



HAL
open science

Pression sous-glottique et débit oral d'air expiré comme aides à la pose du diagnostic de dysodie; implications pour la rééducation vocale

Claire Pillot-Loiseau

► To cite this version:

Claire Pillot-Loiseau. Pression sous-glottique et débit oral d'air expiré comme aides à la pose du diagnostic de dysodie; implications pour la rééducation vocale. Entretiens d'orthophonie 2011, Sep 2011, Paris, France. pp.32-45. halshs-00609092

HAL Id: halshs-00609092

<https://shs.hal.science/halshs-00609092v1>

Submitted on 18 Jul 2011

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.



Entretiens
d'Orthophonie
2011

Pression sous-glottique et débit oral d'air expiré comme aides à la pose du diagnostic de dysodie ; implications pour la rééducation vocale

C. Pillot-Loiseau*

* Orthophoniste, Maître de Conférences en Phonétique, chargée d'enseignement au centre de formation en orthophonie de Paris, Université Paris 3 Sorbonne Nouvelle, Institut de Phonétique et de Linguistique Générales et Appliquées (ILPGA) et Laboratoire de Phonétique et Phonologie (UMR 7018), CNRS, email : claire.pillot@univ-paris3.fr

Résumé

Le but de cet article est de montrer que mesurer la pression sous-glottique et le débit oral d'air expiré chez des patients dysodiques permet un complément d'évaluation pertinent de ces troubles vocaux de la voix chantée. En outre, la résistance glottique, dont le calcul s'effectue à l'aide du rapport de la pression sous-glottique et du débit, est étroitement liée à l'état pathologique du larynx. Cette aide objective au diagnostic de la nature de la dysodie est accessible à toute pratique clinique moyennant une certaine organisation de la prise de données et quelques connaissances méthodologiques. Celles-ci, ainsi que des repères de valeurs, sont ici données à la lumière des études de recherches passées, complétées par notre étude de cas et suivies par les conséquences pour le diagnostic et la rééducation de ces patients très demandeurs et exigeants dans leur prise en charge. Cette évaluation objective sera toujours associée aux autres éléments d'examen du dysodique dans sa globalité (Anamnèse, *Index de Handicap Vocal* pour les chanteurs, examen du comportement vocal, étude perceptive de la voix chantée...).

Mots-clés

Dysodie, pression sous-glottique, débit oral d'air expiré, résistance glottique, diagnostic

Abstract

The aim of this paper is to show that the measure of the subglottic pressure and oral airflow for dysodic patients allows further relevant evaluation of the singing voice disorders. In addition, glottal resistance, whose values are calculated using the ratio of the subglottic pressure and flow, is closely linked to the pathologic function of the larynx. This objective evaluation of the singing voice disorders is accessible to any clinical practice with the organization of the data and some methodological knowledge. These methodological knowledge, as well as pressure, airflow and glottic resistance values, are given here in accordance with recent research studies completed by our case study and followed by the consequences for diagnosis and rehabilitation of these patients. This objective evaluation is always associated with other singing voice disorders assessments of the dysodic patient in its entirety (History, Voice Handicap Index for singers, examination of vocal behavior, perceptual study of the singing voice ...).

Keywords

Dysody, Subglottic pressure, oral airflow, glottic resistance, diagnostic

INTRODUCTION

La dysodie et ses manifestations

La dysodie regroupe des pathologies ayant une incidence sur la **voix chantée**. Elle peut ou non être accompagnée d'une dysphonie, c'est-à-dire un trouble organique ou fonctionnel de la voix parlée.

La dysodie et la dysphonie se manifestent par l'altération durable ou momentanée d'un ou plusieurs paramètres acoustiques de la voix. L'altération du geste vocal en raison de l'apparition de plusieurs facteurs favorisant et déclenchant le trouble peut être à l'origine de celui-ci. Les principales **plaintes spécifiques du chanteur** peuvent notamment se traduire par : une perte de la portée et du timbre de la voix chantée, une fatigue vocale au chant prolongé, une sensation de ne plus pouvoir atteindre certaines notes aiguës, un manque de souffle pour terminer ses phrases musicales, des phénomènes de cassure registrale, ou parfois une aphonie. Comme pour la dysphonie, l'origine des dysodies peut être organique et/ou fonctionnelle (De Corbière *et al.*, 2001⁽⁵⁾).

L'évaluation de la dysodie

Dans la pratique clinique courante, divers modes d'évaluation sont habituellement utilisés pour évaluer la dysodie : en particulier, le **test odologique** développé par Nicole Scotto di Carlo en 1989⁽¹⁹⁾ comprend un bilan complet et spécifique du dysodique (renseignements généraux, anamnèse, examens cliniques préliminaires de la posture et de la respiration, examen phoniatrique, examen vocal d'items spécifiquement chantés, de la coordination pneumo-phonique, analyse spectrographique, de l'intensité et de la dynamique vocale, phonétogramme, appréciations subjectives et qualités musicales, Scotto di Carlo, 1989⁽¹⁹⁾). En outre, le bilan vocal habituellement utilisé par les orthophonistes pour des patients dysphoniques peut être utilisé pour les troubles de la voix chantée. Cependant, les corpus utilisés pour l'examen de la voix et du comportement phonatoire des patients « tout venants » au niveau de leur utilisation vocale, peuvent s'avérer insuffisamment spécifiques pour des patients chan-

teurs. Enfin, une récente adaptation du *Voice Handicap Index* pour les chanteurs a été effectuée par Dominique Morsomme et son équipe en 2007⁽¹²⁾, permettant d'évaluer avec précision les plaintes particulières aux chanteurs en début et en fin de prise en charge orthophonique (Morsomme *et al.* 2007⁽¹²⁾).

À notre connaissance, il n'existe cependant pas d'études **appliquées** concernant l'analyse de la source vocale au moyen de paramètres aérodynamiques précis chez les patients dysodiques. En revanche, la **recherche** s'est ouverte sur ce thème (notamment Vogelsänger 1954⁽²⁷⁾, Rubin *et al.* 1967⁽¹⁷⁾, Schutte 1992⁽¹⁸⁾, Sundberg *et al.* 1999⁽²³⁾, Pillot *et al.* 2003⁽¹⁵⁾, Björkner *et al.* 2006⁽³⁾, Stepp *et al.* In press⁽²⁴⁾).

Dans cet article, de par l'exposé de ces dernières recherches complétées par quelques données expérimentales personnelles, nous voulons montrer qu'il est possible, dans une pratique clinique, de compléter l'évaluation donc le diagnostic des dysodiques au moyen de paramètres aérodynamiques tels que la pression sous-glottique et le débit oral d'air expiré.

L'aérodynamique de la phonation

L'**aérodynamique** est la discipline qui concerne la force des gaz en mouvement, les forces qui s'exercent sur les corps en milieu gazeux, et les forces mises en jeu par des gaz se déplaçant sur des solides. L'aérodynamique concerne directement les études sur la voix dans la mesure où la phonation est le phénomène de la production sonore qui se réalise grâce à l'émission de bouffées d'air en même temps que la glotte s'ouvre et se ferme sous l'effet de l'interaction des forces musculaires et aérodynamiques. La fonction phonatoire de l'appareil respiratoire est de fournir une surpression d'air adéquate pour la production sonore.

