

Investigation glottographique et laryngoscopique de la transition entre les deux principaux mécanismes laryngés

Arthur Givois¹, Didier Demolin¹, Lise Crevier-Buchman^{1,2}, Angélique Amelot¹

(1) Laboratoire de Phonétique et Phonologie, 19 rue des Bernardins 75005 Paris, France

(2) Hôpital Européen Georges Pompidou, 20 rue Leblanc 75015 Paris, France

arthur.givois@gmail.com, didier.demolin@univ-paris3.fr,
lise.buchman@numericable.fr, angelique.amelot@univ-paris3.fr,

RÉSUMÉ

Cet article étudie par une approche descriptive la transition entre le premier et le second mécanisme laryngé. Des mesures électroglottographiques ont été réalisées simultanément à des captures d'images par laryngoscopie sur deux sujets : une femme et un homme. Des différences de comportement entre les deux sujets ont été observées. Un mouvement vertical de grande amplitude du larynx est systématiquement observé au moment de la transition chez le sujet masculin, tandis que des modifications de petite amplitude de la distance entre paroi pharyngale et épiglote, ou de la compression des plis aryépiglottiques sont remarquées chez le sujet féminin. Ces changements de configurations s'effectuent de façon continue chez cette dernière alors qu'un changement soudain de l'activité des plis vocaux a lieu à un instant précisément localisé pour les productions des deux sujets. Ces différences d'ajustements laryngés sont liées à des modifications des paramètres mécaniques dont dépendent la fréquence fondamentale et qui restent à estimer.

ABSTRACT

Glottographic and laryngoscopic investigation of the transition between the two main laryngeal mechanisms

This study focuses on the glottal source level and the transition between first and second laryngeal mechanism with a descriptive approach. Electroglottographic measurements and laryngoscopic images are recorded simultaneously on two subjects: a woman and a man. Differences were noticeable in the behavior of the larynx: a high-amplitude movement of the vertical position is systematically visible at the transition instant for the male subject, whereas low-amplitude movements concerning the distance between pharyngeal wall and epiglottis, or compression change of the arytenoids because of a rotation are noticeable for the women. This subject realizes these modifications continuously, although sudden changes happen in the vocal folds activity at a precise instant related to the transition of mechanism for the two subjects. These differences of laryngeal adjustments are linked with modifications of mechanical parameters, whose fundamental frequency is dependant and which remain to estimate.

MOTS-CLÉS : Ajustements laryngés, glottographie, fréquence fondamentale, mécanismes laryngés

KEYWORDS: Laryngeal adjustments, glottography, fundamental frequency, laryngeal mechanisms

1 Introduction

Les différentes configurations du vibrateur laryngé pour produire des sons voisés ont conduit à distinguer quatre mécanismes de production au niveau de la source. Les critères de différenciation reposent sur la masse et la longueur vibrante des plis vocaux impliqués dans la vibration, l'action des muscles vocaux commandant les paramètres de tension et de masse vibrante, ainsi que des phénomènes de discontinuité liés aux transitions (Roubeau, 1993). Ces "mécanismes laryngés" – usuellement notés M0, M1, M2 et M3- sont listés par ordre croissant des fréquences fondamentales productibles dans chacun d'eux. Les deux mécanismes principalement utilisés par l'être humain en voix parlée sont le M1 et le M2. Les termes "chest" ou "modal voice" sont régulièrement utilisés dans la littérature pour désigner le M1 lorsqu'elles qualifient le comportement de la source glottique. Il en va de même avec le terme "falsetto" qui désigne le M2 (Roubeau et al., 2009). L'électroglottographie (EGG) est aujourd'hui la méthode non-invasive la plus fiable pour différencier les mécanismes laryngés : au niveau macroscopique, l'amplitude du signal EGG montre de plus grandes variations de surface d'accolement des plis vocaux en mécanisme M1 qu'en M2. Au niveau d'une période, les signaux EGG enregistrés simultanément à des images obtenues par cinématographie ultra-rapide ou photographie stroboscopique ont permis d'associer l'évolution d'une onde de l'EGG aux différentes phases d'ouverture et de fermeture des plis vocaux. L'analyse de ces enregistrements coordonnés a montré que des évolutions plus ou moins rapides surviennent à l'échelle d'une période, la dérivée du signal EGG (dEGG) devient alors un outil pertinent pour caractériser les vibrations : les instants d'ouverture initiale et de fermeture complète de la glotte sont considérés proches des instants où des pics sont visibles sur le signal dEGG. Des procédures de détection automatique du quotient de contact ont été mises en place et ont permis d'étudier les tendances du comportement vibratoire des plis vocaux de façon quantitative avec des mesures non-invasives. Le quotient de contact est en moyenne 0.27 plus grand en M1 qu'en M2, il varie de 0.2 à 0.7 en M1 et de 0.05 à 0.5 en M2 (Henrich et al., 2005). La forme d'onde est plus symétrique en M2 car si la vitesse d'ouverture est inférieure à la vitesse de fermeture en M1, ces deux grandeurs sont proches de l'égalité en M2 (Roubeau et al., 2009).

