois dans la perception et dans la production, parmi lesquelles le gyrus précentral, ou encore une partie des ganglions de la base.

#### 1.2.4. Physiologie de l'organe phonatoire : réglage pneumo-phono-résonantiel

L'énergie nécessaire à la production vocale est fournie par la soufflerie pulmonaire. L'acte respiratoire s'effectue en deux temps. Le premier, l'inspiration, nécessite une pression à l'intérieur du poumon, inférieure à la pression atmosphérique. L'air pénètre en passant par le nez, la bouche, le larynx, la trachée et les bronches vers les alvéoles pulmonaires (Cornut, 2009). La cage thoracique s'agrandit, les poumons se dilatent. Le deuxième temps, l'expiration, a lieu lorsque la pression pulmonaire de l'air devient supérieure à la pression atmosphérique. L'air sort alors en effectuant le chemin inverse, des poumons vers le nez et à la bouche. Le diaphragme représente la principale force musculaire inspiratoire (Cornut, 2009). En se contractant il abaisse ses deux coupes et dilate les six dernières côtes, agrandissant le diamètre du thorax. Lorsqu'une pression expiratoire plus élevée est nécessaire, les muscles expirateurs interviennent.

Le larynx, abritant les cordes vocales, constitue l'organe principal de la phonation. Ses muscles modulent le son. Lors de la phonation, les cordes vocales s'accrochent, bloquant le passage de l'air expiratoire. La pression sous-glottique augmente, jusqu'à ce que les cordes vocales s'écartent un peu et laissent passer une petite quantité d'air : un « puff » d'air (Cornut, 2009). C'est la vibration des cordes vocales. Le son produit est appelé le son laryngé. Les cordes vocales s'ouvrent et se referment des centaines de fois par seconde.

Le pharynx, la cavité buccale, le larynx et les fosses nasales constituent les résonateurs de l'acte phonatoire. Ce sont la forme et la taille de ces résonateurs qui vont définir la particularité du timbre. Ce dernier dépend également du positionnement de la langue, de l'aperture buccale, et de toutes les modulations que nous pouvons effectuer avec

les organes phonateurs (lèvres, voile du palais, etc.). Le son produit est articulé grâce à la modulation de la langue, des lèvres, et du voile du palais.

#### 1.2.5. Propriétés acoustiques de la voix

La voix obéit à un ensemble de paramètres acoustiques (Cornut, 2009). Parmi eux, l'intensité vocale désigne le volume sonore, plus ou moins élevé, des émissions vocales. Celui-ci varie beaucoup lorsque nous émettons de la voix, parlée ou chantée. L'intensité s'exprime en décibels SPL (dB SPL).

Un autre paramètre acoustique est la hauteur, correspondant à la sensation grave ou aigue du son, dépendant de la fréquence, c'est-à-dire le nombre de vibration par seconde de l'onde sonore. Le « Fondamental usuel de la parole » (ou F0) en voix parlée désigne la hauteur tonale, sorte de « mélodie » de la voix émise. C'est la hauteur moyenne produite lorsque nous parlons, différente en fonction de chaque émetteur, et assez distincte selon que cet émetteur est une femme, un homme ou un enfant. Ce « fondamental usuel de la parole » s'exprime en Hertz (Hz). En voix chantée, la fréquence fondamentale (F0) est la hauteur à laquelle est produite la mélodie.

L'étendue vocale désigne l'ensemble des notes de musique qui peuvent être produites par un émetteur, en voix chantée, selon 4 mécanismes sifflet, mécanisme I (léger); mécanisme 2 (lourd), fry (Cornut, 2009).

La voix est un son complexe, composé de la fréquence fondamentale et des harmoniques, multiples de cette fréquence fondamentale et variables en fonction de l'espace de résonance.

De la transformation et du modelage du son laryngé résulte le timbre vocal, plus ou moins clair. On distingue deux types de timbre. Le timbre vocalique dépend des différentes voyelles d'une langue : il représente les traits acoustiques propres aux voyelles et donc communs à chaque locuteur d'une même langue.

Le timbre extra-vocalique, lui, varie en fonction de chaque émetteur et l'altération de ce timbre extra-vocalique peut être évaluée de façon perceptive, au moyen entre autres de l'échelle GRBAS créée par Hirano en 1981. La composante G (Grade) désigne la gravité de l'altération du timbre, le R (Roughness) le niveau de raucité de la voix, le B (Breathiness) la présence de souffle dans la voix, le A (Asthenia) l'asthénie (faiblesse vocale) et le S (Strain) indique le niveau de forçage, à savoir le ressenti d'un effort vocal inadapté (Cornut, 2009).