L'énergie nécessaire pour la production sonore peut être estimée à partir de mesures du taux de débit et de la pression sous-glottique. Ces facteurs sont déterminés par l'appareil respiratoire. La force disponible pour conduire à la phonation, ou la force expiratoire, est déterminée par la profondeur de l'inspiration préphonatoire, et la force des muscles expiratoires, incluant les muscles abdominaux

et intercostaux. La force du système respiratoire peut être évaluée en utilisant le pic de débit, la capacité vitale (CV), le volume expiratoire forcé durant la première seconde d'expiration (VEF) et le rapport de ce volume sur la capacité vitale. Elle reflète le taux d'air disponible pour la phonation. Ainsi, une incapacité de générer la pression sous-glottique peut être seulement secondairement due à une capacité vitale diminuée des poumons.

L'usage de l'air durant la phonation est aussi un des éléments principaux employés dans l'évaluation de la fonction vocale (Schutte 1992⁽¹⁸⁾). En effet, les paramètres pneumophonatoires que sont le temps maximum de phonation (TMP), le débit d'air moyen en phonation confortable, et le quotient phonatoire, ont prouvé leur utilité comme tests de fonction vocale effectués par un bon nombre de chercheurs.

Abordons à présent les paramètres aérodynamiques qui nous intéressent dans un complément d'évaluation précise des dysodys : pression sous-glottique, débit oral d'air expiré, et résistance glottique.

PRESSION SOUS-GLOTTIQUE

Définition

On ne peut aborder la respiration en temps que phénomène aérodynamique sans signaler le fait que l'air, à moins d'être retenu, s'écoule d'une zone de pression plus haute vers une zone de pression plus basse. **La pression est définie comme la force par unité d'air agissant perpendiculairement à une surface** (Baken et Orlikoff, 2000⁽²⁾). Même si le Pascal est l'unité courante « standard » du système international (SI), la plupart des mesures de cette pression dans la parole continuent à être exprimées en hPa ou en cm H₂O, car la pression est normalement mesurée au moyen d'un manomètre, un tube en U en partie rempli avec de l'eau.

Une pression constante doit être maintenue pour la puissance de parole. Cette pression, durant l'expiration normale, fluctue entre 10 cm H₂O et la pression atmosphérique, dépendant de la phase d'expiration : durant l'ins-

piration, la pression est en-dessous de la pression atmosphérique, et durant l'expiration, elle est au-dessus. Durant la phase de tenue des occlusives sourdes, la pression sous-glottique est habituellement égale à la pression intra-orale. En ce qui concerne la tenue des occlusives sonores, la pression intra-orale est inférieure à la pression sous-glottique en raison du voisement. Durant les voyelles, la pression intra-orale est nulle car la bouche est ouverte (Warren, 1996⁽²⁸⁾).

Méthodes de mesure

Les **mesures directes** de la pression sous-glottique sont la très invasive ponction trachéale (notamment Plant et Hillel, 1998⁽¹⁶⁾ : étude chez 7 sujets normaux et 7 sujets atteints de dysphonie spasmodique : capteur trachéal directement placé au niveau de la trachée avec anesthésie locale), et la mise en place d'un micro-transducteur de pression sur le plan des cordes vocales (Neumann *et al.* 2003⁽¹⁴⁾ chez deux sujets normaux ; comparaison avec des mesures de pression trachéale). Les **mesures indirectes** de la pression sous-glottique sont l'utilisation du pléthysmographe corporel (Sundberg *et al.* 1999⁽²³⁾ : mesures chez cinq sujets chanteurs), la mise en place d'un ballonnet oesophagien enregistrant la pression oesophagienne intrathoracique chez un chanteur (Rubin *et al.* 1967⁽¹⁷⁾), l'estimation de la pression sous-glottique à partir du pic de pression intra-orale pendant la production de [p] ou de [t] en intervocalique au moyen d'un tube intra-buccal (Holmberg *et al.* 1988⁽⁸⁾, Sundberg *et al.* 1999⁽²³⁾, Björkner *et al.*, 2006⁽³⁾ chez 7 chanteuses de théâtre musical : pression intra-orale) la technologie de l'interruption du débit (Jiang *et al.* 1999⁽⁹⁾ : mesure chez 24 patients parkinsoniens et 17 sujets normaux d'âges similaires), et des mesures avec un microphone jugulaire (Neumann *et al.* 2003⁽¹⁴⁾). 41 % des articles traitant de la mesure de la pression sous-glottique utilisent de 1 à 3 sujets seulement dans leurs études.

Cette pression sous-glottique peut donc se mesurer de diverses manières, seule ou simultanément à d'autres paramètres (intensité, fréquence fondamentale, débit d'air expiré). Chaque méthode de mesure ou d'estimation

de la pression sous-glottique a ses avantages et ses contraintes et il convient de choisir, parmi les moyens disponibles, le procédé le plus adapté au but de la recherche. Dans le cadre clinique, la mesure de la pression sous-glottique au moyen de la pression intra-orale nous apparaît comme la méthode la plus aisément praticable (voir la méthode de notre expérience), mais : 1) le corpus d'acquisition soit suivre de strictes règles (succession d'au moins deux syllabes munies de l'occlusive sourde [p], cf. plus bas) ; 2) sa fiabilité est à vérifier dans des productions chantées.

Valeurs

Celles-ci sont particulièrement variables, notamment en raison des corrélations positives qui existent entre la pression sous-glottique, la fréquence fondamentale et l'intensité. Concernant la voix parlée, il est raisonnable de compter sur des valeurs comprises entre 7 et 10 cmH₂O à intensités et fréquence fondamentales « confortables » ces valeurs pouvant atteindre 15 cmH₂O à intensités très fortes (entre autres Holmberg *et al.* 1988⁽⁸⁾). Les valeurs obtenues chez des chanteurs professionnels montrent une dynamique beaucoup plus grande de cette pression sous-glottique, avec en moyenne des étendues de 20 à 30 cmH₂O chez des chanteurs d'opéra (Sundberg *et al.* 1999⁽²³⁾) mais des étendues moindres chez des chanteuses de théâtre musical (Björkner *et al.* 2006⁽³⁾).

Les valeurs en pathologie sont plus élevées que celles de sujets normaux (Plant et Hillel 1998⁽¹⁶⁾, Jiang *et al.* 1999⁽⁹⁾) pour des intensités comparables, Teston 2004⁽²⁶⁾, Giovanni *et al.*, 2000⁽⁶⁾). En outre, la pression sous-glottique estimée (pression intra-orale) permet une bonne distinction entre sujets contrôles et dysphoniques, et peut être incluse dans la série des paramètres objectifs cliniques de base pour évaluer la voix de dysphoniques (Giovanni *et al.*, 2000⁽⁶⁾).

DÉBIT ORAL D'AIR EXPIRÉ

Définition

Le débit oral d'air expiré est la vitesse d'un volume d'air ou la quantité de l'air expiré par la

bouche par unité de temps, exprimé en l/s, ml/s ou dm³/s (Baken *et al.*, 2000⁽²⁾). C'est un paramètre physique primordial pour la phonation, car il traduit la consommation d'air nécessaire pour la production vocale et intervient dans l'évaluation du rendement énergétique de celle-ci (Schutte, 1992⁽¹⁸⁾). Les constrictionnements le long du conduit vocal produisent un orifice déterminant le débit : le débit de l'air est modulé par la glotte et les constricteurs supra-glottiques (c'est-à-dire la langue, le palais, le nez, les lèvres et les dents). Il se différencie du débit d'air nasal, écoulement de l'air par le nez, mesurable pour des voyelles et consonnes nasales par exemple.