Si le succès des mesures EGG s'explique en grande partie par son caractère non-invasif, sa principale limite repose sur l'impossibilité de décomposer l'évolution du contact des plis dans le plan horizontal (axe antéro-postérieur) et vertical (axe inférieur-supérieur). Ces informations pourraient potentiellement expliquer les différences entre les pics du signal dEGG et les instants d'ouverture initiale et de fermeture complète des plis, mises en évidence grâce à l'augmentation de la fréquence des images de la cinématographie (Orlikoff et al., 2012; Herbst et al., 2014). D'autre part, ces informations permettraient d'améliorer la compréhension des phénomènes de "double pics" du signal dEGG qui surviennent dans certains schémas de vibrations glottiques liés à des différences de phases d'ouverture ou de fermeture des plis vocaux le long de l'axe antéro-postérieur. Enfin, elles rendraient possible l'estimation de l'ouverture de la glotte et l'établissement d'un lien avec les modèles d'onde de débit glottique. La photoglottographie (PGG) est une technique qui permet également d'estimer l'ouverture de la glotte (Harden, 1975). Des analyses de signaux PGG sur des voyelles produites dans les deux principaux mécanismes laryngés mécanismes ont pu mettre en évidence des différences significatives au niveau de l'amplitude et de la forme de l'ouverture (Kitzing, 1982). Les opportunités offertes par cet outil n'ont pas été plus développées en raison de son caractère invasif. Un photoglottographe externe (ePGG) développé au Laboratoire de Phonétique et Phonologie de Paris 3 donne la possibilité d'acquérir des mesures PGG sans introduire de source de lumière ou de capteur photovoltaïque par voie orale ou nasale (Honda & Maeda, 2009). Ce nouvel outil n'a pour l'instant été utilisé que pour détecter des mouvements d'abduction et d'adduction totale de la glotte (Honda & Maeda, 2008). La robustesse du protocole ne permet pas à ce jour de mesurer les vibrations des plis vocaux avec cet appareil.

L'essentiel des études qui traitent le problème du contrôle neuro-musculaire de la fréquence fondamentale sont historiques et s'appuient sur des mesures électromyographiques (Hirano et al., 1970; Gay et al., 1972). Celles-ci ont montré que l'élévation de la F0 est corrélée avec l'activité du muscle cricothyroïdien (CT) sur toute la tessiture et indépendamment du mécanisme employé. La différence entre M1 et M2 repose principalement sur la contribution du muscle thyroaryténoïdien (TA), dont l'activité est liée à la masse vibrante (Hirano, 1982). Une limite physiologique de raideur peut être atteinte dans les hautes fréquences pour le M1 (Hirano et al., 1969; Titze, 1994). Une discontinuité de la F0 peut alors survenir en raison de l'arrêt soudain de l'activité du TA, alors que sa tension musculaire augmente graduellement (Švec et al., 1999). Un mouvement d'éloignement des bandes ventriculaires a lieu lors de la transition du M1 vers le M2, tandis qu'un rapprochement est relevé lors de la transition inverse (Bailly, 2009).