On distingue trois façons d'attaquer un son :

- l'attaque dure ou en coup de glotte correspond à une fermeture brutale de l'espace glottique avant la poussée expiratoire, provoquant un écartement brusque des plis vocaux
- l'attaque soufflée correspond à une fuite d'air avant que les cordes vocales ne s'accolent complètement. Elle s'accompagne d'un bruit d'écoulement d'air
- l'attaque douce (ou ajustée) au cours de laquelle le mouvement de fermeture glottique et la poussée expiratoire sont parfaitement synchrones

L'altération d'un ou plusieurs des paramètres acoustiques décrits supra est le signe d'une dysphonie dysfonctionnelle due à une mauvaise utilisation de la voix.

#### 1.2.6. Articulations et phonèmes

Le tableau de classification des consonnes identifie des consonnes non voisées (sourdes) et des consonnes voisées (sonores) qui mettent en œuvre une vibration des plis vocaux contenus dans le larynx (Cornut, 2009).

Chaque voyelle peut être identifiée acoustiquement par la présence de trois formants (qui sont des pics de résonance) : le premier formant, F1, désigne l'aperture (ouverture de la cavité buccale), F2 désigne la position (plus ou moins antérieure) de la langue dans la bouche et F3 désigne l'arrondissement des lèvres. Ainsi, le [i], voyelle antérieure (F2 élevé), semble plus aigu que le [ou], voyelle postérieure (F2 bas) (Cornut, 2009). L'ensemble de ces formants permet de dessiner un triangle vocalique. Il faut noter que l'espace vocalique est divisé différemment en fonction des langues.

Toute production vocale langagière nécessite donc une excellente coordination des mouvements phonatoires et articulatoires et la discrimination des différentes fréquences harmoniques.

## 2. La boucle audio-phonatoire, un feedback auditif indispensable pour ajuster ses propres productions vocales

### 2.1. Définition de la boucle audio-phonatoire ou effet Lombard

Lorsque nous parlons, nous effectuons inconsciemment un rétrocontrôle de notre voix, de son intensité, de notre débit, de notre prosodie, et plus généralement de toutes les

propriétés de notre production vocale, afin de les ajuster au mieux en fonction des variations des conditions de parole. C'est la boucle audio-phonatoire.

La boucle audio-phonatoire est « un processus de rétrocontrôle et d'ajustement en temps réel de la voix, utilisé pour maintenir une fréquence fondamentale donnée dans la voix parlée et chantée, au fur et à mesure des variations des conductions de parole » (Ernst, Klein-Dallant, 2016).

Cette boucle de régulation met en œuvre 4 étapes (Ernst, Klein-Dallant, 2016) :

- la perception du signal acoustique par la cochlée
- la transmission de ce signal au cerveau
- la comparaison entre ce qui a été produit et ce qui était attendu
- la mise en place des organes phonateurs et des muscles de l'articulation afin d'apporter une éventuelle correction en fonction de la qualité tonale et vocale que le sujet souhaite produire.

## 2.2. Ontogénie de la boucle audio-phonatoire.

Des tests comportementaux chez de jeunes enfants ont permis d'établir que la boucle audio-phonatoire se met en place à partir de 4 ans.

Avant cet âge, l'enfant fait face à une instabilité, concomitante de la baisse du larynx, et est plus sensible à la prononciation des personnes qui l'entourent qu'à sa propre production.

## 2.3. Auto-perception et production vocale : feedback auditif et contrôle feedforward

La production de la parole s'appuie sur deux types de contrôle auditif qui sont nécessaires au bon fonctionnement de la boucle audio-phonatoire : le rétrocontrôle, ou feedback auditif, et le système de commande prédictive, aussi appelé contrôle feedforward (Selleck et Sataloff, 2014).

Le feedback auditif intervient à partir des informations sensorielles reçues par le cerveau : il permet un ajustement en temps réel (au cours de la phonation) de la voix. Il permet l'ajustement des articulateurs s'il y a une déviation par rapport à ce qui était attendu dans la production.