Méthodes de mesure

L'équipement utilisé pour le mesurer varie selon les auteurs : spiromètre, rotamètre (ou débitmètre), pléthysmographe et pneumotachographes de différents types (Rubin *et al.*, 1967⁽¹⁷⁾, Holmberg *et al.*, 1988⁽⁸⁾, Sundberg *et al.*, 1999⁽²³⁾), ce dernier équipement faisant l'objet de la grande majorité des études.

Le pneumotachographe consiste en un débitmètre et un transducteur différentiel de pression. À l'une de ses extrémités, il se termine par un masque posé sur le visage du sujet de manière imperméable grâce à un joint étanche en caoutchouc. Le sujet tient le masque par son manche. À son autre extrémité, il est connecté à un amplificateur et à une station informatique traitant les données de débit résultantes. Quand l'air s'écoule au travers du débitmètre, la pression chute et est enregistrée par le transducteur. La chute de pression est proportionnelle au taux de débit. C'est ce dispositif qui est accessible en milieu clinique, comme le dispositif EVA2 (*Evaluation Vocale Assistée*, Teston 2004⁽²⁶⁾) dont nous reparlerons ultérieurement.

Valeurs

Le débit des femmes est en généralement moins élevé que celui des hommes (Schutte, 1992⁽¹⁸⁾ ; Holmberg *et al.*, 1988⁽⁸⁾ ; Netsell *et al.*, 1991⁽¹³⁾). Ses valeurs, extrêmement variables, s'étendent globalement entre 125 et 170 ml/s pour des fréquences et intensités confortables parlées (Sulter et Wit, 1996) et

entre 150 et 250 ml/s pour des voyelles chantées (Vogelsänger, 1954⁽²⁷⁾, Schutte, 1992⁽¹⁸⁾). Stepp *et al.* in press⁽²⁴⁾ ont obtenu des valeurs de débit comprises entre 200 et 400 ml/s pour 10 non chanteurs avec d'importants nodules, alors que les valeurs concernant 8 chanteurs avec de petits nodules s'étendent de 200 à 300 ml/s, mais ces différences ne sont pas significatives. Selon Laukkanen *et al.* (1995⁽¹⁰⁾), le débit diminue chez une patiente souffrant d'insuffisance glottique après une minute d'échauffement vocal, alors qu'il augmente dans les mêmes conditions chez 11 sujets sains. Cependant, pour Jiang *et al.* (1999⁽⁹⁾), ce débit oral d'air expiré n'est pas significativement plus grand chez les 24 parkinsoniens par rapport à 17 sujets normaux.

Les liens entre fréquence fondamentale, intensité et débit sont complexes et controversés (Schutte 1992⁽¹⁸⁾). Seuls d'anciens travaux (Vogelsänger 1954⁽²⁷⁾, Rubin *et al.* 1967⁽¹⁷⁾) ont constaté qu'à fondamental égal, le chanteur entraîné utilise un débit plus bas quand il chante le son à faible intensité, et augmente le débit quand il accroît le niveau sonore. À l'opposé, le chanteur inexpérimenté utilise un débit relativement haut quand il chante piano. Quand il augmente le niveau sonore, le débit diminue en raison de l'augmentation de l'adduction cordale concomitante : c'est le cas de la phonation « pressée » chez les sujets inexpérimentés, les dysphoniques, dysodiques et les chanteurs non classiques, (Sundberg, 1995⁽²²⁾). Dans ce cas, la pression de l'air sous la glotte peut être d'une telle intensité que des tensions ne peuvent s'éviter en chantant et le sujet « pousse » sur sa voix. « Pousser » résulte d'une phase de fermeture excessivement longue des cordes vocales, en réponse à des taux élevés de pression sous-glottique. Pour énergiser suffisamment le corps afin de répondre à la demande de tenir de longues phrases, dans des grandes tessitures et intensités, certains chanteurs provoquent trop de résistance laryngée au débit. C'est la « phonation pressée » où l'amplitude de la fréquence fondamentale de la voix reste basse en dépit d'efforts physiques considérables.

RÉSISTANCE GLOTTIQUE

Définition et méthode de calcul

La littérature a utilisé la combinaison des mesures précédentes pour en calculer des formules comme celles de rendement vocal (Schutte, 1992⁽¹⁸⁾ ; Pillot *et al.*, 2003⁽¹⁵⁾) et de résistance glottique (Plant et Hillel, 1998⁽¹⁶⁾ ; Teston, 2004⁽²⁶⁾).

Dans la mesure où le larynx peut être assimilé à un transducteur d'énergie permettant de transformer de l'énergie aérodynamique en énergie acoustique, le rendement vocal est le rapport de la puissance acoustique rayonnée aux lèvres (elle-même proportionnelle à l'intensité) à l'énergie consommée par le corps pour la phonation ou puissance aérodynamique, c'est-à-dire la pression sous-glottique multipliée par le débit à la glotte (Schutte, 1992⁽¹⁸⁾). Moins le larynx utilise d'air pour une intensité donnée, plus faible est cet indice et meilleur est son rendement. Il a cependant été montré que sa relation avec l'état pathologique était contestable (entre autres : Pillot *et al.*, 2003⁽¹⁵⁾, Teston, 2004⁽²⁶⁾ ; Grillo et Verdolini, 2008⁽⁷⁾) : en effet, certaines voix peu dynamiques et utilisant un faible débit d'air, peuvent avoir un rendement laryngien élevé malgré une médiocre audibilité.

La résistance glottique est plus étroitement liée à l'état pathologique que la formule précédente, dans la mesure où elle est en partie corrélée avec la force de contact des plis vocaux (Teston 2004⁽²⁶⁾, Giovanni *et al.*, 2000⁽⁶⁾) : si la résistance glottique est élevée, cela signifie la présence d'une importance compression médiane des tissus glottiques (Laukkanen *et al.*, 1995⁽¹⁰⁾). Rapport de la pression sous-glottique sur le débit oral d'air expiré (Holmberg *et al.*, 1988⁽⁸⁾), en hPa/dm³/s, elle est donc liée au forçage vocal. Selon Plant et Hillel (1998⁽¹⁶⁾), elle est plus influencée par les changements de débit que de pression sous-glottique.

Valeurs

Les valeurs moyennes en voix parlée à intensités et fréquences confortables s'établissent autour de 38 hPa/dm³/s chez le sujet normal (Teston, 2004⁽²⁶⁾) avec des étendues moyennes de 20 à 61 hPa/dm³/s (Holmberg *et al.*,

1988⁽⁸⁾), 56 cm H₂O/l/s (écart-type : 26) chez 7 sujets normaux, 262 cm H₂O/l/s (écart-type : 353) chez 7 sujets atteints de dysphonie spasmodique (Plant et Hillel, 1998⁽¹⁶⁾), 75 hPa/dm³/s chez un sujet parkinsonien (Teston, 2004⁽²⁶⁾), la limite supérieure pathologique étant fixée à 100 hPa/dm³/s par cet auteur.