La corrélation de l'activité du CT avec la F0 est due aux mouvements de rotation et de translation du muscle cricothyroïdien qui provoquent une augmentation de la tension, dont l'effet est plus significatif que l'augmentation de la longueur. La montée du larynx contribue une augmentation supplémentaire de l'activité du muscle cricothyroïdien (Honda, 2004). Des images obtenues par laryngoscopie (Edmondson & Esling, 2006), imagerie par résonance magnétique (Echternach et al., 2010), ou des résultats tirés de signaux EGG (Henrich Bernardoni et al., 2014) montrent que la hauteur du larynx est en moyenne plus élevée chez les hommes en M2 qu'en M1. Il est rapporté dans ces études l'existence d'une grande variabilité inter-individuelle des positions du larynx en fonction des mécanismes. Ceci confirme que les stratégies neuromusculaires mises en œuvre pour le contrôle des paramètres acoustiques de la parole varient d'un mécanisme à l'autre. Le quotient ouvert dont la valeur dépend de ces stratégies est d'ailleurs corrélé différemment avec la hauteur et l'intensité suivant le mécanisme employé (Henrich et al., 2005). Le contrôle de la F0 en fonction des mécanismes résulte donc de la coordination complexe de l'activité musculaire laryngée qui est propre à chaque individu. L'expertise vocale et le sexe sont des facteurs qui augmentent cette variabilité. Les fréquences fondamentales de transition sont en moyenne inférieures chez les hommes par rapport aux femmes et les intervalles de ruptures sont plus élevés (Roubeau et al., 2009). Ces grandeurs dépendent des dimensions des organes du larynx, notamment de la longueur et de l'épaisseur des plis vocaux. Les rapports d'amplitude de l'EGG entre M1 et M2 sont également plus élevés pour les hommes que pour les femmes.

Cette étude propose de mettre en évidence cette variabilité des stratégies de contrôle de F0 entre individus en fonction des mécanismes. La description d'images laryngoscopiques associée à l'analyse de signaux EGG ont été réalisées sur un homme et une femme dans cette optique.

2 Protocole expérimental

Par son caractère invasif, le laryngoscope nécessite de réaliser les mesures dans un environnement hospitalier. Les expériences se sont déroulées dans un cabinet d'oto-rhino-laryngologie de l'Hôpital Européen Georges Pompidou.

2.1 Matériel

Un microphone électrostatique fixé sur un nasofibroscope placé à 30 cm des sujets a permis d'enregistrer les signaux acoustiques échantillonnés à 44100 Hz. Un électroglottographe a enregistré des signaux EGG échantillonnés à une même fréquence. Un nasofibroscope souple (Kay-Pentax FNL10RP3) équipé d'une lumière froide (halogène CLK-4, Olympus) dont l'extrémité est reliée à un système d'enregistrement vidéo (DigitalStrobe, RLS91000, Kay Elemetrics) ont permis d'enregistrer des images à une fréquence de 25 im/s et une résolution de 568 × 454 pixels. Ces enregistrements ont été effectués simultanément.

2.2 Locuteurs et tâches

Les sujets de l'expérience sont un homme et une femme musiciens mais non spécialistes en chant lyrique. Pour ces deux sujets, la transition est mise en évidence avec des glissandi ascendants et descendants sur différentes voyelles. Les changements de mécanismes du sujet masculin sont plus évidents à percevoir et à repérer. Ce sujet a en plus effectué des transitions sur une même fréquence fondamentale, une même hauteur et une même voyelle. Ces sujets ont produit différentes phonations - naturelle, criée, parlée, à différentes hauteurs fixées de leur tessiture - sur une phrase de référence (« Où a-t-il mis ses chaussettes »). La séquence alternant consonnes fricatives sourdes et voyelles afin de visualiser les mouvements d'abduction et d'adduction des plis vocaux sur les images et les signaux a été enregistrée. Une production chantée libre d'une durée approximative de dix secondes a également été demandée aux sujets.

2.3 Mesures

Les instants de fermetures et d'ouvertures glottiques ont été estimés par des méthodes de seuillage du signal EGG (deux seuils étant fixés à 35% et 50% de la différence entre le maximum et le minimum de la différence du signal EGG sur une période (Rothenberg & Mahshie, 1988), ainsi qu'à l'aide de la méthode Decom fondée sur la détection des pics de la dérivée du signal d'EGG (Henrich et al., 2004). Une quatrième méthode proposée dans l'étude d'Howard (1995) repose sur l'établissement d'un seuil fixé à 3/7 pour l'estimation de l'instant de l'ouverture et sur le pic du signal d'EGG pour estimer l'instant de fermeture. Les fréquences fondamentales et les quotients de contacts estimés par ces quatre méthodes sont systématiquement comparés pour tous les enregistrements analysés. Les évolutions sont globalement similaires, les différences entre les valeurs restent le plus souvent constantes au cours d'une production pour les quatre méthodes de calcul. Des phénomènes locaux tels que des augmentations ou diminutions inexplicables et brusques du quotient de contact surviennent dans certains cas. Les méthodes retenues dans les exemples présentés sont celles où n'apparaissent pas ces phénomènes inattendus. La méthode Decom est appliquée à la transition sur une même hauteur au glissando ascendant du sujet masculin, la méthode de Howard est appliquée sur les glissandi du sujet féminin, tandis que la méthode de seuillage à 35% est appliquée sur le glissando descendant du sujet masculin. Les discontinuités de la fréquence fondamentale et du quotient de contact estimées par ces méthodes sont avec les changements d'amplitudes de l'électroglottographe les principaux critères d'identification des transitions de mécanismes.