Le contrôle feedforward, lui, s'appuie sur des commandes apprises précédemment : c'est ce qui permet d'éviter l'erreur de production, car les éventuelles déviations par rapport à ce qui est attendu dans la parole sont anticipées et évitées avant la phonation. Il

n'y a pas de correction de la parole produite en temps réel, comme c'est le cas avec le feedback auditif. La parole fluente étant rapide (4 à 7 syllabes par seconde), il serait difficile de toujours utiliser le feedback auditif, car l'ajustement des articulateurs à mesure de la phonation prendrait trop de temps : c'est là que le contrôle feedforward intervient. Il utilise des modèles internes (ensemble d'apprentissages dus aux feedbacks auditifs précédents) afin de contrôler la vitesse de la voix et de la parole, sans dépendre du feedback auditif en temps réel (Selleck et Sataloff, 2014).

Le contrôle articuloire effectué par un feedback auditif qui ne détecte pas d'erreur suscite en particulier une forte activation du cortex frontal gauche, classiquement associé à la production de la parole. Cependant, lorsqu'il y a une déviation de l'émission sonore (par rapport à ce qui était attendu), des cellules auditives dites d'erreur sont activées. Ces dernières arbitrent le contrôle de la phonation par feedback auditif et se situent dans la partie postérieure du gyrus temporal supérieur. Elles effectuent des projections sur des cellules motrices situées dans le cortex frontal droit. Quand une erreur est produite, ce sont donc les régions frontales droites et le cortex frontal inférieur qui sont activés.

Les commandes de feedback et de feedforward auditifs se situent dans le cortex moteur primaire, pour permettre de fournir des commandes musculaires aux articulateurs de la parole. Ces types de contrôle sont tous deux très importants pour développer et maintenir une bonne production vocale. La boucle audio-phonatoire permet en effet de réguler les « erreurs » éventuelle de phonation.

#### 2.4. Quand la boucle audio-phonatoire est altérée : l'exemple des surdités (ou par masquage artificiel de fréquences)

Lorsque la boucle audio-phonatoire est altérée, le sujet ne perçoit pas, ou mal, ce qu'il produit. N'ayant pas conscience des caractéristiques de sa production vocale, il ne peut pas effectuer d'ajustement de son émission pour s'adapter aux conditions de parole.

Ce phénomène de boucle audio-phonatoire perturbée est bien connu chez les personnes souffrant de surdité. La personne sourde ou malentendante perçoit les caractéristiques de la voix de façon très dégradée. Sa perte auditive la prive de la finesse et de la précision des paramètres acoustiques cruciaux tels que la hauteur, l'intensité ou encore le timbre. Ces paramètres sont alors perçus de façon dégradée et l'ajustement vocal, d'ordinaire permis par le feedback auditif, est erroné (Ernst, 2016). Par conséquent, la voix du sujet malentendant se déforme pour correspondre aux paramètres qui sont perçus par l'oreille.

Nous retrouvons ce phénomène de déformation de la production vocale lorsque, confrontés à un environnement sonore bruyant, nous nous mettons spontanément et inconsciemment à parler plus fort pour combler l'environnement bruyant, et ce afin d'être compris par notre interlocuteur. C'est l'effet Lombard, publié en 1910, lors d'une communication à l'Académie de médecine par le Dr Lombard, ORL français, rapportant le signe de l'élévation de la voix chez les sourds, cité par Selleck et Sataloff (2014).

Lorsque la boucle audio-phonatoire est abolie, plusieurs paramètres vocaux sont perturbés (Ernst, 2016) :

- Le contrôle de l'intensité de la production vocale est altéré. Le sujet parle trop fort.
- La fréquence fondamentale de sa voix monte dans les aigus
- Le timbre n'est pas adapté, la nasalité est trop forte. La voix peut alors être sourde, criarde, serrée...
- La prosodie est modifiée

Les paramètres articulatoires peuvent également être bouleversés et entraîner :

- Une ambiguïté dans la distinction entre occlusives sourdes et sonores
- Une perturbation de la durée des voyelles
- Une imprécision des lieux articulatoires

#### 2.4. Quand la boucle audio-phonatoire est renforcée : exemple du chanteur

A l'inverse, nous nous intéressons ici aux compétences auditives supérieures développées par les chanteurs (Selleck et Sataloff., 2014). Des études ont mis en évidence un lien entre compétences auditives supérieures et justesse de la production vocale. En effet, les chanteurs chevronnés ont un meilleur contrôle de leur hauteur tonale lorsqu'ils chantent que les chanteurs amateurs (Selleck et Sataloff, 2014). Leur performance vocale est globalement supérieure à celle de ces derniers, même dans le cas de masquage, qui interfère pourtant avec le feedback auditif.