Concernant la voix chantée, il existe peu d'études consacrées à la résistance glottique chez les chanteurs professionnels. Grillo et Verdolini (2008⁽⁷⁾) ont obtenu chez 13 femmes entraînées (chanteuses professionnelles, professeurs de chant et orthophonistes) des valeurs de 43 cm H₂O/l/s (écart-type 6,6) pour une voyelle volontairement produite comme soufflée, 179 cm H₂O/l/s (écart-type 17) pour une voix « résonante », 150 cm H₂O/l/s (écart-type 9,9) pour une voix normale, et 766 cm H₂O/l/s (écart-type 70) pour une phonation « pressée » (ou hyperfonctionnelle ou serrée, Sundberg, 1995⁽²²⁾). Cependant, les différences de valeur de résistance glottique entre voix « résonante » et normale n'étaient pas significatives.

ILLUSTRATION PAR UNE ÉTUDE DE CAS

Méthode

Illustrons la revue de littérature précédente par quelques données expérimentales personnelles. Nous avons simultanément mesuré les pressions trachéale et intra-orale, l'intensité, le débit oral d'air expiré et la fréquence fondamentale (Figure 1) puis nous avons calculé la résistance glottique chez un sujet masculin non chanteur francophone de 47 ans et un sujet chanteur de 30 ans, tous deux sans problèmes vocaux ni auditifs. Le sujet chanteur a effectué 8 ans de cours particuliers et de stages, et 4 ans au sein d'un ensemble vocal. Son répertoire chanté est classique (musique baroque, opéra mozartien, mélodie). Le faible nombre de sujets tient à l'acquisition invasive mais inédite de la pression trachéale, et les sujets ont été entraînés à ce type de tâche. Notre but est d'étudier les valeurs de pression, débit et résistance glottique, notamment en fonction de l'élévation de l'intensité qui peut générer bon nombre de forçages vocaux.

Afin de calculer cette résistance en fonction de l'intensité, de la voyelle, et de l'émission parlée et chantée, les données de cette étude préliminaire ont été obtenues pour un sujet masculin non chanteur : 1. enregistrements des pressions intra-orale et trachéale (pour en comparer les valeurs), de l'intensité sur trois niveaux (faible, confortable et forte) et de la fréquence fondamentale; 2. calcul de la résistance glottique, au moyen d'un protocole varié (162 syllabes [pa], [pi], [pu] parlées, 30 phrases parlées, 81 syllabes identiques chantées et 54 phrases chantées, 6 glissandi). Chaque item était répété trois fois pour en tester la reproductibilité. Le contenu des phrases était « Dis Papa encore », « Dis pipi encore », « Dis Poupou encore » afin d'obtenir deux syllabes identiques contenant l'occlusive [p] et les voyelles cardinales [a], [i] et [u] : seules ces types de syllabes permettent une mesure de

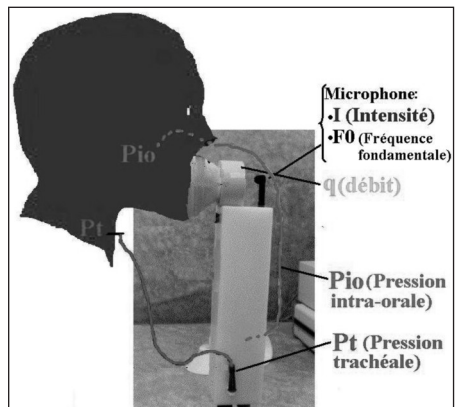


Figure 1 - Dispositif EVA 2 et position du sujet pour l'enregistrement des données acoustiques (fréquence fondamentale et intensité) et aérodynamiques (pressions trachéale et intra-orale, débit oral d'air expiré) avec la « pièce à main » et le masque capteur de débit à son extrémité : station de travail « Physiologia » d'acquisition de paramètres aérodynamiques et acoustiques de la parole, développée à l'Institut de Phonétique d'Aix-en-Provence (Teston, 2004⁽²⁶⁾). La pression intra-orale Pio est mesurée au moyen d'un tube flexible introduit à travers la cavité nasale jusqu'à l'oropharynx.

la pression intra-orale estimée, seule mesure de pression accessible à une pratique clinique. Ces mesures, utilisant le dispositif EVA2 (*Evaluation Vocale Assistée*, Teston, 2004⁽²⁶⁾), ont été effectuées à l'Hôpital Érasme à Bruxelles. La procédure de mesure de la pression trachéale a préalablement été approuvée par le comité d'Éthique de cet hôpital. L'intensité était obtenue grâce à un micro situé à 5 cm derrière le masque, correspondant à une distance de 30 cm en champ libre.

Des données sur un corpus et un protocole analogues (exceptée la mesure de pression trachéale) ont été obtenues chez un sujet féminin chanteur. L'intensité était obtenue grâce à un micro situé à 15 cm derrière le masque, correspondant à une distance de 30 cm en

champ libre. Pour chaque sujet, la durée totale du corpus enchaîné analysé était de 15 minutes environ, afin d'éviter une fatigue de chaque sujet, due aux conditions spécifiques d'enregistrement.

Résultats

Nos résultats montrent : (i) la variabilité des valeurs de résistance glottique obtenues (entre 10 et 80 hPa/dm³/s) ; (ii) leur corrélation positive avec l'intensité pour les glissandi ($r=0,79$, $p<0,0001$, figure 3), les syllabes parlées et les phrases parlées et chantées chez le non chanteur ; (iii) **que cette résistance n'augmente pas significativement avec l'intensité pour les productions chantées du sujet chanteur** (figure 4) ; (iv) qu'à intensité égale, [a] possède une plus petite résistance glottique

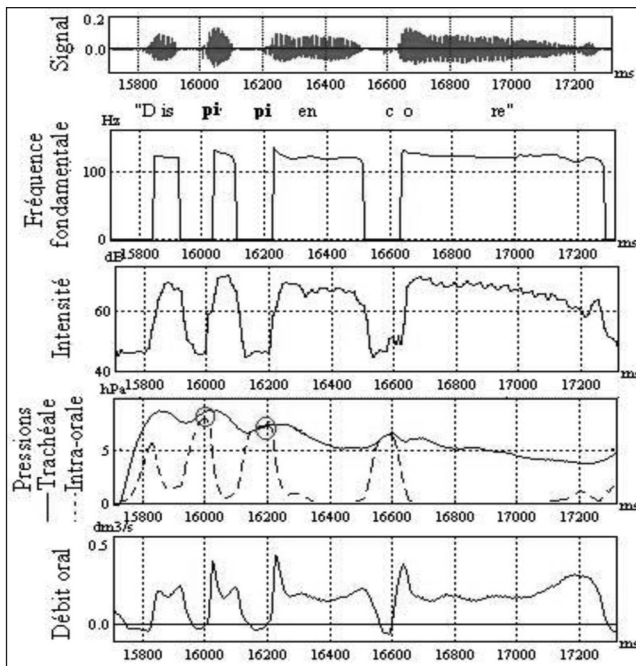


Figure 2 - De haut en bas : représentation simultanée du signal, de la fréquence fondamentale (Hz), de l'intensité (dB), des pressions trachéale (trait plein) et intra-orale (pointillés, hPa) et du débit (dm³/s) pour la phrase chantée recto-tono par le sujet masculin non chanteur « Dis pipi encore », afin d'obtenir deux syllabes identiques contenant l'occlusive [p] : seules ces types de syllabes permettent une mesure de la pression intra-orale estimée, seule mesure de pression accessible à une pratique clinique. Les valeurs de pressions trachéale et intra-orale aux points cibles sont bien identiques, permettant d'utiliser la pression intra-orale comme estimation de la pression sous-glottique dans un contexte clinique au moyen d'un protocole déterminé.

que [i] (figure 4) ; (v) que chez le sujet non chanteur, une partie des valeurs de pression trachéale est comparable à celle des mesures de pression intra-orale mesurée simultanément chez ce sujet (figure 2) ; (vi) que ces données sont reproductibles.

