



HAL
open science

Physiologie de la voix chantée: vibrations laryngées et adaptations phono-résonantielles

Nathalie Henrich Bernardoni

► **To cite this version:**

Nathalie Henrich Bernardoni. Physiologie de la voix chantée: vibrations laryngées et adaptations phono-résonantielles. 40èmes Entretiens de Médecine physique et de réadaptation, Mar 2012, Montpellier, France. pp.17-32. hal-00680692

HAL Id: hal-00680692

<https://hal.science/hal-00680692>

Submitted on 19 Mar 2012

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.

Physiologie de la voix chantée: vibrations laryngées et adaptations phono-résonnantes

Nathalie Henrich

Département Parole et Cognition, GIPSA-lab, Grenoble, France

Nous possédons chacun dès notre naissance un instrument vocal, unique et personnel. Il nous sert à nous exprimer, à communiquer avec l'autre. Il est aussi instrument de musique, aux multiples possibilités d'expression en hauteur et en timbre. Dans ce chapitre qui fait suite au chapitre sur la physiologie de la voix parlée, nous allons explorer la voix dans ses expressions musicales. Que notre voix soit parlée ou chantée, nous faisons usage du même instrument. Les différences entre voix parlée et voix chantée ne sont donc pas anatomiques. Elles proviennent du contrôle de l'instrument, de l'exploration de ses possibles, de la conscientisation de son usage. Il faudrait tout un livre pour décrire les propriétés physiologiques de l'instrument vocal en voix chantée. Nous faisons le choix ici de résumer certains aspects, à partir de la littérature et de nos recherches propres. Nous nous intéressons aux questions de contrôle de la hauteur et de gestion du timbre, en laissant de côté les aspects de physiologie respiratoire et de neurophysiologie.

1. L'instrument vocal en quelques mots

L'instrument vocal humain, illustré sur la Figure 1, est classiquement divisé en trois niveaux: un niveau respiratoire, un niveau phonatoire et un niveau articulatoire.

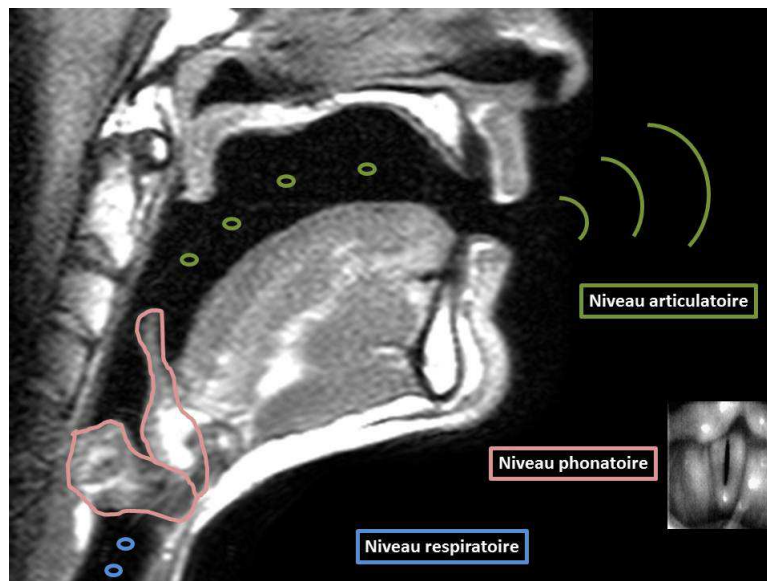


Figure 1. L'instrument vocal humain. Illustration à partir d'une coupe IRM médio-sagittale. Le niveau phonatoire est également illustré par une visualisation endoscopique du plan glottique.

1. Niveau respiratoire

L'instrument vocal humain est un instrument à vent. L'air est donc le médium essentiel à son fonctionnement. La gestion respiratoire, c'est-à-dire le contrôle de l'air en mouvement, va être de première importance dans la production des sons vocaux. En inspirant, le chanteur emplit ses poumons d'air. Ses poumons sont un réservoir d'air à volume variable, sur lequel il va pouvoir agir pour contrôler la pression d'air en entrée de l'instrument. Ce contrôle expiratoire se fait par l'action de muscles abdominaux et thoraciques, en particulier les intercostaux internes. D'autres muscles du cou et des épaules, comme les sternocleidomastoidiens et le scalenus, interviennent également dans la phase expiratoire (Pettersen, 2005). Les actions musculaires mises en jeu par le chanteur sont

spécifiques de l'intention vocal, du style de chant, de l'entraînement vocal. Le niveau respiratoire fournit une énergie aérodynamique, caractérisée par la pression et le débit d'air sous-glottique.

2. Niveau phonatoire

L'air expiré des poumons par la trachée va venir interagir avec les articulateurs du conduit vocal, en premier lieu les structures laryngées, transformant l'énergie aérodynamique en énergie mécanique et acoustique.

Production des sons voisés

Quand les plis vocaux (communément appelées *cordes vocales*) sont accolés, ils forment une constriction occlusive en sortie de la trachée. La pression d'air sous le plan glottique va augmenter, jusqu'à forcer l'ouverture glottique par décollement des plis vocaux. Ceux-ci se racolleront ensuite par l'effet d'une force de rappel élastique couplée à un effet aérodynamique de Bernouilli. La répétition de ce cycle d'ouverture-fermeture glottique entraîne une modulation périodique du débit d'air glottique, ce qui génère une onde sonore –un *son voisé*– composée d'une fréquence fondamentale (f_0) et de ses harmoniques ($H_n = nf_0$). La fréquence fondamentale de cette onde sonore est la fréquence de vibration des plis vocaux.

Production des sons non-voisés

Quand les plis vocaux sont largement écartés, l'air passe à travers l'espace glottique sans interaction. Il va ensuite à l'encontre d'autres structures, au niveau du larynx (plis vestibulaires, épiglotte), des cavités buccale et nasale (e.g. le velum, le palais, la langue, les dents, ...). Chaque interaction entre le flux d'air et une structure du conduit vocal va générer une onde sonore, dont les propriétés acoustiques dépendent du type d'interaction et de la configuration géométrique du conduit. Ainsi les sons des fricatives sourdes (non-voisées) proviennent des turbulences générées par le passage de l'air dans une constriction formée par des articulateurs (langue, dents ou lèvres).

3. Niveau articuloire

Les ondes sonores générées dans le conduit vocal ont des composantes fréquentielles qui vont être amplifiées ou atténuées selon les propriétés acoustiques du conduit vocal. Ces propriétés dépendent de la position des articulateurs et des conditions aux limites en entrée (niveau glottique) et en sortie (rayonnement aux lèvres et aux narines) du conduit vocal. La position des articulateurs impacte fortement les fréquences et les largeurs de bande des résonances acoustiques du conduit vocal. Nous l'illustrons sur la Figure 2, qui schématise le lien entre positionnement articuloire et fréquence des deux premières résonances.

4. Adaptations pneumo-phono-résonantielles

Ces différents niveaux de l'instrument vocal sont en interaction les uns avec les autres. Produire un son vocal chanté nécessite de trouver un bon équilibre entre expiration, phonation et articulation. La gestion de la pression d'air sous-glottique est essentielle pour la mise en auto-oscillation des plis vocaux. Néanmoins, le facteur déterminant pour cette oscillation n'est pas la pression sous-glottique elle-même, mais la différence entre la pression sous-glottique et la pression supra-glottique (pression aérodynamique au-dessus du plan glottique). Bouche ouverte et en l'absence de constriction dans le conduit vocal, la pression supra-glottique s'égalise à la pression atmosphérique.

Nous allons à présent décrire les caractéristiques physiologiques des vibrateurs laryngés et les mécanismes de contrôle de la hauteur tonale de la voix.