Lors des concerts, les chanteurs doivent passer au-dessus de l'orchestre afin d'être entendus. Pour cela, en développant leur technique vocale, ils apprennent à maîtriser ce qui a été appelé le formant du chanteur (Cornut, 2009), qui se situe aux alentours de 3000 Hz. Ce « singing formant » n'est pas un formant à proprement parler, car il n'est pas caractéristique d'une voyelle en particulier mais se retrouve dans toutes les voyelles : il résulte plutôt d'une réelle maîtrise de la position du larynx et de la vibration laryngée. C'est ce « formant du chanteur » qui permet d'être entendu au-dessus de l'orchestre.

Le contrôle de la fréquence fondamentale (ou F0) dépend à la fois du feedback auditif et de modèles internes : ce sont des apprentissages déjà assimilés grâce aux rétrocontrôles auditifs précédents, et nécessaires au contrôle feedforward (Selleck et Sataloff, 2014). Les chanteurs s'appuient davantage sur ce contrôle feedforward, ce qui pourrait expliquer leur performance plus élevée, même lors du masquage de leur feedback auditif. (Selleck et Sataloff, 2014). Ce dernier est effectivement sujet à des perturbations, notamment quand on change d'environnement acoustique. Les chanteurs sont plus aptes à ignorer un changement introduit dans leur feedback auditif, signe qu'ils ne s'appuient pas uniquement sur celui-ci, mais également sur une forme de feedback kinesthésique, proprioceptif. Ce type de feedback joue un rôle essentiel dans le contrôle de la hauteur tonale, ce qui pourrait expliquer les performances supérieures des chanteurs aux tâches de contrôle de la hauteur tonale (Selleck et Sataloff., 2014).

Les chanteurs s'appuient donc particulièrement sur la boucle audio-phonatoire, dont le rôle est d'autant plus important que la technicité vocale est importante. Du fait de la connaissance qu'ils ont de leurs sensations proprioceptives au niveau de la cavité buccale, (langue, lèvres, mâchoire.), ils ont recours à un système de rétrocontrôles qu'il serait sans doute plus juste de qualifier de « boucle audio-proprio-phonatoire » (Ormezzano, 2000).

### 3. En quoi ce mécanisme doit-il être effectif chez un(e) orthophoniste pratiquant la rééducation vocale ?

#### 3.1. Les compétences techniques requises en rééducation vocale

Dans son rôle de rééducateur des troubles de la voix, l'orthophoniste doit être en mesure d'imiter les productions sonores et gestuelles de son patient, afin de lui faire prendre conscience des mauvaises habitudes vocales qu'il a mis en place ; il doit également être en mesure de lui proposer de bons exemples vocaux afin de le guider dans l'adoption d'un geste vocal efficace.

Pour ce faire, le thérapeute doit nécessairement posséder une boucle audio-phonatoire efficace. En effet, lorsque le thérapeute imite le patient, il fait appel à sa boucle audio-phonatoire, en adaptant au fur et à mesure de son imitation, les paramètres vocaux qu'il doit reproduire le plus fidèlement possible. De même, lorsque l'orthophoniste montre le bon exemple vocal à son patient, il effectue continuellement un rétrocontrôle de sa

propre production afin de l'ajuster et ainsi de se rapprocher le plus possible de ce qui pourrait être le geste vocal parfait.

Bénéficier d'une boucle audio-phonatoire efficace nécessite de posséder des organes phonatoires et auditifs parfaitement fonctionnels. L'annexe n°4 du bulletin officiel n°32 du 5 septembre 2013, concernant l'évaluation des aptitudes aux études en vue du certificat de capacité d'orthophoniste, stipule d'ailleurs que « les aptitudes sensorielles et motrices permettant l'acquisition des compétences professionnelles propres aux orthophonistes sont évaluées par des examens appropriés. » Elles sont donc testées lors des épreuves du concours d'orthophonie et certaines écoles réclament également un audiogramme et un examen des cordes vocales.