Discussion

Nos valeurs de résistance glottique sont beau-

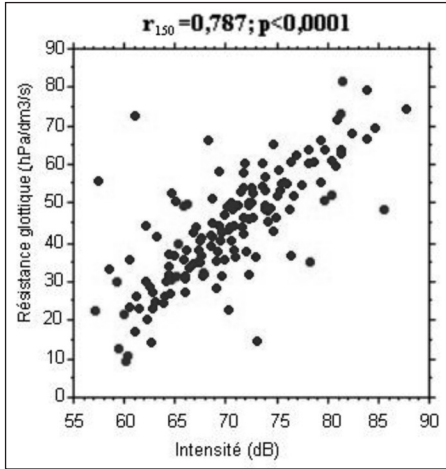


Figure 3 - Corrélation positive entre l'intensité et la résistance glottique (glissandi, sujet non chanteur).

coup plus variables que celles de la littérature (38 hPa/dm³/s, sujet normal, Teston, 2004) en raison du grand degré de liberté des productions vocales donné par notre protocole. Cependant Grillo et Verdolini (2008⁽⁷⁾) ont trouvé des valeurs plus étendues chez des sujets entraînés, mais ces auteurs ont demandé à leurs sujets féminins une variation volontaire de la qualité vocale (phonations soufflée, résonante, normale et pressée, cf. valeurs de résistance glottique et plus bas).

De plus, la résistance glottique parlée augmente significativement avec l'intensité forte (en accord avec Holmberg *et al.*, 1988⁽⁸⁾) chez le sujet non entraîné seulement, en lien avec une diminution du débit oral d'air expiré et une augmentation de la pression sous-glottique (figure 5). Nos résultats montrent aussi que la résistance est plus petite chez la chanteuse quelle que soit l'intensité mesurée (figure 5), alors que Sulter et Wit (1996⁽²¹⁾) affirment qu'elle est plus forte chez les femmes en variant alors de 20 à 61 hPa/dm³/s. En outre, les valeurs de débit chez la chanteuse sont significativement supérieures à celles du sujet non chanteur (figure 5). En outre, Laukkanen *et al.* (1995⁽¹⁰⁾) ont constaté une augmentation de la résistance

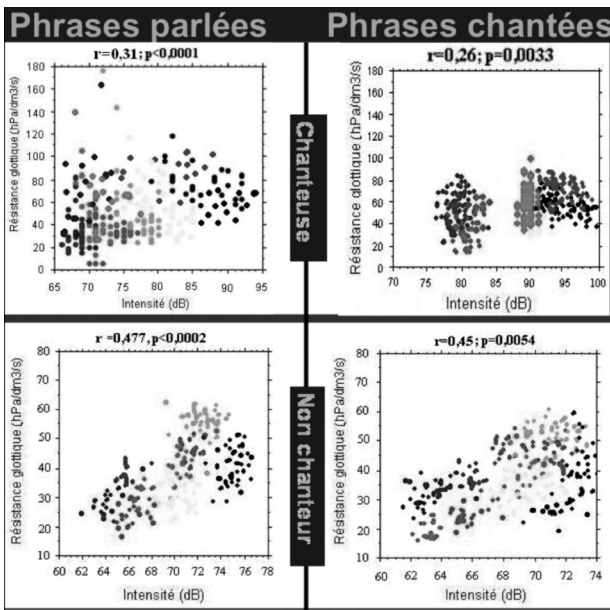


Figure 4 - Résistance glottique en fonction de l'intensité pour les phrases parlées (à gauche) et chantées (à droite) pour le sujet chanteur (en haut) et non chanteur (en bas). r : corrélation de Pearson. Quelle que soit la voyelle et l'intensité, cette résistance n'augmente pas significativement avec l'intensité pour les productions de la chanteuse lyrique.

- Résistance [pi] à intensité faible
- Résistance [pa] à intensité faible
- Résistance [pi] à intensité moyenne
- Résistance [pa] à intensité moyenne
- Résistance [pi] à intensité forte
- Résistance [pa] à intensité forte

glottique après un exercice vocal chez une patiente avec une fuite glottique (diminution du débit), alors qu'elle diminue pour les sujets normaux (diminution de l'activité du vocalis). Cette valeur est plus élevée chez les patients atteints de la maladie de Parkinson, d'ataxie (Jiang *et al.*, 1999⁽⁹⁾ ; Teston, 2004⁽²⁶⁾) et de dysphonie spasmodique (Plant *et al.*, 1998⁽¹⁶⁾), alors que, tout comme nos mesures, elle diminue chez les chanteurs professionnels quand l'intensité augmente, en raison de l'augmentation du débit (Vogelsänger, 1954⁽²⁷⁾, Rubin *et al.*, 1967⁽¹⁷⁾).

D'après les résultats de cette étude préliminaire, il semble bien que la résistance glottique, en accord avec les données de la littérature mesurant cette valeur chez des patients dysphoniques, des sujets normaux et chanteurs professionnels, corresponde, quand l'intensité augmente, à une augmentation de l'adduction cordale comme dans le mode « tendu » de la phonation (« pressed voice », Sundberg 1995⁽²²⁾) pour le non chanteur, contrairement à la diminution de cette force d'adduction chez le chanteur professionnel

(« flow voice » ou « phonation à fort débit » permettant de produire des intensités élevées sans dommages pour les plis vocaux, Sundberg 1995⁽²²⁾). Nous reparlerons plus bas de ces modes phonatoires qui peuvent concerner nos chanteurs dysodiques.

Cette première étude, à poursuivre auprès d'une population de dysphoniques et de dysodiques, montre que l'évaluation du forçage vocal et de l'action de la rééducation par la mesure de la résistance glottique est possible si l'on fournit des protocoles d'intensité et de fréquence variées aux patients et si une rigoureuse méthode dans l'acquisition de la pression intra-orale est adoptée.