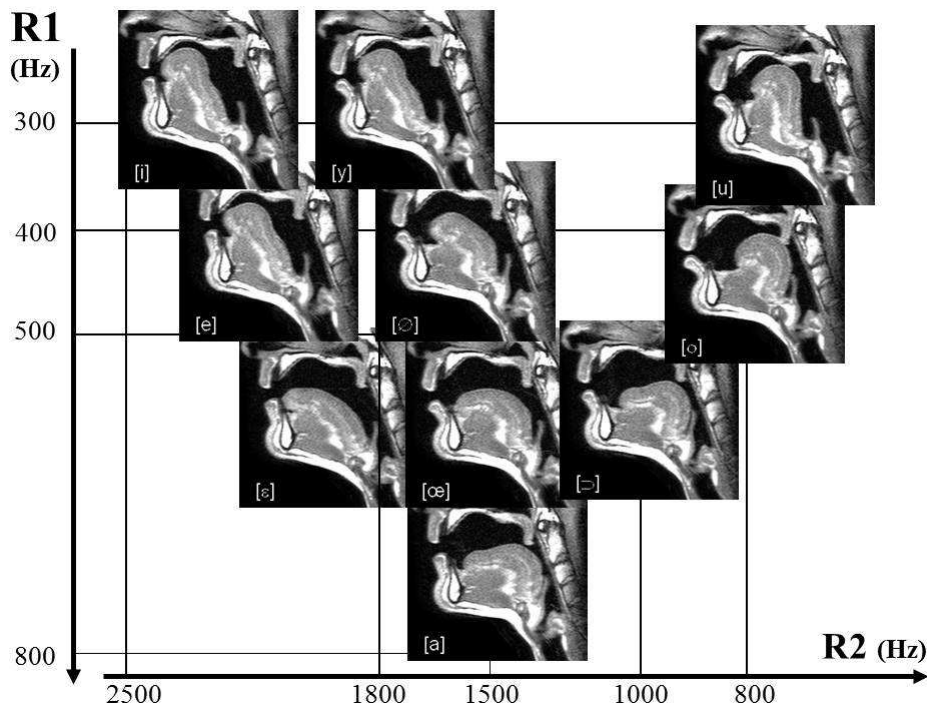


Figure 2. Schéma de l'espace vocalique pour les voyelles orales du Français. Les fréquences des deux premières résonances (R1 et R2) exprimées en Hz ne sont qu'indicatives (elles ne sont pas estimées à partir des images IRM). Le sujet est allongé pendant l'acquisition des images, ce qui rajoute un effet de la force de pesanteur sur les articulateurs (en particulier la langue).

2. Physiologie des vibrateurs laryngés en voix chantée

1. Vibration glottique

Le pli vocal : une structure multicouche

Schématisés sur la Figure 3, les plis vocaux présentent une structure multicouche (Lacau St Guily et Roubeau, 1994). La couche profonde des plis est constituée des fibres musculaires du chef interne du muscle thyro-aryténoïdien. La couche moyenne des plis, ou lamina propria, est constituée d'un tissu conjonctif sous-muqueux, composé principalement de fibres collagènes dans sa partie profonde, de fibres élastiques dans sa partie intermédiaire, et d'une substance amorphe et lâche, pauvre en fibres, dans sa partie superficielle. La couche superficielle des plis est une couche muqueuse, l'épithélium. Les plis vocaux possèdent des caractéristiques biomécaniques qui en font de bons vibrateurs. Les principaux paramètres biomécaniques qui influencent fortement leur comportement physiologique sont la longueur vibrante des plis, leur masse vibrante et leur raideur. La raideur ou rigidité des plis dépend des actions agonistes et antagonistes exercées sur les plis par les muscles laryngés intrinsèques, en particulier le muscle thyro-aryténoïdien (le muscle vocal, TA), les muscles inter-aryténoïdiens (IA), et les muscles crico-thyroïdiens (CT).

Mécanismes physiologiques de contrôle de la hauteur tonale de la voix

Plusieurs mécanismes peuvent être utilisés pour augmenter la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux.

- *augmentation de la pression sous-glottique et du débit d'air glottique*
Les expériences menées sur des larynx excisés montrent un lien direct entre la fréquence fondamentale de vibration des plis vocaux et les paramètres aérodynamiques de pression et de débit d'air sous-glottique (Garrel, 2007). En l'absence d'autres contrôles laryngés musculaires ou mécaniques, la fréquence de vibration augmente quand la pression ou le débit augmentent.
- *contraction thyro-aryténoïdienne*

En se contractant, le muscle vocal augmente la raideur du système, et donc la fréquence de vibration des plis.

- *bascule crico-thyroïdienne*

La contraction des muscles crico-thyroïdiens entraîne une bascule du cartilage thyroïde par rapport au cartilage cricoïde. Cette bascule allonge les plis, ce qui entraîne une augmentation de la fréquence fondamentale par augmentation de la raideur et diminution de la masse vibrante.

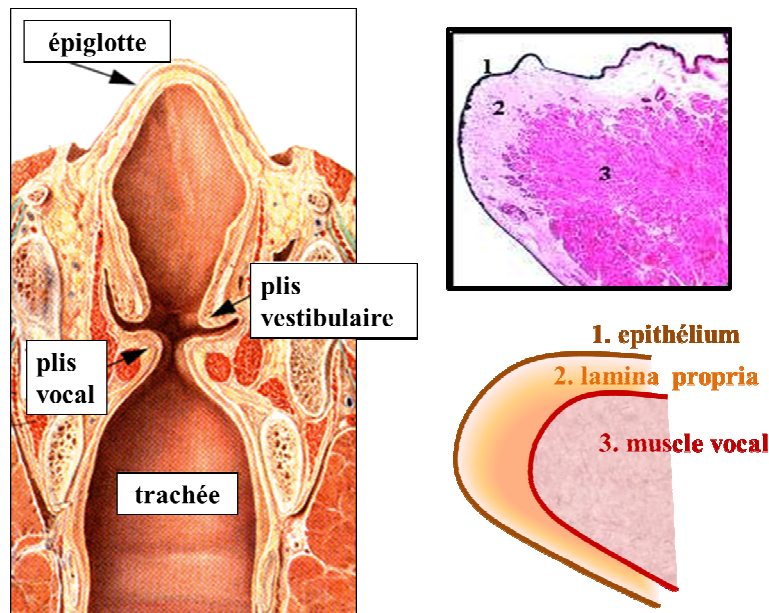


Figure 3: Schéma du conduit laryngé en coupe coronale (à gauche) et de la structure multicouche du pli vocal (en bas à droite). La vue en haut à droite provient de la coupe d'un pli vocal plastiné.

2. Les mécanismes laryngés

La structure multicouche des plis vocaux permet un ajustement des contraintes de longueur, de raideur, et d'épaisseur dans l'usage du vibrateur laryngé. Nous pouvons donc distinguer quatre mécanismes laryngés, utilisés dans la parole et le chant, par les hommes et les femmes, pour produire une large étendue en fréquence (Roubeau, 1993 ; Henrich, 2006 ; Roubeau et al., 2009). Les Figures Figure 4, Figure 5, Figure 6 et Figure 7 illustrent la vibration glottique pour des productions vocales dans chacun de ces quatre mécanismes laryngés, à partir d'images obtenues par cinématographie ultra-rapide sur un sujet masculin. Les séquences présentées sont de durées identiques (6,75ms, ce qui correspond à 27 images - la vitesse d'acquisition de la caméra est de 4000 images/s). Cette durée permet de visualiser au moins un cycle d'ouverture-fermeture glottique complet, sauf dans le cas du mécanisme M0 où une partie de la phase fermée n'est pas présentée.

Mécanisme laryngé M0

Le mécanisme qui permet de produire les sons les plus graves, perçus comme impulsionnels, est le mécanisme laryngé M0. Il est synonyme de « vocal fry », « strohbass ». Dans ce mécanisme, les plis vocaux sont relâchés, très courts et très épais. Les phases de contact sont longues. Les activités musculaires des muscles TA, CT et IA sont minimales.

Mécanisme laryngé M1

Ce mécanisme est utilisé en voix chantée pour produire les sons du grave au médium, sur une tessiture moyenne de Ré1 à Sol3 chez les chanteurs et Ré2 à Sol3 chez les chanteuses (Roubeau et al., 2004). Il est synonyme de « mécanisme lourd ». Certains chanteurs l'utilisent de façon quasi exclusive (la voix de poitrine des basses, barytons et ténors), alors que certaines chanteuses n'en

font pas (ou peu) usage (en particulier les sopranes). Dans ce mécanisme, les plis vocaux restent courts et épais. L'activité musculaire du TA s'accroît par rapport à celle observée en M0. L'ensemble du pli vocal participe à la masse vibrante en action, avec une différence de phase dans l'ouverture verticale des plis.