Les signaux EGG mesurés sur le sujet féminin ont été perturbés par un bruit qui n'a pas été visualisé lors de l'enregistrement. Une procédure de débruitage par analyse harmonique et synthèse additive a été entreprise sur la base du fait que l'information utile de l'EGG n'est contenue que dans la partie strictement harmonique du signal. Un filtre médian a également été appliqué sur les signaux EGG avant d'estimer les instants d'ouverture et de fermeture glottiques afin de pouvoir mieux détecter les pics d'ouverture sur les signaux d'EGG. Ces estimations sont erronées dans les hautes fréquences des glissandi en raison d'une analyse et d'une reconstruction moins précises, aboutissant à des valeurs non interprétables des quotients de contact dans les hautes fréquences produites en M2.

Des mesures de longueurs en pixels ont également été effectuées sur les images laryngoscopiques. Pour chaque photographie analysée, trois distances notées L1, L2 et l3 sont comparées conformément à l'exemple de la figure 1. L1 et L2 sont repérées par les distances entre la commissure inférieure des plis vocaux aux deux points supposés comme les plus hauts des plis aryépiglottiques, et l3 désigne la distance entre les bords libres des bandes ventriculaires au niveau de la demi-longueur visible des plis vocaux. Les rapports L1/l3 et L2/l3 sont utilisés pour tenter de quantifier les changements d'inclinaison et la distance du larynx à la caméra.

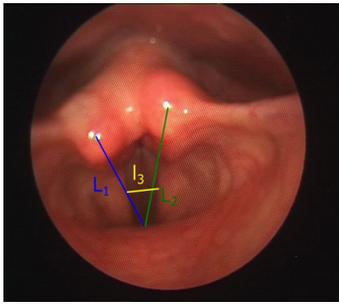


FIGURE 1: Représentation des longueurs mesurées sur un exemple d' image du larynx (sujet masculin)

N° d'image	L1	L2	l3	L1/l3	L2/l3
1	221	251	67	3.30	3.74
2	237	285	79	3.01	3.63
3	203	238	72	2.82	3.29

Table I : Longueurs en pixels et rapports de longueurs sur les images enregistrées lors de la transition du M1 vers le M2 sur une hauteur tenue par le sujet masculin (figure 2).

3 Résultats

3.1 Sujet masculin

Les phénomènes de modification de l'amplitude du signal EGG et du quotient de contact se retrouvent sur l'ensemble des productions réalisées par le sujet masculin comme l'illustrent les trois exemples de transitions sur une même hauteur (figure 2) et sur des glissandi ascendant et descendant (figures 3 et 4). Des discontinuités de la F0 traduisent des phénomènes de perte de contrôle. En M2, l'amplitude de l'EGG est parfois trop faible pour pouvoir estimer la fréquence fondamentale et le quotient de contact.