IMPLICATION POUR LA PRISE EN CHARGE DES DYSODIES

Complémentarité des méthodes objectives et subjectives pour l'évaluation et la rééducation vocales

Avant de revenir sur l'apport de ces mesures aérodynamiques pour le diagnostic et la rééducation des dysodies, il nous semble impor-

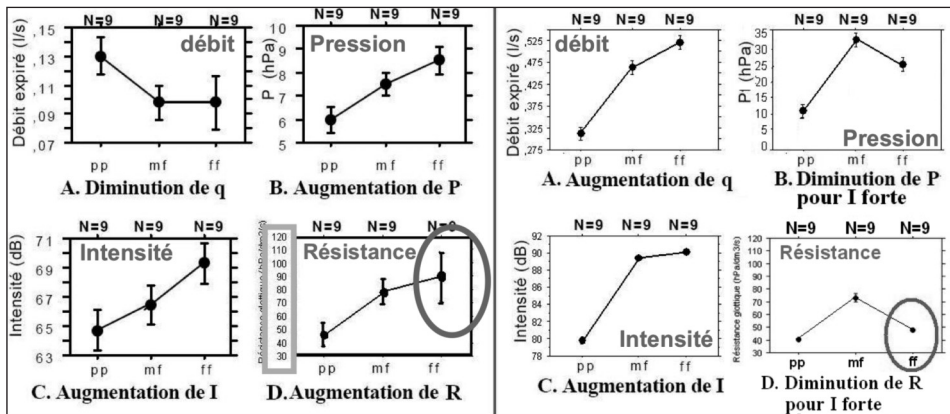


Figure 5 - Valeurs de débit oral d'air expiré q (en haut à gauche), pression sous-glottique P (en haut à droite), d'intensité I (en bas à gauche) et de résistance glottique R en fonction du passage de l'intensité faible (pp) à confortable (mf) puis forte (ff) chez le sujet non chanteur (à gauche) et le sujet chanteur (à droite) pour des trois syllabes toutes chantées sur mi2 (165 Hz) répétées trois fois : quand I augmente d'un niveau moyen à un niveau élevé, le non professionnel diminue son débit et augmente sa pression sous-glottique tandis que chez le chanteur le débit augmente dans les mêmes conditions. Il en résulte une augmentation de la résistance glottique avec l'intensité chez le non chanteur seulement. D'après des tests t non appariés, tous ces changements sont significatifs (p<0,001).

tant de les replacer dans le cadre général des méthodes objectives d'évaluation et de rééducation vocales, complémentaires des autres procédés d'appréciation de la voix.

Les procédés d'évaluation vocale sont habituellement divisés en deux grandes catégories : estimations objective et subjective du trouble vocal d'un patient donné. Les évaluations subjectives de la voix renvoient principalement aux méthodes d'écoute de celle-ci.

L'objectivité de l'évaluation vocale est associée à l'obtention de mesures chiffrées au moyen d'appareils, indépendantes de la personne qui prend ces mesures. On entend, par méthodes acoustiques objectives « toutes les évaluations objectives menées à partir de l'enregistrement du signal vocal au moyen d'un microphone, c'est à dire le signal acoustique de la manifestation vocale » (Teston et Galindo 1995⁽²⁵⁾, Teston 2004⁽²⁶⁾). Cependant, les méthodes d'évaluation de la voix d'un patient avant

et/ou après prise en charge rééducative comprennent d'autres modes d'examen comme celui des paramètres aérodynamiques, thème principal de cet article.

Le tableau 1 fournit quelques avantages et inconvénients liés à l'utilisation actuelle de l'ensemble des méthodes objectives d'évaluation et de rééducation vocales.

Par le contenu de ce tableau, nous observons donc que chaque type de méthode possède ses avantages et ses limites. Il convient donc d'accompagner nos mesures spécifiques de pression et débit par les autres méthodes d'évaluation vocale citées.

Pression, débit, résistance glottique et diagnostic de dysodie

Le débit d'air oral, associé aux paramètres acoustiques, permet de bien évaluer le rendement laryngien. Il permet également d'évaluer précisément la « fuite » glottique en phonation, en relation avec le bruit de souffle (Teston

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Réponse, par des outils de mesure validés, à des contraintes de qualité des soins (démarche actuellement recommandée par l'ANAES, l'Agence Nationale d'Accréditation et d'Evaluation en Santé) • Homogénéisation de nos pratiques et de la mise en place d'un discours scientifique commun (Sicard <i>et al.</i> 2007⁽²⁰⁾) • Repères chiffrés pour informer, motiver (objectivation des progrès en rééducation) et rassurer le patient qui n'entend ou ne sent pas toujours l'amélioration de sa voix • Traçabilité des données (stockage, graphes, valeurs) • Feedback visuel en temps réel des paramètres de la voix et de la parole • Corrélations possibles avec l'analyse perceptive de la voix (écoute) • Objectivité quel que soit l'examineur : pas de subjectivité perceptive de la part du rééducateur ou du patient lui-même • Comparaison avant/après prise en charge rééducative aisée • Observation plus fine de la nature et de la localisation du trouble vocal • Collecte de plusieurs données simultanées pour un même sujet d'une manière cohérente et dans une brève période de temps. • Coût de l'équipement spécifique de moins en moins onéreux • Possibilité éventuelle d'autocorrection plus rapide de l'émission vocale par rétrocontrôle visuel en rééducation (Cippone <i>et al.</i> 1996⁽⁴⁾). 	<ul style="list-style-type: none"> • Non prise en compte du sujet dysodique dans son ensemble • Protocole limité et identique (contraintes méthodologiques de mesure de la pression intra-orale) • Minimum d'expertise et de connaissances méthodologiques indispensables (enregistrement des données, interprétations, valeurs de référence...) • Bases de données hétérogènes : par exemple valeurs de référence souvent issues de littératures anglophones -> à vérifier pour une population francophone • Nécessité d'utiliser des appareils de même marque pour la comparaison aisée des valeurs.

Tableau 1 - Avantages et inconvénient de l'ensemble des méthodes objectives d'évaluation vocale pour le diagnostic et la rééducation des dysphonies et dysodies.

2004⁽²⁶⁾), dans les cas où le complet accolement des plis vocaux est empêché par des nodules, kystes ou autres polypes ou des paralysies laryngées en abduction. Dans le cas de cette dernière pathologie, en raison de l'importante fuite glottique, le débit peut atteindre des valeurs proches de 0.550 dm³/s (Teston 2004⁽²⁶⁾) ; il est alors lié à des tenues vocaliques plus courtes. La connaissance du décours et des valeurs du débit d'air oral permet enfin de bien appréhender toutes les coordinations pneumo-phoniques (Jiang *et al.* 1999⁽⁹⁾).

En outre, un indice tel que la résistance glottique donne une bonne évaluation de l'hypertonie (forçage vocal) ou de l'hypotonie du larynx (Teston 2004⁽²⁶⁾). Cette dernière est souvent associée à de faibles valeurs de pression sous-glottique et de débit.

Mais qu'en est-il des liens entre les valeurs de pression, débit et résistance glottique et le comportement vocal, pour la voix chantée spécifiquement ?

Selon Grillo et Verdolini (2008⁽⁷⁾), la résistance glottique peut caractériser l'interaction dynamique entre les systèmes laryngé et respiratoire dans la production vocale. Cette valeur peut aussi différencier les différents patterns d'adduction des plis vocaux comme dans les phonations relâchée ou soufflée, normale, et pressée. Comme le montre le tableau 2, plus la résistance glottique est élevée, plus les forces d'adduction des plis vocaux sont éle-

vées, le débit est bas et la pression sous-glottique est moindre, comme dans le serrage vocal et la phonation pressée (définie dans notre section sur les valeurs de débit). Cette dernière phonation peut être utilisée dans certaines techniques chantées comme le Belting, mais est aussi fréquente chez bon nombre de patients dysodiques pour lesquels l'examen laryngé peut montrer l'existence d'un serrage (exemple : serrage des bandes ventriculaires).