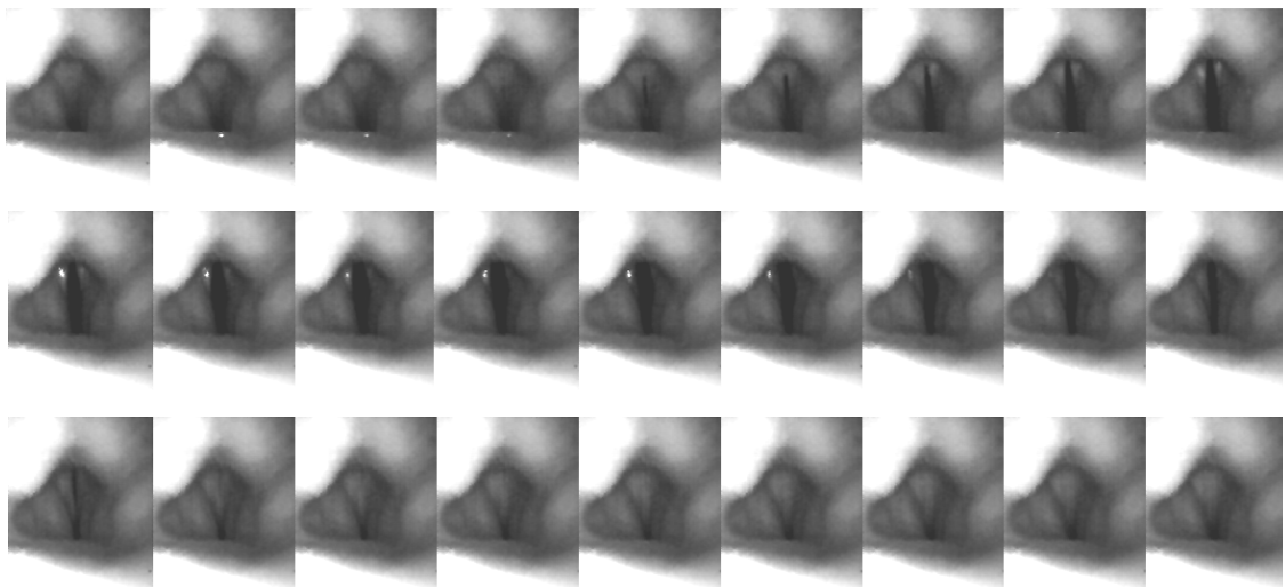


Figure 4: Visualisation par cinématographie ultra-rapide d'un son produit en mécanisme M0. La durée de la séquence est de 6,75 ms pour une vitesse d'acquisition de 4000 images/s. Sur cette durée plus courte que celle d'un cycle glottique, la séquence montre la phase ouverte glottique dans sa totalité, et une partie de la phase fermée.

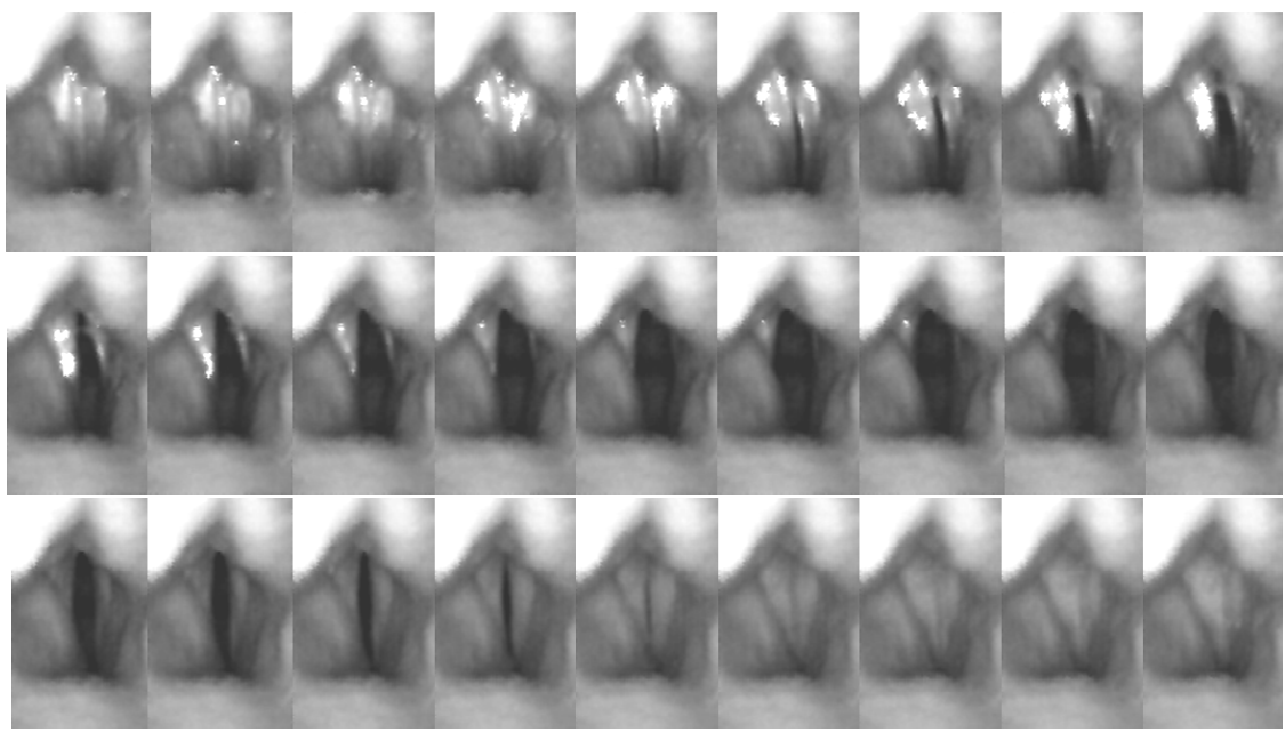


Figure 5: Visualisation par cinématographie ultra-rapide d'un son chanté en mécanisme M1. Séquence de 6,75 ms à 4000 images/s.

Mécanisme laryngé M2

Ce mécanisme est utilisé en voix chantée pour produire les sons du médium à l'aigu, sur une tessiture moyenne de Mi2 à Fa4 chez les chanteurs et Fa#2 à Si4 chez les chanteuses (Roubeau et al., 2004). Ce mécanisme se distingue du M1 par un découplage des structures internes des plis, le

muscle vocal (TA) ne participant alors plus à la masse vibrante en action. L'activité musculaire du TA décroît au profit de celle du CT, dont l'action étire les plis. Les plis vocaux sont alors plus longs et moins épais qu'en M1. Leur masse vibrante est réduite par rapport au M1. Synonyme de « mécanisme léger », ce mécanisme est utilisé pour produire la voix de tête, la voix de fausset.

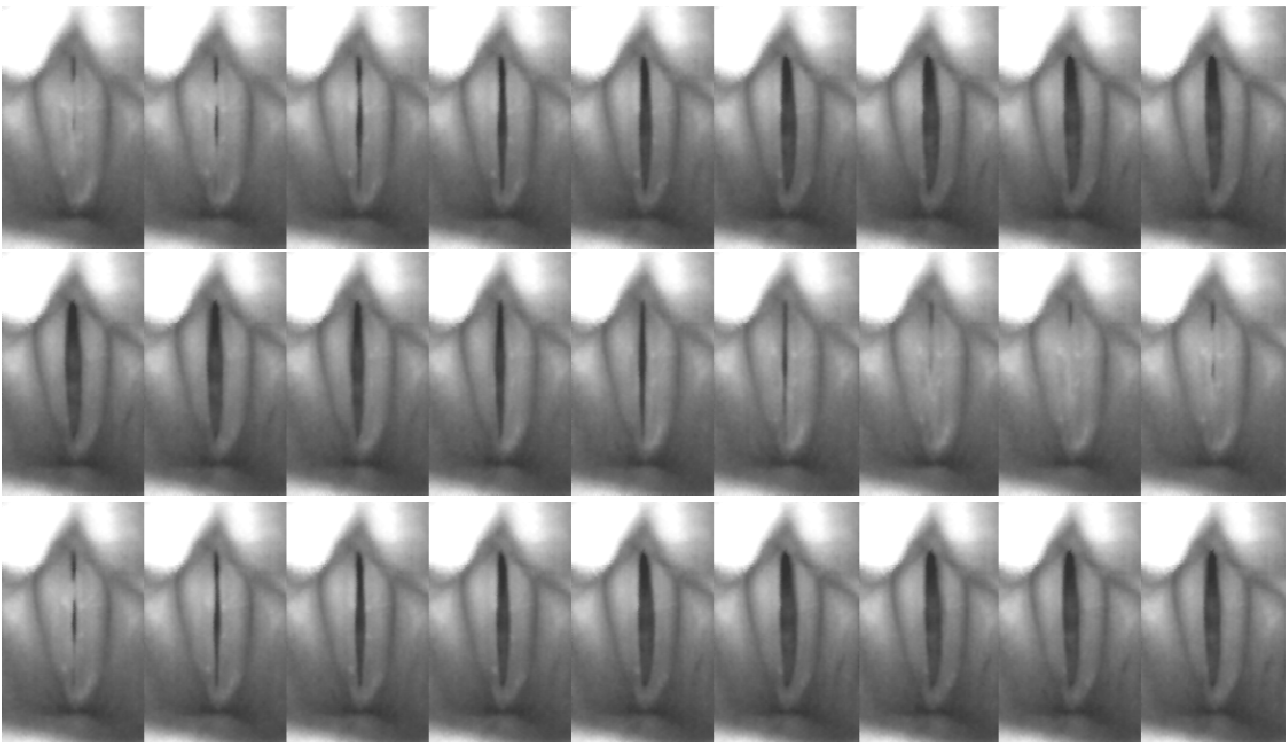


Figure 6: Visualisation par cinématographie ultra-rapide d'un son chanté en mécanisme M2. Séquence de 6,75 ms à 4000 images/s.