D'autre part, la boucle audio-phonatoire est mise à l'épreuve à l'oral dans plusieurs villes lors d'exercices d'écoute et de restitution : rétention d'empans de chiffres, de lettres, de phrases, répétitions de logatomes, etc. Ces exercices visent à juger de la capacité des candidats à écouter, retenir et restituer des informations, autant d'aptitudes qui lui permettront plus tard de dispenser une rééducation vocale efficace

### 3.2. Le feedback ou rétrocontrôle au service de la rééducation vocale

La rééducation vocale repose sur la prise en charge de trois fonctions : la respiration, la phonation et la résonance (Remacle et Morsomme, 2015). C'est la coordination et l'équilibration de ces trois fonctions, que l'on appelle réglage pneumo-phono-résonantiel (Ormezzano, 2000), qui permettent d'effectuer une production vocale correcte.

Mais lorsque l'une de ces fonctions n'est pas optimale, un déséquilibre se produit. Le sujet prend l'habitude d'adopter un mauvais comportement vocal, cause de dysphonie. Le rôle de l'orthophoniste est de faire prendre conscience au patient des gestes inadaptés que ce dernier effectue au quotidien et de le guider dans l'adoption d'un geste efficace et approprié. Pour que cette prise de conscience soit optimale, l'orthophoniste évalue l'acte de phonation de son patient par des mesures subjectives et objectives (Remacle et Morsomme, 2015), à l'aide desquelles il pourra le guider dans la production du geste vocal adapté.

Les mesures subjectives concernent toutes les prises de conscience et les retours que le thérapeute va percevoir et analyser chez son patient grâce au feedback somatosensoriel et auditif (Remacle et Morsomme, 2015). En écoutant et en observant la

production vocale de son patient, le professionnel de la voix est capable de percevoir auditivement les aspérités de la voix, de les coder en grade GRBASI, d'analyser visuellement le mauvais comportement vocal par l'observation de la posture, de la respiration, des muscles de la sphère ORL, (ceinture scapulaire, nuque, mâchoire, langue) et d'en déduire d'où vient le problème. Il doit alors faire un retour à son patient et effectuer une restitution par explication verbale et par imitation vocale et gestuelle. Il peut par exemple mimer l'écroulement sternal, l'hyperextension cervicale, l'hypertonie maxillaire, ou encore l'hypertonie de la base de la langue.

Dans ce contexte précis, la boucle audio-phonatoire est indispensable : le thérapeute tente d'effectuer une représentation le plus fidèle possible de la production de son patient. Il ajuste alors au fil de son imitation vocale les paramètres qui lui semblent ne pas encore correspondre parfaitement à la prestation de son patient, afin que son imitation soit le plus fidèle possible.

Ce retour vocal, gestuel et cognitif effectué, le rééducateur propose un travail de réapprentissage du comportement vocal, qui s'appuie en grande partie sur la boucle audio-phonatoire et plus généralement le feedback somatosensoriel et le feedback auditif (Remacle et Morsomme, 2015). Ainsi, le patient va-t-il, au fil de la rééducation, sans arrêt, effectuer un rétrocontrôle auditif, visuel et sensitif de sa production vocale, ce qui signifie que le patient devra, à chaque instant, être à l'affût de ses sensations physiques et de la perception auditive de son geste vocal.

Des outils de mesure objective peuvent venir étayer ce travail en s'appuyant sur un concept très prometteur : le biofeedback (Remacle et Morsomme, 2015). « Le biofeedback repose sur l'utilisation d'instruments qui mesurent une activité physiologique et qui renvoient des informations en temps réel à l'utilisateur. Le retour de l'information peut être visuel (par ex. un flash lumineux, un code couleur, une image, un schéma), auditif (par ex. un signal sonore), tactile (sous la forme d'une alerte par vibrations), ou encore une combinaison de ces modalités sensorielles. A terme, l'objectif est d'automatiser le changement apporté tout en se libérant progressivement du biofeedback. » (Remacle et Morsomme, 2015).

Ainsi, parce qu'il permet de fournir au patient des informations objectives sur le mauvais comportement vocal du patient, le biofeedback aide à la prise de conscience des imperfections de la production phonatoire et par conséquent au changement de comportement vocal.

### 3.3. Feed-back audio-visuel : le spectrogramme, un outil pour renforcer la boucle audio-phonatoire

Lorsque la boucle audio-phonatoire est défaillante et qu'elle ne permet pas un ajustement spontané de notre production vocale, nous pouvons avoir recours à un outil très utile : le spectrogramme.