Dans le cas de la phonation relâchée, en cherchant à éviter les tensions qui peuvent involontairement résulter de la recherche de puissance sonore, le chanteur risque de se laisser aller à la dangereuse tentation d'une émission vocale « relâchée », reposant sur une mixture de souffle. La mixture de souffle est due à une insuffisante fermeture des plis vocaux, résultant, à son tour, de ces insuffisances dans la gestion du souffle. En d'autres mots, l'énergie respiratoire peut être si relâchée que le mécanisme laryngé se trouve contraint à tenter sans succès de répondre aux exigences de hauteur et d'intensité en l'absence d'un soutien musculaire suffisant. En conséquence, la glotte devient alors inefficace et la voix est parasitée par du souffle.

Les valeurs de pression sous-glottique estimée, de débit oral d'air expiré et de résistance glottique peuvent donc nous donner un précieux complément des autres estimations de la fonction vocale chantée dans les altérations laryngées hypotoniques ou hyperotoniques.

Type	Phonation relâchée			Phonation équilibrée			Phonation pressée		
	Ps (hPa)	q (l/s)	I (dB)	Ps (hPa)	q (l/s)	I (dB)	Ps (hPa)	q (l/s)	I (dB)
Valeur	5	0,59	68	9	0,35	76	14	0,19	70
Tendance	--	++	--	+	+	+	++	--	-
Forces adductrices des plis vocaux	--			-			++		
Résistance glottique : valeur, tendance	8,4 hPa/l/s			25,7 hPa/l/s			73,7 hPa/l/s		
	--			-			++		

Tableau 2 - Exemples quantifiés des différences des rapports entre l'intensité sonore I, le débit oral d'air expiré q et la pression sous-glottique Ps durant les phonations relâchée, équilibrée (normale) et pressée. Sont également donnés les degrés de forces d'adduction des plis vocaux. Les valeurs sont extraites de l'étude de Sundberg (1995⁽²²⁾). Grillo et Verdolini (2008⁽⁷⁾) ont obtenu, chez 13 femmes entraînées, la même augmentation des valeurs de résistance glottique avec le mode de phonation, mais pour des valeurs toutes supérieures.

Axes rééducatifs conséquents

Les trois types de phonation que nous venons d'évoquer ont souvent pour point commun la recherche de la puissance sonore particulièrement importante en chant, notamment quand le chanteur est accompagné d'un important groupe instrumental sans être forcément amplifié.

Dans notre étude expérimentale de cas, nous avons vu que le sujet non entraîné augmente sa résistance avec l'intensité contrairement à la chanteuse, en accord avec plusieurs études antérieures et ce qui constitue les cas les plus fréquents de dysodys : l'objectif de la rééducation vocale est alors de diminuer cette résistance pour ne pas forcer sa voix si l'intensité augmente.

Selon Grillo et Verdolini (2008⁽⁷⁾), la résistance glottique peut révéler des changements significatifs dans la qualité vocale après une série de séances de rééducation vocale réussies. Par exemple, un patient avec une phonation d'effort extrême au niveau de ses plis vocaux effectuera de la rééducation vocale pour diminuer cette phonation en équilibrant l'énergie entre les systèmes respiratoires et vocaux (équilibre des pressions, Amy de la Bretèque 1997⁽¹⁾). Le succès d'une telle rééducation se traduira par un passage de valeurs élevées (avant) vers des valeurs basses de résistance glottique (après les séances).

En outre, un patient qui présente une phonation hypotonique avec une force d'adduction des plis vocaux trop faible, effectuera une rééducation orthophonique afin d'améliorer sa « compétence glottique » et donc d'augmenter ses valeurs de résistance glottiques trop faibles avant l'entreprise des séances.

Concernant la prise en charge orthophonique du patient dysodique, celle-ci comprendra les classiques exercices de détente cervico-scapulaire et de relaxation si nécessaire, mais l'attention du rééducateur devra être portée vers d'autres exercices plus spécifiques par rapport à cette pathologie :

1 – Contrôle de la phase expiratoire et coordination pneumo-phonique

À la fin de la rééducation orthophonique,

selon les besoins et les sollicitations vocales chantées propres au patient, le rééducateur veillera à ce que son patient sache :

- Prendre d'entières inspirations rapidement et silencieusement, et sans emploi inesthétique des muscles accessoires. L'entraînement doit être accentué sur l'utilisation habituelle et facile de toute la capacité vitale, et non de son élargissement.

- Expirer pour chanter de manière contrôlée : la capacité à chanter de longues phrases et d'éviter une voix voilée ou non claire, sans attaques dures (dans le cas du chant lyrique), est une seconde différence majeure produite par l'entraînement. Cela exige de produire la pression sous-glottique nécessaire et de contrôler le débit également en fonction de la hauteur et de l'intensité désirées.

- Maintenir le débit d'air expiratoire stable requis pour une production sonore homogène (égale, douce), durant des fréquences fondamentales, intensités et actions physiques variées (s'asseoir, se lever, marcher, s'arrêter, s'allonger, embrasser et même combattre et mourir). En outre, on souhaite une durée maximale du ton, une constance absolue de la hauteur et des changements réguliers.

Le contrôle du débit expiratoire facilitera aussi l'évolution d'un son à l'autre, l'énonciation des consonnes sans déperdition d'air, et l'application d'une force expiratoire contrôlée pour produire la pression sous-glottique nécessaire à de la hauteur et de l'intensité désirées.

2 – Coordination entre l'intensité, la pression sous-glottique et le débit

En plus du contrôle de la phase expiratoire, la considération la plus basique en pédagogie vocale est comment apprendre la balance (l'équilibre) adéquate entre la liberté et l'« énergisement » : il ne s'agira donc pas de « pousser » sur sa voix, mais d'apprendre à se servir de son énergie physique tout en restant détendu et libre (Miller 1990⁽¹¹⁾). Plus précisément, la phonation équilibrée se caractérise par une faible pression du flux d'air et par des forces adductrices faibles qui augmentent l'intensité du fondamental et rendent la voix plus intense. J. Sundberg (1995⁽²²⁾) a montré qu'un

chanteur augmente l'amplitude de sa fréquence fondamentale de 15 dB en passant de la phonation forcée à une phonation équilibrée.

On évitera des occlusives glottales excessives, des « cassures » vocales, des grands mouvements verticaux du larynx avec la hauteur du son, et de grands mouvements des épaules et de la cage thoracique durant la respiration qui favorisent le forçage vocal dans le chant. De tels changements de posture et de configuration peuvent provoquer des réponses acoustiques transitoires non désirables, une perte d'énergie, et contribuer probablement au manque de contrôle dans la production vocale.

3 – Importance du rôle des cavités de résonance

Bien entendu, le travail rééducatif, en étroite collaboration avec celui de l'éventuel professeur de chant, ne doit pas se limiter aux deux étages de l'appareil phonatoire que sont les systèmes respiratoire et laryngé. La recherche de l'équilibre des pressions doit être complétée par celle de l'équilibre résonantiel (Amy de la Bretèque 1997⁽¹⁾) : adapter en permanence l'ouverture des résonateurs permet un gain de puissance qui nécessite beaucoup moins d'effort que le forçage de l'émission. L'éducation du comédien et du chanteur doit privilégier cette recherche. Dans le cas du chant lyrique, c'est essentiellement par l'ajustement des cavités pharyngées et buccales, et non par sollicitation laryngée, que la voix « résonante » (Grillo et Verdolini 2008⁽⁷⁾) est produite. Cet équilibre résonantiel doit rester constant quelque soit les changements de registre dans le chant.