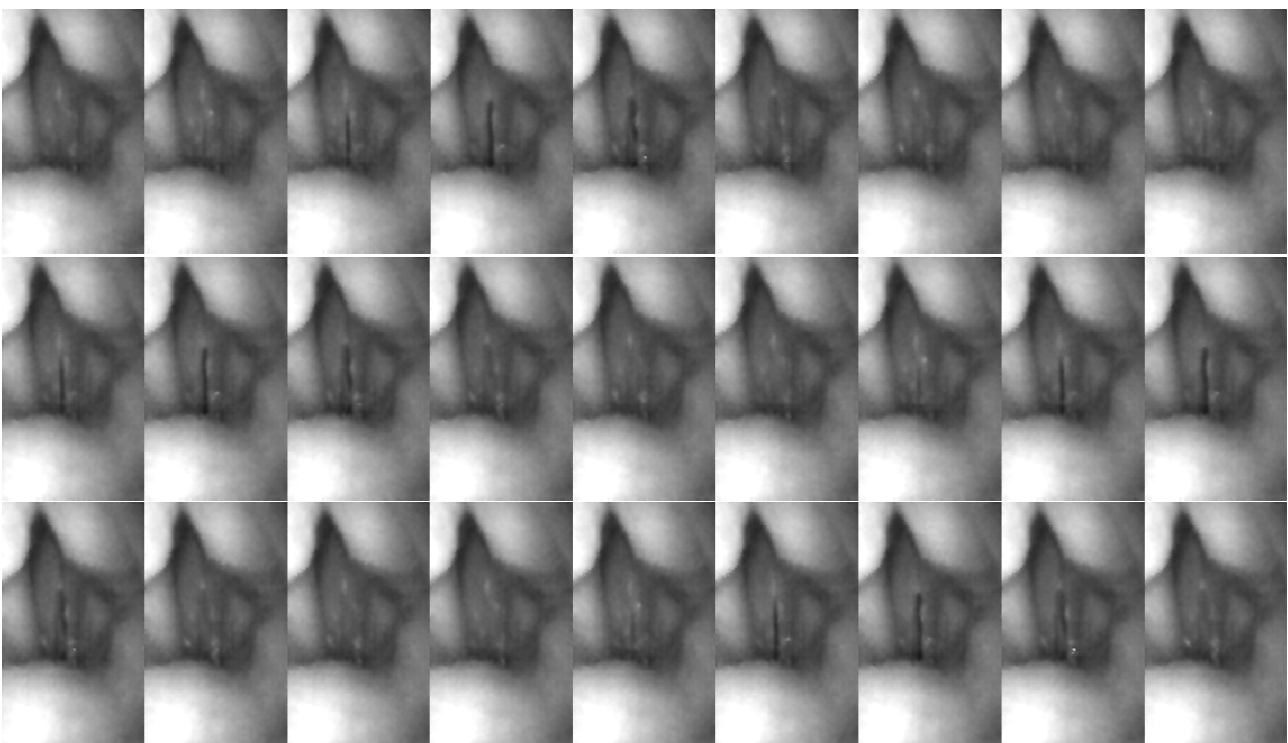


Figure 7: Visualisation par cinématographie ultra-rapide d'un son chanté en mécanisme M3. Séquence de 6,75 ms à 4000 images/s.

Mécanisme laryngé M3

Ce mécanisme permet de produire les sons les plus aigus. Mal connu et peu étudié, son usage dans

le chant reste sujet à discussion (Garnier et al, 2012). Il se caractérise par des plis vocaux très tendus, très fins. La vibration glottique est parfois limitée à une partie des plis, ainsi que l'illustre la séquence cinématographique présentée en Figure 7. Dans certains cas, la vibration glottique n'est ni mesurable par des techniques non-invasives telle que l'électroglottographie, ni visualisable par l'imagerie endoscopique. On peut alors se questionner sur l'origine physique de la source sonore.

3. Pression sous-glottique, intensité, hauteur et contact glottique

Produire un son vocal chanté requiert un équilibre entre différentes forces physiques caractérisant le système : les forces aérodynamiques de pression et de débit d'air, les forces biomécaniques structurant les plis vocaux, les forces acoustiques de charge et de propagation au sein des cavités. Les paramètres aérodynamiques, mécaniques et acoustiques interagissent dans la recherche de cet équilibre, et ils impactent directement la hauteur du son produit et son intensité rayonnée en sortie des lèvres. Nous allons à présent décrire quelques-unes de ces interactions.

Pression sous-glottique et intensité vocale

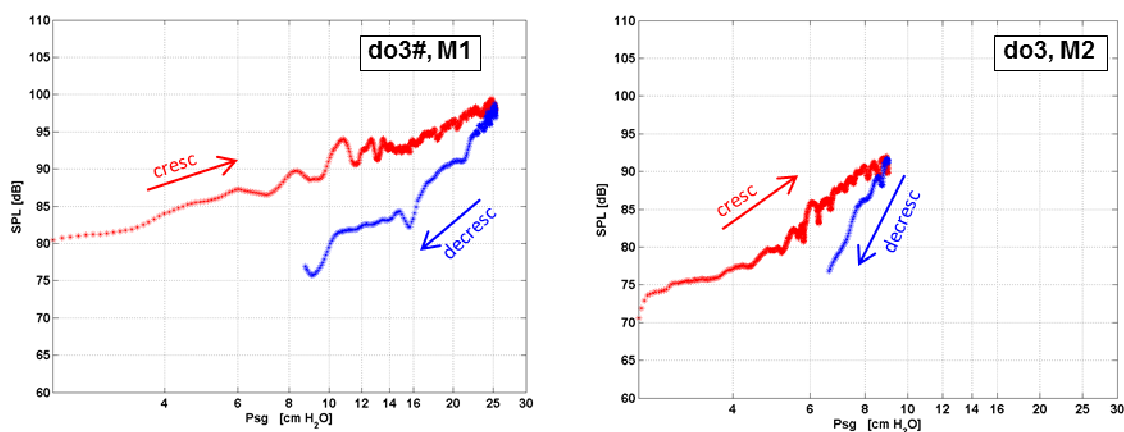


Figure 8 : Lien entre pression sous-glottique et intensité vocale lors d'un son filé (*crescendo-decrescendo*) produit par un chanteur en M1 (Do3#) et M2 (Do3). Le niveau sonore est mesuré à 30cm des lèvres du chanteur (dB@30cm).

L'intensité vocale est une fonction croissante de la pression sous-glottique appliquée en entrée de l'instrument vocal. Pour illustration, nous présentons sur la Figure 8 la variation d'intensité vocale en sortie des lèvres en fonction du logarithme de la pression sous-glottique mesurée par ponction trachéale sur un sujet chanteur lors de la production d'un son filé dans les deux mécanismes principaux (M1 et M2). Nous observons une relation linéaire entre ces deux variables, dont la pente varie néanmoins selon la partie crescendo ou decrescendo du son produit. Cela illustre donc tout à la fois le lien fort qu'il existe entre pression sous-glottique en entrée et intensité vocale en sortie du système, mais également l'influence d'autres paramètres mécaniques et acoustiques sur cette corrélation.

