



HAL
open science

Stress physiologique généré lors d'un changement de mécanisme laryngé en voix chantée

Jeanne Arviset, Clémence Lemaitre

► **To cite this version:**

Jeanne Arviset, Clémence Lemaitre. Stress physiologique généré lors d'un changement de mécanisme laryngé en voix chantée. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. dumas-03342212

HAL Id: dumas-03342212

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03342212v1>

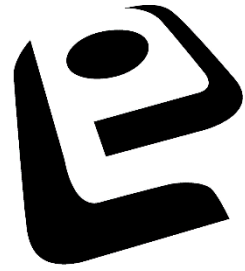
Submitted on 14 Sep 2021

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.



Faculté des sciences
médicales et paramédicales
Aix-Marseille Université



UMR 7309 • CNRS • AMU
**PAROLE ET
LANGAGE**

Centre de Formation Universitaire en Orthophonie de Marseille

STRESS PHYSIOLOGIQUE GÉNÉRÉ LORS D'UN CHANGEMENT DE MÉCANISME LARYNGÉ EN VOIX CHANTÉE

Mémoire de fin d'études
en vue de l'obtention du Certificat de Capacité d'Orthophoniste

Jeanne Arviset et Clémence Lemaître

Sous la direction de Benoît Amy de la Bretèque et Thierry Legou

16 Juin 2021

Table des matières

1. Remerciements	5
2. Introduction	6
3. Contexte théorique	7
1. Physiologie de la phonation	7
1.1. Anatomie et rappels	7
1.1.1. Appareil respiratoire	7
1.1.2. Le larynx	7
1.1.3. Les articulateurs	11
1.1.4. La phonation	11
1.2. Mécanismes laryngés	11
1.2.1. Définition	11
1.2.2. Comparaison avec les catégories vocales	12
1.3. Changement de mécanisme laryngé	14
1.3.1. Définition	14
1.3.2. Modifications anatomiques	15
1.3.2.1. Tractus vocal et articulation	15
1.3.2.1.1. Les cavités supraglottiques	16
1.3.2.1.2. Les articulateurs	17
1.3.2.2. Notion de résonance	18
1.3.2.2.1. Rappels	18
1.3.2.2.2. Accord résonantiel chez les chanteurs	20
1.3.2.2.3. Accord résonantiel lors du passagio	21
1.3.3. Respiration et pression sous-glottique	22
1.3.3.1. Respiration : rappels	22
1.3.3.2. Pression sous-glottique et phonation	22
1.3.3.3. Pression sous-glottique, intensité et fréquence fondamentale	23
1.3.3.4. Pression sous glottique, registres vocaux et notion de résonance	24
2. Facteurs influençant la production vocale chantée	26
2.1. Genre	26
2.2. Spécificités de la voix chantée en regard de la voix parlée	26
2.3. Distinction chanteurs / non chanteurs	27
3. Aspects physiologiques lors du chant	28
3.1. Effets généraux du chant sur le corps	28
3.1.1. Les changements respiratoires	28

3.1.2.	Les changements circulatoires	28
3.1.3.	Les changements hormonaux	29
3.2.	Manifestation des difficultés pendant la prestation vocale	30
3.3.	Gestion des difficultés liées à l'anxiété de performance et intervention orthophonique	31
4.	Problématique et hypothèses	33
4.	Matériel et méthode	34
1.	Population	34
2.	Matériel	34
2.1.	BIOPAC MP36R.....	34
2.1.1.	La fréquence cardiaque	35
2.1.2.	La fréquence respiratoire	35
2.1.3.	L'activité électrodermale.....	36
2.2.	Electroglottographe	37
2.3.	Montre Empatica E4	37
2.4.	Microphone AKG 1000 S	38
3.	Protocole expérimental.....	38
3.1.	Recueil du consentement et installation du matériel	38
3.2.	Déroulement de la passation	40
3.3.	Questionnaire d'auto-évaluation adapté du VHI chanteurs	41
4.	Analyse des enregistrements	41
4.1.	Analyse temporelle et électroglottographique par PHONEDIT Signaux.....	41
4.2.	Analyse des données physiologiques	45
5.	Jury d'écoute	45
5.	Résultats	47
1.	Résultats physiologiques	47
2.	Analyse des évaluations perceptives.....	48
2.1.	Evaluation perceptive objective : jury d'écoute	48
2.2.	Evaluation perceptive subjective : auto-évaluation adaptée du VHI chanteurs	51
6.	Discussion.....	54
1.	Discussion du protocole	54
1.1.	Limites	54
1.2.	Ouvertures	55
2.	Discussion des résultats	56
2.1.	Données physiologiques	56