Finalement, quelle que soit la technique chantée, le rééducateur doit pouvoir aider son patient dysodique à retrouver les qualités suivantes :

1° Fonction vocale permettant une émission fiable et puissante (capable de porter) ;

2° Appareil vocal résistant (capable de travailler longtemps, notion de portée sans effort vocal pathogène) ;

3° Rendu vocal agréable dans une technique donnée (artistique et facile) ;

4° Voix expressive (capable d'une palette de nuances modulables).

CONCLUSION

Nous espérons ici avoir montré l'intérêt et l'application de la mesure des pressions sous-glottique et du débit oral d'air expiré, ainsi que ceux du calcul de la résistance glottique, pour une meilleure évaluation donc un meilleur diagnostic de la dysodie. Moyennant quelques aménagements et connaissances méthodologiques, ces mesures et calculs peuvent être accessibles à une pratique clinique auprès de patients chanteurs présentant des troubles spécifiques de la voix chantée, mais aussi pour tout patient dysphonique.

Bien évidemment, on ne saurait se contenter de ce type d'évaluation qu'il est indispensable d'associer aux autres éléments d'examen du dysodique dans sa globalité. En outre, « c'est dans la direction des analyses multiparamétriques que les évaluations objectives des dysphonies progressent » (Teston 2004⁽²⁶⁾).

RÉFÉRENCES

- 1 - Amy de la Bretèque, B. (1997). *L'équilibre et le rayonnement de la voix*. Marseille : Solal, 127 pages.
- 2 - Baken, R.J., Orlikoff, R.F. (2000). *Clinical measurement of speech and voice*, Second Edition, Singular Publishing Group, Thomson Learning, 610 pages, San Diego.
- 3 - Björkner, E., Sundberg, J., Cleveland, T., Stone, E. (2006). Voice Source Differences Between Registers in Female Musical Theater Singers, *Journal of Voice*, 20(2), 187-197.
- 4 - Cippone, P., Nume, F., Sambarbieri, A. (1996). L'utilisation de l'ordinateur dans la thérapie des troubles de la voix. Application de Phonos TV et CI, *Revue de l'A.N.A.E. (Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant)*, 38, 93-95.
- 5 - De Corbière, S., Fresnel, E., Frèche, C. (2001). La voix : la corde vocale et sa pathologie, monographie du Centre de Correction Auditive (CCA), 79 pages.
- 6 - Giovanni, A., Heim, C., Demolin, D., Triglia, J.M. (2000). Estimated subglottic pressure in normal and dysphonic subjects. *Annals of Otolaryngology and Rhinology* ; 109:500-504.
- 7 - Grillo, E.U., Verdolini, K. (2008). Evidence for distinguishing pressed, normal, resonant, and breathy voice qualities by laryngeal resistance and vocal efficiency in vocally trained subjects, *Journal of Voice*, 22(5), 546-552.

- 8 - Holmberg, E.B., Hillman, R.E., Perkell, J.S. (1988). Glottal airflow and transglottal air pressure measurements for male and female speakers in soft, normal and loud voice, *Journal of the Acoustical Society of America*, 84(2), 511-529.
- 9 - Jiang, J., O'mara, T., Chen, H.J., Stern, J.I., Vlagos, D., Hanson, D. (1999). Aerodynamic measurements of patients with Parkinson's disease, *Journal of Voice*, 13(4), 583-591.
- 10 - Laukkanen, A.M., Lindholm, P., Vilkmán, E. (1995). On the effects of various vocal training methods on glottal resistance and efficiency, *Folia Phoniatica Logopedica*, 47, 324-330.
- 11 - Miller, R. (1990). *La structure du chant, Pédagogie systématique de l'art du chant*, 1^{re} édition française, Edition IMPC, Paris, 395 pages.
- 12 - Morsomme, D., Gaspar, M., Jamart, J., Remacle, M., Verduyck, I. (2007). Adaptation du Voice Handicap Index à la voix chantée, *Revue de laryngologie, d'otologie et de rhinologie*, 128(5), 305-314.
- 13 - Netsell, R., Lotz, W.K., Duchane, A.S., Barlow, S. M. (1991). Vocal tract aerodynamics during syllable productions : normative data and theoretical implications, *Journal of Voice*, 5(1), 1-9.
- 14 - Neumann, K., Gall, V., Schutte, H.K., Miller, D.G. (2003). A new method to record subglottal pressure waves: potential applications, *Journal of Voice*, 17(2), 140-159.
- 15 - Pillot, C., Soquet, A., Hassid, S. (2003). Simultaneous measurements of tracheal and intra-oral pressure, oral airflow, intensity, fundamental frequency and calculation of vocal efficiency in speech and singing, *Actes du XV^e Congrès International des sciences phonétiques*, Barcelone, 3-9 août 2003, pp. 3137-3140.
- 16 - Plant, R.L., Hillel, A.D. (1998). Direct measurement of subglottic pressure and laryngeal resistance in normal subjects and in spasmodic dysphonia, *Journal of Voice*, 12(3), 300-314.
- 17 - Rubin, H., Le Cover, M., Vennard, W. (1967). Vocal intensity, subglottic pressure and airflow relationships in singers, *Folia phoniatica*, 19(6), 393-413.
- 18 - Schutte, H.K. (1992). *The efficiency of voice production*, Singular Publishing Group, 208 pages.
- 19 - Scotto di Carlo, N. (1989). Le test otologique, *Revue de laryngologie, d'otologie et de rhinologie*, 110(4), 383-388.
- 20 - Sicard, A., Sicard, E., Farenc, J.C. (2007). Validation du logiciel Vocalab dans le cadre de l'évaluation vocale, *Glossa*, 102, 6-21.
- 21 - Sulter, A.M., Wit, H.P. (1996). Glottal volume velocity waveform characteristics in subjects with and without vocal training, related to gender, sound intensity, fundamental frequency, and age, *Journal of the Acoustical Society of America*, 100(5), 3360-3373.
- 22 - Sundberg, J. (1995). Vocal fold vibration patterns and modes of phonation. *Folia Phoniatica Logopedica*, 47, 218-228.
- 23 - Sundberg, J., Andersson, M., Hultqvist, C. (1999). Effects of subglottal pressure variation on professional baritone singers' voice sources, *J. Acoust. Soc. Am*, 105(3), 1965-1971.
- 24 - Stepp, C.E., Heaton, J.T., Stadelman-Cohen, T.K., Braden, M.N., Jetten M.E., Hillman, R.E. (in press). Characteristics of phonatory function in singers and nonsingers with vocal fold nodules, *Journal of Voice*, 1-11.
- 25 - Teston, B., Galindo, B. (1995). A diagnosis of rehabilitation aid workstation for speech and voice pathologies. *Proceedings of European Conference on Speech Communication and Technology (Eurospeech 95)*, 1883-1886.
- 26 - Teston, B. (2004). L'évaluation instrumentale des dysphonies. Etat actuel et perspectives, in A. Giovanni, *Le bilan d'une dysphonie : état actuel et perspectives*, Editions Solal, Marseille, pp. 105-169.
- 27 - Vogersänger, G. (1954). Experimentelle Prüfung der Stimmleistung beim Singen [Tests expérimentaux du rendement vocal en chant], *Folia Phoniatica*, 6(4), 193-227.
- 28 - Warren, D.W. (1996). Regulation of speech aerodynamics, in: LASS N.J.: *Principles of Experimental Phonetics*, Ed Mosby, Saint Louis, pp. 46-92.