Pression sous-glottique et fréquence fondamentale

Quand nous parlons fort, nous avons tendance à parler plus aigu. Mais dans le chant, le chanteur est capable d'augmenter son intensité vocale (et donc sa pression sous-glottique) sans changer la fréquence fondamentale du son produit. C'est en particulier le cas des sons filés (crescendos-decrescendos) sur une note tenue. Nous pourrions donc supposer que pression sous-glottique et fréquence fondamentale ne sont pas liées en voix chantée. Pourtant, ces deux paramètres sont globalement corrélés en voix chantée comme en voix parlée (Titze, 1989 ; Titze & Sundberg, 1992). Pour permettre la mise en auto-oscillation des plis vocaux, la pression d'air exercée sur la constriction glottique doit dépasser un seuil, la pression de seuil phonatoire (Titze, 1992). Cette valeur seuil de pression dépend de la raideur des plis vocaux. Quand la fréquence fondamentale de

vibration des plis vocaux s'accroît par augmentation de la raideur, la pression de seuil phonatoire s'élève, et donc la pression sous-glottique nécessaire à la phonation augmente. Cette corrélation varie en fonction du mécanisme laryngé employé. En M1, les variations de fréquence fondamentale en fonction de la pression sous-glottique sont de l'ordre de 1 à 3 Hz/cmH₂O dans le bas de la tessiture du chanteur, et de 2 à 6 Hz/cmH₂O dans le haut de la tessiture. En M2, ces variations sont plutôt de l'ordre de 5 à 10 Hz/cmH₂O (Titze, 1989).

Pression sous-glottique et durée du contact glottique

La Figure 9 illustre sur un exemple chanté l'évolution du quotient de contact glottique (i.e. le rapport entre la durée du contact glottique et la durée du cycle glottique) en fonction de la pression sous-glottique. Notons que ce quotient dépend des ajustements biomécaniques des plis. Il ne résulte pas directement et de façon linéaire d'une augmentation de la pression sous-glottique. Ces ajustements dépendent du mécanisme laryngé utilisé par le chanteur. Deux tendances opposées sont observées sur cet exemple. En mécanisme M1, la durée du contact augmente avec l'augmentation de pression sous-glottique, avec néanmoins un effet de seuil en début et fin de phonation, ainsi qu'à l'aboutissement de la partie crescendo. En mécanisme M2, la durée relative du contact diminue avec l'augmentation de pression sous-glottique.

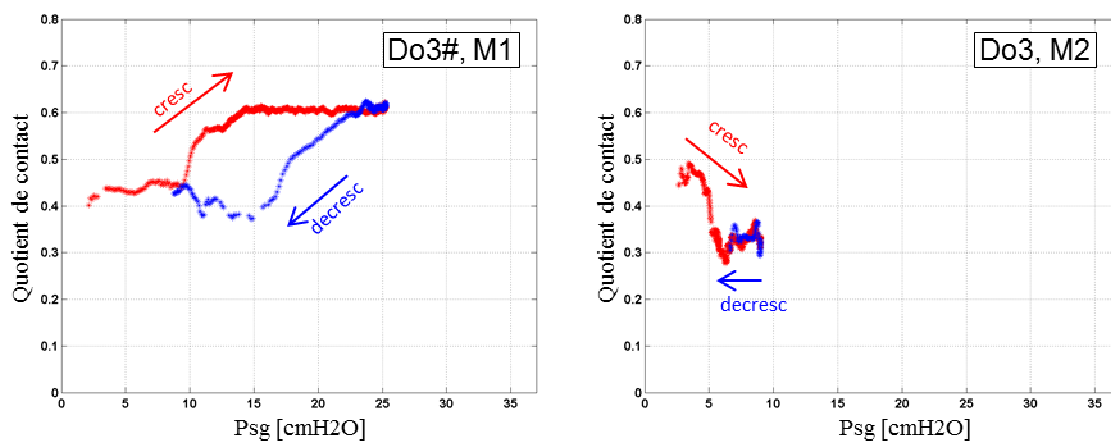


Figure 9 : Lien entre pression sous-glottique et quotient de contact lors d'un son filé (crescendo-decrescendo) produit par un chanteur en M1 (Do3#) et M2 (Do3). Le quotient de contact est mesuré sur le signal DEGG comme le rapport entre la durée du contact glottique et la durée du cycle glottique.

Contact glottique, intensité vocale et fréquence fondamentale

La relation entre le contact glottique, l'intensité vocale et la fréquence fondamentale est fonction du mécanisme laryngé que le chanteur emploie (Henrich, 2001 ; Henrich et al., 2005). En mécanisme M1, le quotient de contact est directement corrélé à l'intensité vocale : plus le chanteur chante fort, plus le temps de contact des plis vocaux est important relativement à la durée du cycle glottique. En mécanisme M2, il est le plus souvent corrélé à la fréquence fondamentale : dans le cas de glissandos, le quotient de contact augmente avec la fréquence.

4. Vibration vestibulaire

D'autres structures que les plis vocaux peuvent potentiellement entrer en vibration : les plis vestibulaires, les replis ary-épiglottiques, la luette, la langue, le velum, les lèvres, ... Nous allons nous intéresser ici au second vibreur laryngé que constituent les plis vestibulaires. Encore appelées *bandes ventriculaires* ou *fausses cordes vocales*, ces structures d'apparence similaire aux plis vocaux possèdent des caractéristiques biomécaniques propres. Leur structure interne est très hétérogène et moins élaborée que celle des plis vocaux : un tissu muqueux, un tissu cellulaire sous-muqueux lâche et abondant, constitué de fibres collagènes, de fibres élastiques et de glandes muqueuses, parfois des fibres musculaires de densité variable et pouvant provenir de trois faisceaux distincts (Bailly, 2009). Leurs caractéristiques biomécaniques en font *a priori* de pauvres vibreurs

(Haji et al., 1992). Néanmoins, cette structure laryngée supra-glottique participe à certains gestes phonatoires, en particulier en voix chuchotée, en voix criée, et en voix chantée. Un cycle vibratoire vestibulaire est illustré sur la Figure 10. Dans le chant, l'usage des plis vestibulaires peut faire partie intégrante de la technique vocale mise en œuvre.

Chant diphonique : style Kargyraa du Khöömij

Ce style de chant est pratiqué en Asie Centrale et dans le Sud de la Sibérie (Mongols, Touvains, Tibétains, ...), dans le cadre des techniques de chant diphonique encore appelées *Chants de gorge*. Le chanteur produit un son de très basse fréquence fondamentale (de l'ordre de 50-60 Hz). Ce bourdon très grave accompagne généralement un chant basé sur la sélection énergétique d'harmoniques de fréquence élevée (Levin et Edgerton, 1999 ; voir Partie 3.3). Dans les rares études qui présentent une observation laryngée directe sur des chanteurs de Khöömij (Lindestad et al., 2001 ; Sakakibara et al., 2001 ; Sakakibara, 2003), la période du mouvement vibratoire vestibulaire est double de celle des plis vocaux, et elle correspond à la fréquence fondamentale du son produit. On appelle ce phénomène le « doublement de période ».

Chant polyphonique traditionnel de Sardaigne : la voix du Bassu

Cet usage des plis vestibulaires pour produire des sons très graves se retrouve de façon similaire dans le chant polyphonique traditionnel *A Tenore* de Sardaigne. Quatre chanteurs unissent leur voix dans un quatuor polyphonique pour fusionner leurs timbres, et faire éventuellement émerger une cinquième voix, la *Quintina* (Lortat-Jacob B., 1993, 1998). Dans ce quatuor, la voix la plus grave est produite par le *Bassu*, à des fréquences de l'ordre de Mi1 (84 Hz) – Fa#1 (92 Hz) (Henrich et al., 2006). La production d'un *Bassu* est présentée sur la Figure 10. Les bords libres des plis vestibulaires sont proches, et ils entrent en vibration en interaction aérodynamique avec les plis vocaux (Bailly, 2009 ; Bailly et al., 2010). Ils s'accolent sur tout ou partie de leur longueur tous les deux cycles glottiques, ce qui contribue à la production d'un son de fréquence très basse. Leur accollement se fait pendant une phase d'ouverture glottique, ce qui affecte directement l'ouverture glottique en prolongeant la durée de la phase ouverte (Bailly, 2009 ; Bailly et al., 2010).