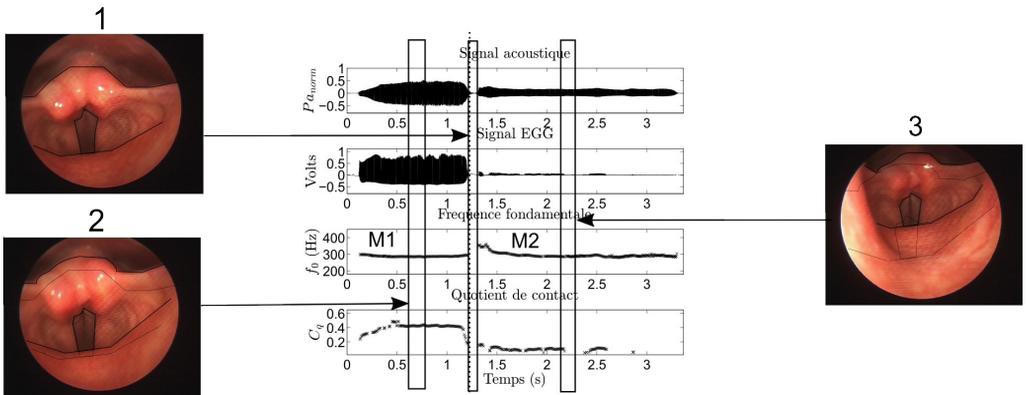


Figure 2 : Signaux acoustique et EGG mesurés, F0 et quotients de contact estimés lors d'une transition du mécanisme M1 vers le M2 sur une hauteur tenue par le sujet masculin. Voyelle [a], $f_0 = 289$ Hz en moyenne. La barre verticale pointillée désigne le moment de la transition identifié sur les signaux. Les trois images capturées sont prises à un instant associé au M1, à la transition et un instant associé au M2. Le bord supérieur des plis aryépiglottiques (PA), le bord inférieur de l'union des PA et des bandes ventriculaires (BV) et les bords visibles des plis vocaux sont marqués en trait plein sur chaque image. Les traits pointillés désignent les mêmes frontières mais tirées de l'image précédente.

Lors d'une transition réalisée à F0 constante, l'évolution de la position et de la taille occupées par les différents organes sur les enregistrements vidéo-nasofibrosopiques traduit un mouvement descendant du larynx qui a lieu au moment de la transition (*cf* figure 2 et Table I). Le larynx monte légèrement vers l'avant entre les images 1 et 2, et descend brusquement entre les images 2 et 3. Une plus grande partie de l'épiglotte devient visible à l'image et masque alors la partie antérieure des PV

qui paraissent raccourcis en longueur. La largeur visible des PV varie peu par rapport à leur longueur, probablement en raison d'un éloignement des bandes ventriculaires (BV).

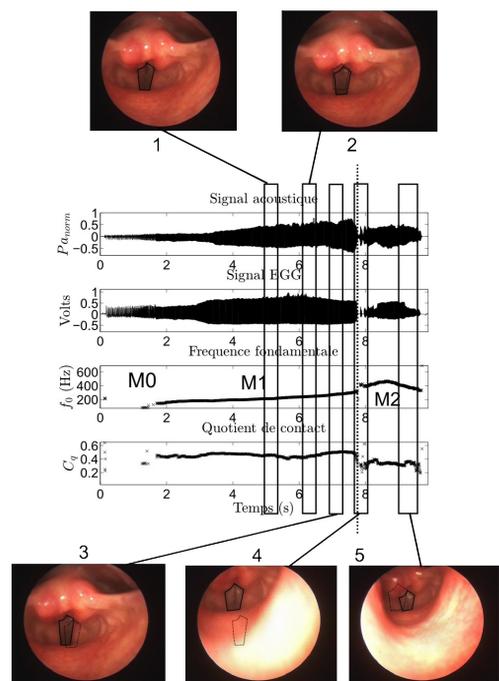


FIGURE 3: Signaux acoustique et EGG mesurés, images enregistrées, f_0 et quotients de contact C_q estimés lors d'un glissando ascendant réalisé par le sujet masculin.

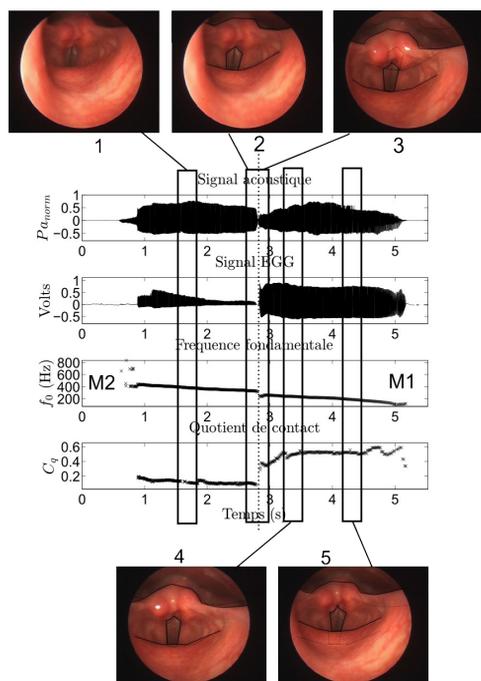


FIGURE 4: Signaux acoustique et EGG mesurés, images enregistrées, f_0 et quotients de contact estimés lors d'un glissando descendant réalisé par le sujet masculin.