Le spectrogramme traduit en temps réel les sons captés par un micro en une image matérielle et permet donc de visualiser le voisement du son, sa fréquence et de schématiser la présence éventuelle de bruits (souffle, raucité, bruit d'impulsion ou de friction) (Parmentier, Klein-Dallant, 2016).

Le logiciel VoceVista développé par D.Miller est un exemple d'application développé pour permettre à l'utilisateur de visualiser en temps réel sa fréquence fondamentale, son intensité, et son spectrogramme (DeJonckere, 2016).

Ainsi, parce qu'il retranscrit visuellement les caractéristiques du son émis, comme notamment le timbre et l'attaque (Parmentier, Marié-Bailly et Pillot-Loiseau, 2015), le spectrogramme renvoie au patient une image concrète et objective de sa propre voix et lui permet d'établir des liens de corrélation entre le geste vocal, les sensations internes et le résultat acoustique (Parmentier et al., 2015).

Grâce à l'utilisation du spectrogramme en rééducation vocale, le patient a une meilleure prise de conscience des composantes acoustiques de la voix (intensité, hauteur, attaque, clarté, richesse du timbre et geste vocal) (Parmentier et al., 2015), et en conséquence un meilleur contrôle de sa propre production vocale.

### 3.4. Proposer des exemples vocaux ajustés aux patients : activation des neurones-miroirs

L'orthophoniste qui pratique la rééducation vocale est avant tout pédagogue vocal et est là pour guider les patients dysphoniques qui sont face à lui. Comme tout pédagogue, il doit certes posséder des compétences techniques, et dans son cas, afin de pratiquer la rééducation vocale, des compétences vocales et musicales (DeJonckere, 2016).

Il ne faut cependant pas oublier que la rééducation est un échange, dans lequel le rééducateur est à la fois émetteur et récepteur : il écoute, sur la base de ses capacités perceptives, et propose aussi des exemples vocaux adaptés aux patients. Lorsqu'il propose ces exemples vocaux, l'orthophoniste s'appuie sur sa boucle audio-phonatoire : il a un feedback de ses propres productions, et ce feedback multimodal (auditif, proprioceptif) va lui permettre de constituer des exemples ajustés pour ses patients.

La boucle audio-phonatoire est donc une compétence cognitive qui doit être renforcée chez le rééducateur. En effet, dans ce schéma de communication d'égal à égal, les patients dysphoniques sont également émetteurs et récepteurs : lorsqu'ils entendent et reproduisent les exemples vocaux, leurs neurones miroirs vont s'activer. La rééducation, vocale en particulier, se construit à deux, dans l'échange.

On peut établir un parallèle entre cet échange et celui qui s'opère dès les premiers instants de la vie entre une mère et son enfant, car tous deux reposent sur le même procédé d'imitation, par activation des neurones miroirs. C'est dans cet échange interactif que peut s'opérer l'apprentissage par imitation (Plaza, 2014).

### 3.5. La boucle audio-phonatoire au service d'une bonne qualité relationnelle

L'échange qui se met en place lors de la rééducation permet notamment de guider les patients, et cela ne peut se faire sans une manifestation d'encouragement, de bienveillance de la part du thérapeute (Lux et Ducroux-Biass, 2011). La voix, très liée aux émotions (Cornut, 2009) est une mise à nu de l'individu dans son intégralité, et face à son patient qui se dévoile, le rééducateur vocal doit faire preuve d'une empathie toute particulière.

Les recherches neuroscientifiques ont établi un lien entre neurones miroirs, activés lors de tout échange, et empathie (Lux et Ducroux-Biass, 2011). La rééducation se fonde avant toute chose sur un échange, dans lequel il s'agit tout particulièrement de s'adresser au patient avec bienveillance. La voix transmet les émotions de son émetteur et est un outil puissant, qui peut se faire vecteur de l'empathie dont devrait savoir faire preuve le rééducateur.

En cela, la boucle audio-phonatoire est essentielle à l'orthophoniste pour avoir un juste contrôle de sa voix et ainsi plus généralement, de son rôle de récepteur et d'émetteur dans l'échange. La boucle audio-phonatoire est particulièrement renforcée par cette situation d'interaction, et devient, dans l'échange avec l'autre, « boucle socio-phonatoire » (Gillie, 2010).