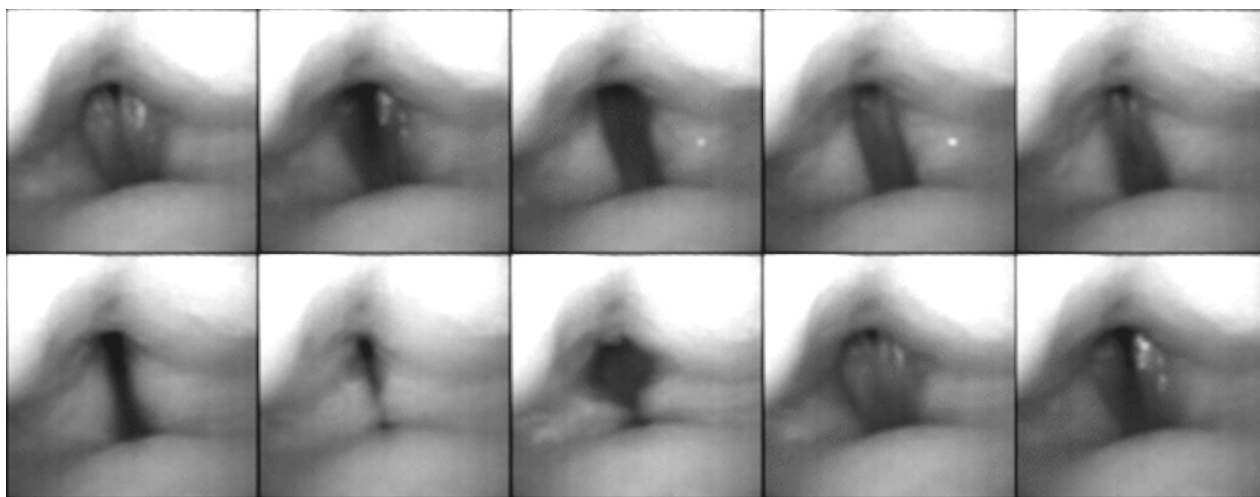


Figure 10: Illustration d'un cycle vibratoire vestibulaire dans le chant du Bassu. Pendant la durée du cycle vibratoire, nous observons deux cycles vibratoires glottiques d'ouverture-fermeture. Les plis vestibulaires s'accolent pendant une phase d'ouverture des plis vocaux. Les images ont été prises par cinématographie ultra-rapide, à une vitesse de 500 images par seconde.

3. Adaptations phono-résonnantes

Comme nous l'avons vu en première partie, la source glottique produit une série harmonique de fréquences. Ces fréquences vont être amplifiées par les résonances du conduit vocal. Les fréquences harmoniques qui ne se trouvent pas à proximité d'une fréquence de résonance du conduit vocal vont

être atténuées, et elles ne rayonneront pas de façon efficace vers le milieu extérieur. Le chanteur, qui est en recherche d'une intensité sonore, d'un timbre, d'une esthétique pour s'exprimer, est amené à travailler l'équilibre entre la génération de l'onde acoustique par vibration laryngée, sa propagation dans les cavités de résonance, et son rayonnement vers le milieu extérieur et des auditeurs potentiels. Il modèle et adapte la géométrie de son conduit vocal par un contrôle précis de ses articulateurs. Dans cette partie, nous décrivons quelques adaptations que le chanteur peut mettre en place selon la hauteur de la note chantée ou le timbre recherché. Nous nous intéressons à l'accord phono-résonantiel entre les deux premières résonances du conduit vocal, R_1 et R_2 , et les fréquences des premiers harmoniques ($H_1=f_0$, $H_2=2f_0$, ...).

1. Accord $R_1:f_0$, une adaptation induite par l'acoustique

La stratégie d'adaptation phono-résonantielle mise en œuvre par le chanteur peut être liée à des contraintes acoustiques de production vocale. Ainsi, la proximité avec la première fréquence de résonance du conduit vocal est essentielle pour transmettre efficacement les premiers harmoniques, eux qui contribuent le plus à l'intensité vocale produite.

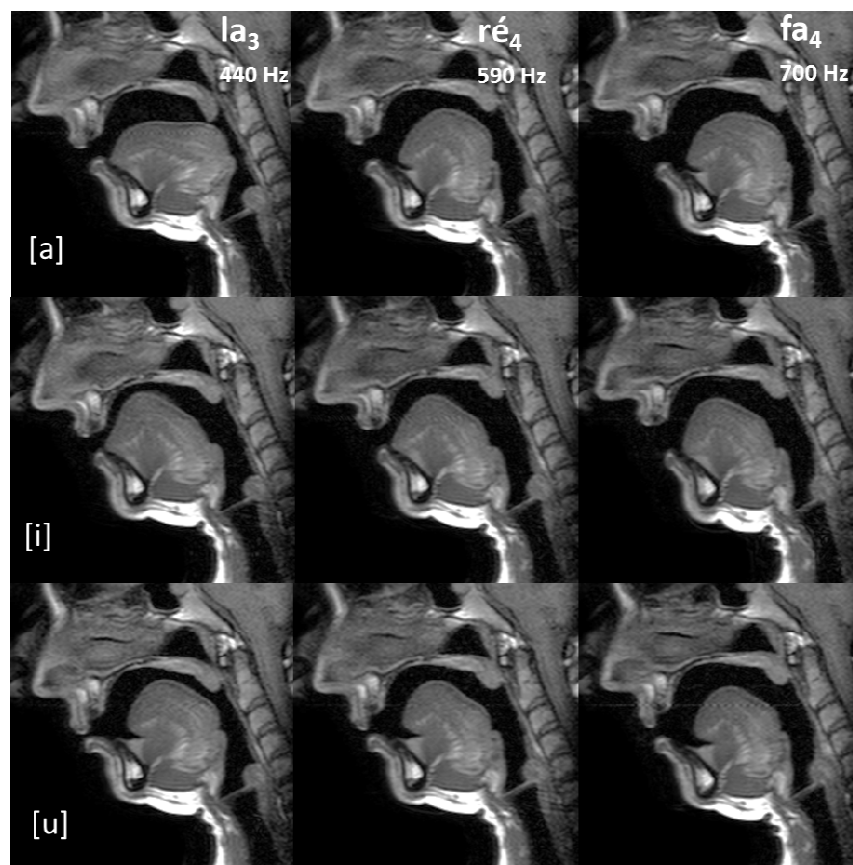


Figure 11: Illustration par IRM de la configuration articuloire lors d'une montée en fréquence. Cas d'une chanteuse allongée chantant des notes tenues à différentes hauteurs et pour différentes voyelles.

La fréquence de la première résonance du conduit vocal (R_1) est dépendante de la position des articulateurs, position qui varie selon la voyelle émise. Comme l'illustre la Figure 2, la fréquence de R_1 en voix parlée varie en moyenne entre 300 Hz et 800 Hz. Si l'on reporte cette fréquence sur une portée musicale, la fréquence de R_1 est située à proximité du Mi_3 (330 Hz) pour les voyelles fermées [i], [y] et [u], et à proximité du Sol_4 (793 Hz) pour la voyelle ouverte [a]. En voix parlée, la hauteur des sons vocaux reste en-deçà de R_1 , même pour les voyelles les plus fermées. En voix chantée, par contre, il n'est pas rare de produire des hauteurs proches du Mi_3 ou supérieures, comme dans le cas de l'aigu des voix de femme. Le chanteur doit alors adapter son geste vocal pour maintenir la fréquence de la première résonance R_1 à proximité du premier harmonique (f_0). C'est en particulier le cas des voix de sopranes (Joliveau et al., 2004 ; Garnier et al., 2010 ; Henrich et al.,

2011), pour lesquelles on observe un ajustement de la fréquence de la première résonance dès lors que la note chantée est à une hauteur voisine de R1. Ainsi que l'illustre la Figure 11, les chanteuses arrivent à maintenir la fréquence de R1 à proximité de H1 (accord R1:f₀) en ouvrant la bouche et en abaissant la mâchoire (Sundberg & Skoog, 1997, Garnier et al., 2010). Cet accord résonantiel est observé principalement sur la gamme de fréquence 600-1000 Hz (Joliveau et al., 2004). Pour certaines sopranos, il peut se poursuivre jusque dans l'extrême aigu (Mi₅ à Fa#₆, ~1300-1500 Hz).