L'analyse des images enregistrées lors d'un glissando ascendant (*cf* figure 3 et Table II) produit par le même sujet permet de constater ces mêmes phénomènes de descente et de basculement du larynx lors du passage du M1 au M2. Trois images ont été extraites de la partie produite en M1 pour illustrer le mouvement lent des organes du larynx en comparaison avec l'ample changement de position qui se produit au moment de la transition. Ces trois images montrent une ascension du larynx avec la f_0 . La sensation d'effort vocal se traduit par un serrage supraglottique auquel semblent participer les BV. Une constriction du vestibule laryngé survient au moment de la transition alors que le larynx est toujours en position haute (image 4) et précède le mouvement descendant et le basculement du larynx vers l'arrière qui caractérise la transition (image 5).

N° d'image	L1	L2	l3	L1/l3	L2/l3
1	239	262	67	3.58	3.93
2	226	258	67	3.39	3.87
3	257	274	66	3.89	4.15
4	212	224	79	2.69	2.84
5	181	201	63	2.88	3.20

Table II : Longueurs en pixels et rapports de longueurs sur les images enregistrées lors du glissando ascendant (figure 3) réalisé par le sujet masculin.

N° d'image	L1	L2	l3	L1/l3	L2/l3
1	198	235	67	2.96	3.51
2	196	237	68	2.88	3.47
3	217	243	67	3.24	3.63
4	205	234	62	3.31	3.79
5	188	214	68	2.81	3.20

Table III : Longueurs en pixels et rapports de longueurs sur les images enregistrées lors du glissando descendant (figure 4) réalisé par le sujet masculin.

La stratégie concernant la position du larynx semble être employée indépendamment du sens de la mélodie. Le glissando descendant (figure 4 et Table III) illustre le même mécanisme réalisé en sens inverse. Le larynx est en position basse en M2 (image 1), les PV occupent une faible proportion sur les images par rapport à l'épiglotte en raison de la constriction du vestibule laryngé et de leur éloignement par rapport à la caméra. Le larynx effectue un mouvement ascendant en M2 comme l'illustre la légère modification de la position postérieure des PV de l'image 2. Il bascule ensuite vers l'avant en maintenant le serrage épilaryngé au moment de la transition (image 3). L'image 4 fait apparaître un changement des positions au niveau des extrémités des PA par rapport à l'image 3. Un mouvement descendant du larynx semble avoir lieu pendant la production des basses fréquences du M1 (image 5). Roubeau (1993) et Gay et al. (1972) suggèrent que ceci est dû à l'action des muscles extrinsèques du larynx.

3.2 Sujet féminin

Les glissandi produits par le sujet féminin montrent des discontinuités dans la fréquence fondamentale et pour le quotient de contact, en particulier dans le cas du glissando ascendant : il est donc supposé qu'une transition de mécanisme a lieu à ces instants. Les images et mesures présentées sur les figures 4 et 5 décrivent des variations plus continues de la disposition de l'appareil laryngé par rapport au sujet masculin.

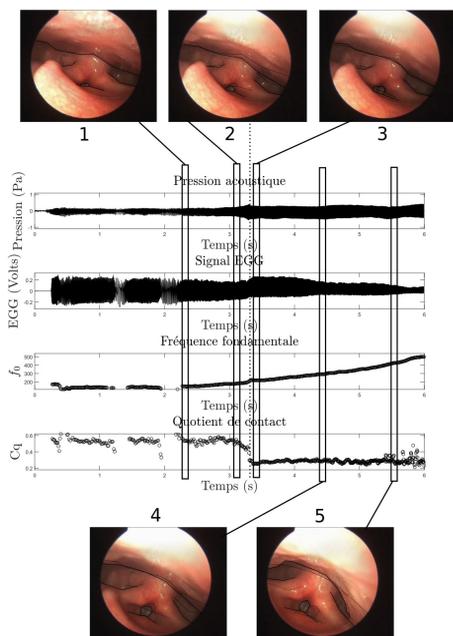


FIGURE 5: Signaux acoustique et EGG mesurés, images enregistrées, f_0 et C_q estimés lors d'un glissando ascendant sur la voyelle [u] par le sujet féminin. Les discontinuités des signaux lors des temps $t < 2.3s$ sont dus à transitions entre mécanismes M1 et M0.