2.2.	Résultats du jury d'écoute	56
2.3.	Résultats du VHI chanteurs adapté.....	57
3.	Perspectives.....	57
7.	Conclusion de l'étude	59
8.	Références bibliographie	60
9.	Annexes :	63
10.	Résumé	70

1. Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier messieurs Benoît Amy de la Bretèque et Thierry Legou. Merci de nous avoir suggéré ce sujet de mémoire des plus passionnants, merci pour votre confiance et votre bienveillance tout le long de ce beau projet. C'était une véritable entrée dans le monde de la recherche et cela nous a donné à voir un domaine aussi intrigant que vaste.

Nous souhaitons également remercier le personnel du Laboratoire Parole et Langage de Aix-en-Provence. Merci d'avoir tout mis en œuvre pour que nos passations se déroulent dans les meilleures conditions possibles dans vos locaux. Mention spéciale à Gilles Pouchoulin qui a suivi de près cette aventure : merci pour ta présence et ta gentillesse.

Merci aussi à tous les participants de cette étude sans qui rien n'aurait été possible. Merci pour votre disponibilité, votre curiosité et votre implication dans des exercices parfois peu communs. Merci d'avoir donné de vos voix pour nos recherches.

Nous tenons également à mentionner les membres de notre jury d'écoute : Benoît Amy de la Bretèque, Marie-Dominique Guarella et Christine Spezza. Merci d'avoir accepté de participer à cette étude à la dernière minute. Votre intervention était des plus précieuses.

Merci également à Aurélie Ravera-Lassalle et Marina Rekbi de prêter leur expertise à l'évaluation de ce travail en faisant partie de notre jury de mémoire.

Enfin, les derniers mais pas des moindres : merci à nos proches, familles, amis de la promotion et d'ailleurs, qui nous soutiennent depuis le début. Ceci marque la fin de 5 belles années, mais le début d'une grande aventure pour l'une comme pour l'autre.

Pour terminer, un petit mot à toi, mon binôme : merci pour cette belle expédition qu'est un mémoire de fin d'étude. Ce projet nous a permis de mieux nous connaître et je suis reconnaissante d'avoir pu le partager avec toi. Nous avons formé une belle équipe, merci pour ton soutien, ta motivation et ta bonne humeur.

2. Introduction

Le chant est une pratique vocale mettant en jeu de multiples dimensions du corps humain, ce dernier se modulant véritablement à l'effort phonatoire instigué par le sujet chantant. Le changement de mécanisme laryngé en est le parfait témoignage. Bien que cet instant, parfois redouté par les chanteurs, soit encore discuté dans son déroulé exact, nous lui connaissons des modifications anatomiques indéniables. Cependant, les répercussions physiologiques que cet événement peut avoir sur le métabolisme et le corps humain sont, jusqu'alors, inconnues.

En effet, si les modifications physiologiques, et notamment le stress physiologique, que la pratique du chant a sur notre biologie interne ont déjà été étudiés, l'activité précise du changement de mécanisme laryngé, elle, n'a pas fait l'objet de recherches spécifiques.

Ainsi, afin d'essayer de répondre de façon optimale à ce vide dans la littérature scientifique, nous avons mis en place, à l'aide de Benoît Amy de la Bretèche, médecin phoniatre (CHU de Montpellier) et de Thierry Legou, ingénieur de recherche au Laboratoire Parole et Langage de Aix-en-Provence, une étude visant à étudier le stress physiologique généré lors du changement de mécanisme laryngé en voix chantée. Nous avons décidé de recruter des sujets chanteurs, non chanteurs, hommes et femmes afin d'obtenir le plus large panel de réponses possibles.