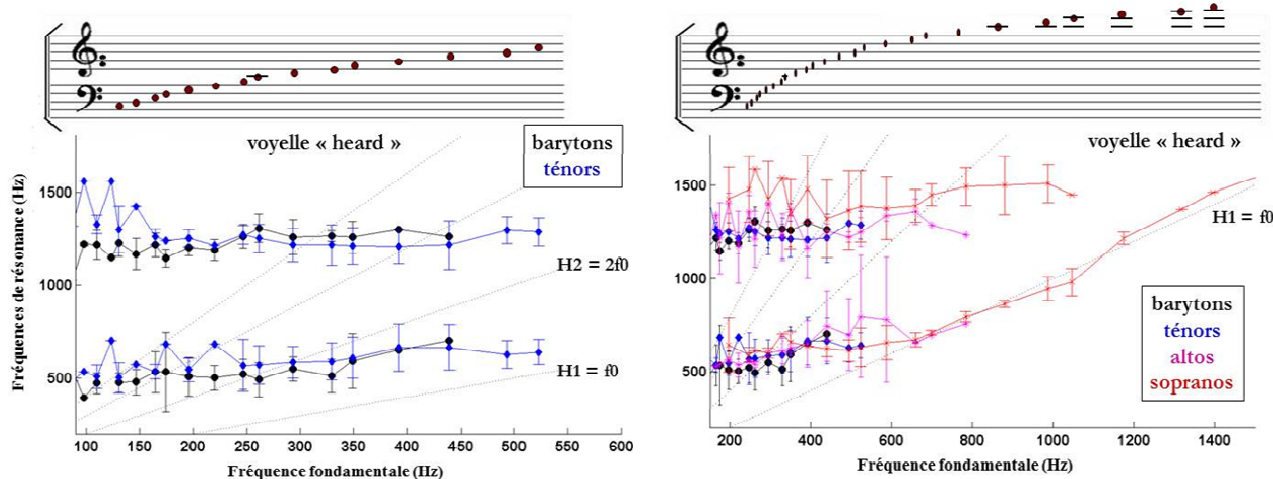


Figure 12: Fréquence des deux premières résonances R1 et R2 en fonction de la hauteur chantée dans le cas de la voyelle du mot « heard ». Les données correspondent à des valeurs moyennes mesurées sur une base de données de 22 chanteurs classiques et répartis par tessiture (basses, ténors, altos, sopranos).

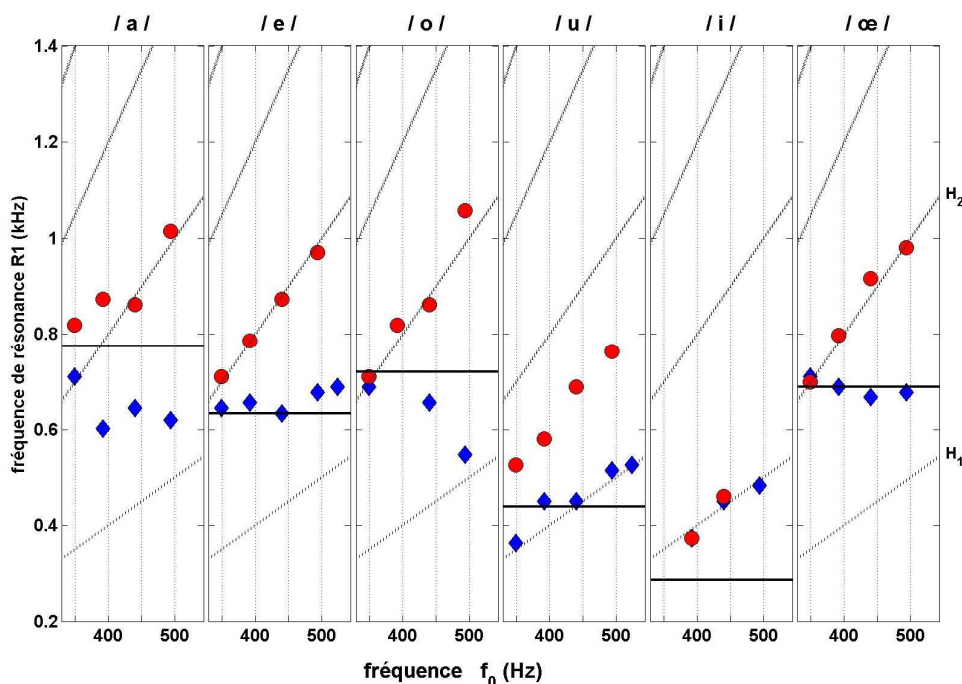


Figure 13: Variations de la fréquence de la première résonance en fonction de la hauteur chantée pour les six voyelles du Bulgare. La chanteuse a chanté des notes tenues dans deux styles : style Bulgare (rond rouge) et style classique en voix de tête (losange bleu). La fréquence de R1 mesurée en voix parlée est indiquée par une barre noire horizontale pour chaque voyelle. Les droites ascendantes en pointillés représentent les lignes harmoniques ($H_n = nf_0$).

2. Accord R₁:2f₀, une adaptation induite par le style

L'adaptation phono-résonantielle peut être induite par la recherche d'un timbre particulier, sans qu'il y ait une nécessité physio-acoustique à cette adaptation. On retrouve dans de nombreux styles de chant (musiques actuelles, voix du monde) le choix d'une production vocale très sonore et très timbrée. C'est le cas, par exemple de la voix féminine Bulgare (Henrich et al., 2007) ou des chanteurs et chanteuses de « Belting » (Bourne et Garnier, 2012). Les études récentes de ces

productions vocales ont montrées que ces chanteurs et chanteuses présentaient de façon quasi-systématique un accord phono-résonnant entre la première résonance et le second harmonique (accord $R_1:2f_0$). La Figure 13 illustre cette adaptation dans le cas de la voix féminine Bulgare. Pour la plupart des voyelles, exception faite du [i] et du [u] qui ont une fréquence de résonance R1 basse et proche du premier harmonique, la chanteuse adapte son conduit vocal pour accorder la première fréquence de résonance au second harmonique. Cette stratégie n'est pas observée dans le chant classique, ainsi que l'illustre cette chanteuse, capable de chanter dans les deux styles (chant Bulgare et chant classique).

3. Accord $R_2:nf_0$, le chant des harmoniques

Nous venons de voir des stratégies phono-résonnantes d'accord entre la fréquence de la première résonance R1 et les harmoniques de la source vocale. Nous allons à présent discuter brièvement de l'adaptation phono-résonnante de la fréquence de la seconde résonance R2. Dans le chant lyrique, ainsi que l'illustre la Figure 12, la fréquence de R2 est maintenue relativement constante en moyenne, sur l'ensemble de la tessiture des chanteurs basse, barytons, ténors et altos. Néanmoins, des accords entre R2 et des harmoniques de rangs élevés ($R_2:5f_0$, $R_2:4f_0$, $R_2:3f_0$) peuvent être ponctuellement observés (Henrich et al., 2011). Dans le cas de la voix de sopranes, un accord entre R2 et le second harmonique ($H_2=2f_0$) est souvent observé dans une partie de la tessiture, accompagnant l'accord $R_1:f_0$ (Garnier et al., 2010, Henrich et al., 2011). Dans l'extrême aigu de la voix de soprane, la seconde résonance R2 peut prendre la relève de R1 et être ajustée au premier harmonique (accord $R_2:f_0$) par certaines chanteuses pour maintenir l'accord avec f_0 (Garnier et al., 2010).

Dans le chant diphonique, mentionné précédemment, le chanteur produit une mélodie qui se superpose à la mélodie tonale, indépendamment du comportement vibratoire laryngé (vibration vestibulaire ou non). Cette mélodie est dite « spectrale », pour préciser le fait que la hauteur perçue n'est plus la fréquence de vibration d'une structure dans le conduit vocal, mais le fait d'un renforcement spectral de l'énergie acoustique d'un harmonique. Le chanteur ajuste la fréquence de R2 à la fréquence du l'harmonique qu'il souhaite renforcer, en modifiant la forme de sa cavité buccale à l'aide de sa langue. La Figure 14 présente une analyse de la répartition spectrale de l'énergie acoustique sur les différentes fréquences présentes dans la voix, dans le cas d'un exemple chanté sur une note tenue. La fréquence fondamentale est maintenue constante (Sol2, 196 Hz). La résonance R1 renforce principalement le second harmonique (maintenu constant vers 400 Hz). La résonance R2 est ajustée pour renforcer successivement les harmoniques H_5 à H_{12} , situés entre 1000 et 2500 Hz.