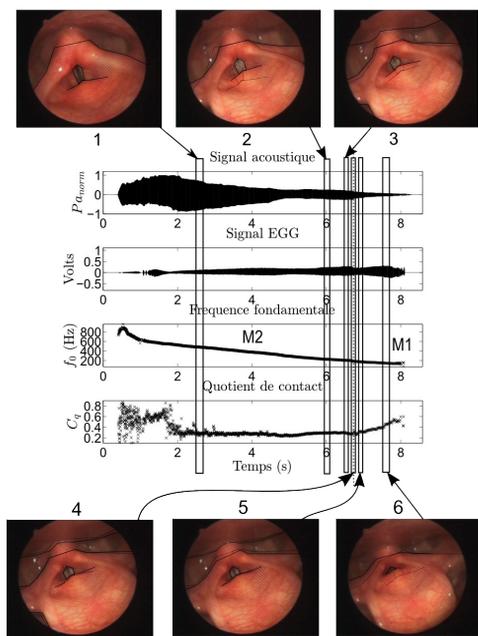


FIGURE 6: Signaux acoustique et EGG mesurés, images enregistrées, f_0 et C_q estimés lors d'un glissando descendant sur la voyelle [u] effectué par le sujet féminin. Ces estimations sont erronées pour $t < 2s$ environ.

Les images 1 à 6 de la figure 5 extraites du glissando descendant montrent que la surface visible des PV diminue de façon progressive en raison du recouvrement de l'épiglotte qui prend une place croissante dans la succession des images, comme le montrent les distances de la Table IV. Ces variations de parties visibles occupées par les PV et l'épiglotte sont dues à une descente progressive

du larynx. L'enchaînement entre les images 3 et 4, où la transition a lieu, se distingue par un rapprochement entre la paroi pharyngale et l'épiglotte. Les deux organes effectuent à ce moment un mouvement l'un vers l'autre, donnant la sensation d'un serrage laryngé tandis que les positions des PA et PV varient peu au cours de la succession entre les images 3, 4 et 5.

L'angle de vue proposé par les images tirées d'un glissement ascendant (figure 6 et Table V) confirme qu'une montée et un basculement du larynx s'effectuent progressivement au cours de la production, particulièrement dans les basses fréquences (cf images 1 et 2). Une augmentation de la surface visible des PV et un mouvement d'éloignement entre la paroi pharyngale et l'épiglotte s'effectuent également de façon continue, l'épiglotte n'est en effet presque plus visible à partir de l'image 4. Cependant, ces deux mouvements sont réalisés différemment au moment de la transition par rapport aux autres instants. La position visible des limites de la paroi pharyngale ne varie quasiment pas entre les images 2 et 3 par rapport aux autres enchaînements (les limites sur l'image 5 peuvent être mal interprétées en raison d'un changement de distance focale). L'augmentation de la surface visible des PV s'effectue entre les images 2 et 3 par l'éloignement des PA au niveau de la commissure postérieure des PV.

N° d'image	L1	L2	l3	L1/l3	L2/l3
1	137	157	45	3.0	3.45
2	144	153	43	3.32	3.51
3	119	128	54	2.18	2.35
4	121	136	52	2.31	2.60
5	90	95	48	1.90	1.98
6	72	75	56	1.30	1.34

Table IV : Longueurs en pixels et rapports de longueurs sur les images enregistrées lors du glissement descendant (figure 5) réalisé par le sujet féminin.

N° d'image	L1	L2	l3	L1/l3	L2/l3
1	71	101	39	1.82	2.59
2	84	115	45	1.87	2.55
3	100	122	53	1.89	2.30
4	130	145	60	2.17	2.42
5	145	155	62	2.34	2.5

Table V : Longueurs en pixels et rapports de longueurs sur les images enregistrées lors du glissement ascendant (figure 6) réalisé par le sujet féminin.

4 Conclusion et perspectives

Dans cette étude, la comparaison de signaux EGG avec des images du larynx a montré que les deux sujets de l'étude peuvent utiliser différents moyens de contrôle de la fréquence fondamentale pour effectuer des tâches similaires, comme l'ont illustré les exemples de glissandi. Les mouvements verticaux du larynx constituent un marqueur essentiel du changements de mécanisme pour le sujet masculin, tandis que d'autres événements de plus faible amplitude - tels que les mouvements de rapprochements et d'éloignement entre l'épiglotte et la paroi pharyngale, ou une rotation des aryténoïdes - semblent être les principaux événements se produisant lors de la transition chez le sujet féminin. Cette étude illustre par quelques exemples le problème de la variabilité des stratégies musculaires et dispositions physiologiques employées par rapport à la répétabilité des observations réalisées au niveau de la source - modification de la forme d'onde et de l'amplitude de l'EGG, de masse et de longueur vibrante. Les images enregistrées ne permettent pas d'accéder à des informations sur la longueur vibrante, la partie inférieure des plis étant recouverte par l'épiglotte. Ainsi les variations des paramètres mécaniques de contrôle qui s'effectue manifestement de façon différente d'un sujet à l'autre n'ont pu être identifiées. La notion de contrôle des mécanismes et des comparaisons de transitions contrôlées et non contrôlées n'a pas été évoquée et constitue une perspective possible à cette étude.