## Conclusion

La boucle audio-phonatoire, phénomène de rétrocontrôle et d'ajustement en temps réel de notre production vocale, constitue une compétence indispensable pour pouvoir proposer une rééducation vocale efficace, tant pour imiter le geste vocal du patient et ainsi lui fournir un feedback de ses erreurs, que pour lui montrer le bon exemple vocal et ainsi le guider vers l'adoption d'un geste vocal adapté. Nous avons mené une étude analytique fondée sur une évaluation de facteurs prédictifs d'après un schéma expérimental. Nous avons souhaité, par le biais de notre étude, investiguer sur la boucle audio-phonatoire, et savoir précisément si, d'une part, l'appétence vocale et musicale constituait un facteur prédictif en faveur d'une boucle audio-phonatoire efficace et d'autre part, si la visualisation de la production sonore sur le spectrogramme avait un impact sur la pertinence de l'auto-évaluation.

A partir de ces questionnements nous avons formulé trois hypothèses :

- hypothèse 1 : les étudiantes en orthophonie ayant une appétence vocale et musicale ont un meilleur score de reproduction vocale (exercice mettant à l'épreuve la boucle audio-phonatoire)
- hypothèse 2 : le lien de corrélation entre de bonnes connaissances théoriques et un bon score de reproduction vocale est faible. Alors que celui avec le niveau d'étude est élevé.
- Hypothèse 3 : le spectrogramme facilite les évaluations de production vocale, quels que soient les scores de reproduction, niveau musical, d'étude, d'appétence vocale.

Pour vérifier ces hypothèses, nous nous sommes proposées d'étudier la boucle audio-phonatoire d'un échantillon d'étudiantes en orthophonie du centre de formation de Paris, en leur proposant de participer à un protocole de passation destiné à mettre en exergue les effets du background musical sur les compétences de reproduction vocale.

Le protocole se déroulera de la façon suivante : les étudiantes seront invitées à effectuer un exercice de reproduction d'exemples vocaux, typiquement proposés en rééducation. L'exercice sera enregistré à l'aide d'un microphone, et autoévalué, par feedback auditif et feedback visuel sur spectrogramme. Les participantes seront également invitées à répondre à un questionnaire composé de deux parties, afin d'apprécier l'ampleur de leur bagage musical et de leurs connaissances en matière de voix.

Les résultats obtenus à chacune des deux parties du questionnaire seront analysés et feront l'objet d'une comparaison avec l'évaluation (subjective) des enregistrements des participantes par un jury d'écoute constitué d'une phoniatre, une orthophoniste et de nous-mêmes.

## Références

- Aglieri, V., Chaminade, T., Takerkart, S., & Belin, P. (2018). Functional connectivity within the voice perception network and its behavioural relevance. *Neuroimage*, 183, 356-365.
- Cornut, G. (2009). *La voix* (puf).
- DeJonckere, P. (2016). Le feedback instrumental en pédagogie du chant. In *De la voix parlée au chant* (Klein-Dallant).
- Ernst, E. (2016). La conservation de la voix et de la parole chez l'adulte devenu sourd ou malentendant. In *De la voix parlée au chant* (Klein-Dallant).
- Gillie, C. (2010). « Voix crues, voix dévoyées ». *Insistance*, n° 4(1), 121-135.
- Granier-Deferre, C., & Busnel, M.-C. (2011). L'audition prénatale, quoi de neuf? *Spirale*, n° 59(3), 17-32.
- Lux, M., & Ducroux-Biass, F. (2011). Rencontre magique: l'Approche centrée sur la personne et les neurosciences. *Approche Centree sur la Personne. Pratique et recherche*, n° 14(2), 5-26.
- Ormezzano, Y. (2000). *Le guide de la voix* (Odile Jacob). Odile Jacob.
- Parmentier, F., Marié-Bailly, I., & Pillot-Loiseau, C. (2014). A l'écoute de sa voix: apports du spectrogramme comme rétrocontrôle visuel en rééducation vocale, 17.
- Peterson, D. C., & Hamel, R. N. (2018). Neuroanatomy, Auditory Pathway. In *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.
- Plaza, M. (2014). Le développement du langage oral. *Contraste*, N° 39(1), 99-118.
- Remacle, A., & Morsomme, D. (2015). Mesures de la voix en contexte écologique et techniques de biofeedback. *Rééducation Orthophonique*, 264.
- Selleck, M. A., & Sataloff, R. T. (2014). The Impact of the Auditory System on Phonation: A Review. *Journal of Voice*, 28(6), 688-693