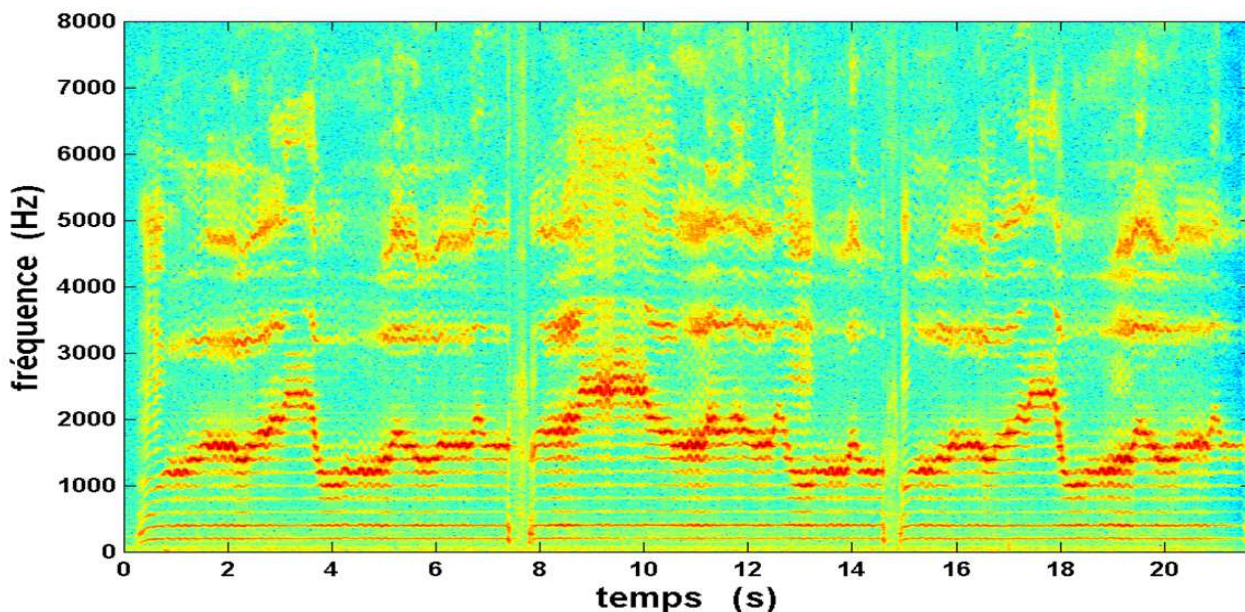


Figure 14 : Analyse temps-fréquence d'une phrase extraite d'un chant diphonique.

Conclusion

Nous avons illustré dans ce chapitre quelques aspects de la physiologie de la voix chantée. Le chanteur joue avec les possibilités et les contraintes physiologiques de son instrument : choix du mécanisme laryngé, contrôle neuro-musculaire des mouvements laryngés et articulatoires, gestion aérodynamique de la pression d'air et du débit glottique, ajustements acoustiques. Ce jeu s'inscrit dans la boucle audio-phonatoire : le chanteur perçoit sa production vocale de façon auditive et proprioceptive, et il l'adapte en fonction de ce qu'il en perçoit. Etudier la physiologie de la voix chantée implique de prendre en compte l'humain qui chante.

Remerciements

Les travaux présentés dans ce chapitre sont le fruit de collaborations avec des chercheurs et ingénieurs que je tiens à remercier ici : Bernard Roubeau, Michèle Castellengo, Boris Doval, Christophe d'Alessandro, Joe Wolfe, John Smith, Maëva Garnier, Mara Kiek, Lucie Bailly, Frank Müller, Markus Hess, Benoit Amy de la Bretèque, Antoine Giovanni, Bernard Lortat-Jacob, Lise Crevier-Buchman, Coralie Vincent, Pierre Badin.

Bibliographie

- Bailly L. (2009) Interaction entre cordes vocales et bandes ventriculaires en phonation: exploration in-vivo, modélisation physique, validation in-vitro. Thèse de doctorat de l'Université du Maine.
- Bailly L., Henrich N., Pelorson X. (2010) Vocal fold and ventricular fold vibration in period-doubling phonation: Physiological description and aerodynamic modeling, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 127(5), pp. 3212-3222.
- Bourne T., Garnier M. (2012) Physiological and acoustic characteristics of the female music theatre voice, *J. Acoust. Soc. Amer.*, in press.
- Garnier M., Henrich N., Smith J., Wolfe J. (2010) Vocal tract adjustments in the high soprano range, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 127 (6), pp. 3771–3780.
- Garnier M., Henrich N., Crevier-Buchman L., Vincent C., Smith J., Wolfe J. (2012) Glottal behavior in the high soprano range and the transition to the whistle register, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 131 (1), pp. 951–962.
- Garrel R. (2007) Contribution à la modélisation de la vibration des cordes vocales par l'application de la théorie des oscillateurs à relaxation, Thèse de doctorat de l'Université de la Méditerranée.
- Haji T., Mori K., Omori K., Isshiki N. (1992) Mechanical properties of the vocal fold. *Acta Otolaryngol*, 112 :559–565.
- Henrich N. (2001) Etude de la source glottique en voix parlée et chantée : modélisation et estimation, mesures acoustiques et électroglottographiques, perception. PhD thesis, Université Paris 6.
- Henrich N., d'Alessandro C., Castellengo M. and Doval B. (2004) On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 115 (3), pp. 1321-1332.
- Henrich N., d'Alessandro C., Castellengo M. and Doval B. (2005) Glottal open quotient in singing: Measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 117 (3), pp. 1417-1430.
- Henrich N. (2006) Mirroring the voice from Garcia to the present day: Some insights into singing voice registers, *Logopedics Phoniatrics Vocology*, vol. 31, p. 3-14.
- Henrich N., Kiek M., Smith J. and Wolfe J. (2007) Resonance strategies used in Bulgarian women's singing style: a pilot study, *Logopedics Phoniatrics Vocology*, vol. 32:4, 171 - 177.
- Henrich, N., Smith, J., & Wolfe, J. (2011) Vocal tract resonances in singing: Strategies used by sopranos, altos, tenors, and baritones. *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 129 (2), pp. 1024-1035.
- Joliveau, E., Smith, J., and Wolfe, J. (2004a) Tuning of vocal tract resonance by sopranos, *Nature* 427, 116.

- Joliveau, E., Smith, J., and Wolfe, J., (2004b) Vocal Tract Resonances in Singing: The Soprano Voice, *J. Acoust. Soc. Am.* 116, 2434–2439.
- Levin T.C., Edgerton M.E. (1999) The throat-singers of Tuva, *Scientific American*, pp. 80-87
- Lindestad P.A., Sodersten M., Merker B. and Granqvist S. (2001). "Voice source characteristics in Mongolian "throat singing" studied with high-speed imaging technique, acoustic spectra, and inverse filtering." *J Voice* 15(1): 78-85.
- Lacau St Guily J., Roubeau B. (1994) Voies nerveuses et physiologie de la phonation, *Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Oto-rhino-laryngologie*.
- Lortat-Jacob B. (1993). "En accord, polyphonies de Sardaigne : quatre voix qui n'en font qu'une." *Cahiers de musiques traditionnelles* 6: 69-86.
- Lortat-Jacob B. (1998) *Chants de Passion. Au coeur d'une confrérie de Sardaigne*. Paris.
- Pettersen V. (2005) Muscular patterns and activation levels of auxiliary breathing muscles and thorax movement in classical singing, *Folia Phoniatr Logop* 57(5-6), 255-277.
- Roubeau B. (1993) *Mécanismes vibratoires laryngés et contrôle neuro-musculaire de la fréquence fondamentale*, Thèse de doctorat de l'Université Paris-Orsay.
- Roubeau B., Castellengo M., Bodin P., Ragot M., (2004) Phonétogramme par mécanisme laryngé [Laryngeal registers as shown in the voice range profile], *Folia Phoniatr Logop.*, vol. 56(5), p. 321-333.
- Roubeau B., Henrich N., Castellengo M. (2009) Laryngeal vibratory mechanisms: the notion of vocal register revisited, *Journal of Voice*, Volume 23, Issue 4, p. 425–438.
- Sakakibara K. I., Imagawa H., Konishi T., Kondo K., Murano E. Z., Kumada M., Imagawa H., and Niimi S.. Vocal fold and false vocal fold vibrations in throat singing and synthesis of khöömei. In *Proceedings of the International Computer Music Conference, Havana, Cuba*, pages 135–138, 2001.
- Sakakibara K.I. (2003) Production mechanism of voice quality in singing, *Journal of the Phonetic Society of Japan*, Vol. 7 No.3, pp. 27-39.
- Sundberg, J., and Skoog, J. (1997) Dependence of jaw opening on pitch and vowel in singers, *J. Voice* 11, 301–306.
- Titze I.R. (1989) On the relation between subglottal pressure and fundamental frequency in phonation, *J. Acoust. Soc. Am.* 85(2), 901–906.
- Titze I.R. (1992) Phonation threshold pressure: a missing link in glottal aerodynamics, *J. Acoust. Soc. Am.* 91(5), 2926–2935.
- Titze I.R., Sundberg J. (1992) Vocal intensity in speakers and singers, *J. Acoust. Soc. Am.* 91(5), 2936–2946.
- Titze I.R. (1994) *Principles of voice production*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New York.