Références

- BAILLY L. (2009). Interaction entre cordes vocales et bandes ventriculaires en phonation : exploration in-vivo, modélisation physique, validation in-vitro. PhD thesis, Université du Maine.
- ECHTERNACH M., SUNDBERG J., MARKL M. & RICHTER B. (2010). Professional opera tenor's vocal tract configurations in registers. *Folia Phoniatica et Logopaedica*, 62(6), 278–287.
- EDMONDSON J. & ESLING J. (2006). The valves of the throat and their functioning in tone, vocal register and stress : laryngoscopic case studies. *Phonology*, 23(02), 157–191.
- GAY T., HIROSE H., STROME M. & SAWASHIMA M. (1972). Electromyography of the intrinsic laryngeal muscles during phonation. *Annals of Otolaryngology and Rhinology*, 81(3), 401–409.
- HARDEN R. (1975). Comparison of glottal area changes as measured from ultrahigh-speed photographs and photoelectric glottographs. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 18(4), 728–738.
- HENRICH N., D'ALESSANDRO C., DOVAL B. & CASTELLENGO M. (2004). On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, (3), 1321–1332.
- HENRICH N., D'ALESSANDRO C., DOVAL B. & CASTELLENGO M. (2005). Glottal open quotient in singing : Measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, (3), 1417–1430.
- HENRICH BERNARDONI N., SMITH J. & WOLFE J. (2014). Vocal tract resonances in singing : Variation with laryngeal mechanism for male operatic singers in chest and falsetto registers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1), 491–501.
- HERBST C., LOHSCHELLER J., ŠVEC J., HENRICH N., WEISSENGRUBER G. & FITCH W. (2014). Glottal opening and closing events investigated by electroglottography and super-high-speed video recordings. *The Journal of experimental biology*, 217(6), 955–963.
- HIRANO M. (1982). The role of the layer structure of the vocal fold in register control. *Vox Humana*. University of Jyväskylä, p. 50A.
- HIRANO M., OHALA J. & VENNARD W. (1969). The function of laryngeal muscles in regulating fundamental frequency and intensity of phonation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 12(3), 616–628.
- HIRANO M., VENNARD W. & OHALA J. (1970). Regulation of register, pitch and intensity of voice. *Folia Phoniatica et Logopaedica*, 22(1), 1–20.
- HONDA K. (2004). Physiological factors causing tonal characteristics of speech : from global to local prosody. In *Speech Prosody 2004*, International Conference.
- HONDA K. & MAEDA S. (2008). Glottal-opening and airflow pattern during production of voiceless fricatives : a new non-invasive instrumentation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3738–3738.
- HONDA K. & MAEDA S. (2009). Procédé et équipement non-invasif de photoélectroglottographie. WO Patent App. PCT/FR2008/000,838.
- HOWARD D. M. (1995). Variation of electrolaryngographically derived closed quotient for trained and untrained adult female singers. *Journal of Voice*, 9(2), 163–172.
- KITZING P. (1982). Photo-and electroglottographical recording of the laryngeal vibratory pattern during different registers. *Folia phoniatica*, 34, 234–241.
- ORLIKOFF R., GOLLA M. & DELIYSKI D. (2012). Analysis of longitudinal phase differences in vocal-fold vibration using synchronous high-speed videoendoscopy and electroglottography. *Journal of Voice*, 26(6), 816–e13.
- ROTHENBERG M. & MAHSHIE J. J. (1988). Monitoring vocal fold abduction through vocal fold contact area. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 31(3), 338–351.
- ROUBEAU B. (1993). Mécanismes vibratoires laryngés et contrôle neuro-musculaire de la fréquence fondamentale. PhD thesis, Université Paris-Orsay, France.
- ROUBEAU B., HENRICH N. & CASTELLENGO M. (2009). Laryngeal vibratory mechanisms : The notion of vocal register revisited. *Journal of Voice*, 23(4), 425–438.
- ŠVEC J., SCHUTTE H. & MILLER D. (1999). On pitch jumps between chest and falsetto registers in voice : Data from living and excised human larynges. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(3), 1523–1531.
- TITZE I. (1994). Principles of voice production. National Center for Voice and Speech.