Ce mémoire s'étend sur plusieurs parties :

Dans la première partie, nous présenterons le contexte théorique dans lequel évolue notre recherche : nous expliciterons la physiologie de la phonation, présenterons ce que sont les mécanismes laryngés et exposerons ce qu'induit un changement de mécanisme laryngé sur tout l'appareil phonatoire.

Nous présenterons, dans un second temps, les facteurs influençant la production vocale chantée.

Pour finir, nous exposerons les paramètres physiologiques en jeu lors du chant.

Ces données théoriques nous permettront de dégager une problématique et d'émettre un certain nombre d'hypothèses.

Nous exposerons ensuite la démarche expérimentale mise en œuvre, avec son protocole ainsi que le matériel que nous avons utilisé pour mener à bien cette étude.

Pour terminer, nous présenterons les différents résultats obtenus et nous les discuterons. Nous y ajouterons les limites auxquelles nous avons pu être confrontés lors de cette étude et en exposerons les ouvertures afin que d'autres recherches puissent être faites dans sa continuité.

Ce mémoire s'inscrit dans la volonté de mieux connaître les réactions de notre corps face à certains événements de la pratique vocale. L'utilisation des paramètres physiologiques comme témoins de la qualité du geste vocal pourrait être une avancée pour la pratique orthophonique dans la prise en soin des troubles vocaux, qu'il s'agisse de patients chanteurs ou non chanteurs.

3. Contexte théorique

1. Physiologie de la phonation

1.1. Anatomie et rappels

L'instrument vocal est composé de trois niveaux : le niveau respiratoire, le niveau phonatoire et le niveau articulaire.

1.1.1. Appareil respiratoire

L'appareil respiratoire regroupe les muscles et organes nécessaires à la respiration. Il s'étend du diaphragme pour la partie inférieure, jusqu'aux cavités buccales pour la partie supérieure.

Les poumons se remplissent d'air de manière passive lors de l'inspiration. L'expulsion de l'air nécessite une contraction du diaphragme, des muscles abdominaux et thoraciques : c'est la phase d'expiration.

L'ensemble des deux phases, inspiration et expiration, constitue le cycle respiratoire.

Les poumons sont une réserve d'air pour la phonation, en particulier le chant. Le chanteur contrôle la phase d'expiration grâce aux muscles abdominaux et thoraciques. La phase respiratoire fournit une énergie aérodynamique, caractérisée par la pression et le débit d'air sous-glottique.

1.1.2. Le larynx

Le larynx est l'organe principal de la phonation. Il a également un rôle dans la respiration et la déglutition. Il correspond à la partie supérieure de l'appareil phonatoire. Il est situé en avant du pharynx, au-dessus de la trachée, et il est au niveau du carrefour aéro-digestif (*Voir schéma 1*).

Les plis vocaux sont contenus dans le larynx. Ils sont positionnés horizontalement, accrochés en avant au cartilage thyroïde et en arrière au cartilage cricoïde. Ils sont composés de plusieurs couches. La couche profonde des plis vocaux est le muscle vocal ou thyro-aryténoïdien. La couche moyenne, la lamina propria, est constituée de fibres collagènes et élastiques ainsi que d'une substance pauvre en fibres dans sa partie supérieure. La couche superficielle des plis, l'épithélium, est une muqueuse (*Voir schéma 2*).

Les paramètres biomécaniques des plis vocaux influencent fortement leur comportement physiologique, tels que la longueur vibrante des plis, la masse vibrante et la raideur. Ces paramètres sont essentiellement soumis aux actions des muscles intrinsèques du larynx : le thyro-aryténoïdien (TA), l'interaryténoïdien (IA), le crico-thyroïdien (CT), (*Voir schéma 4*).

Les plis vocaux sont en adduction pour la phonation. Ce sont les actions des muscles intrinsèques du larynx qui permettent l'abduction et l'adduction des plis vocaux (*Voir schéma 3*).

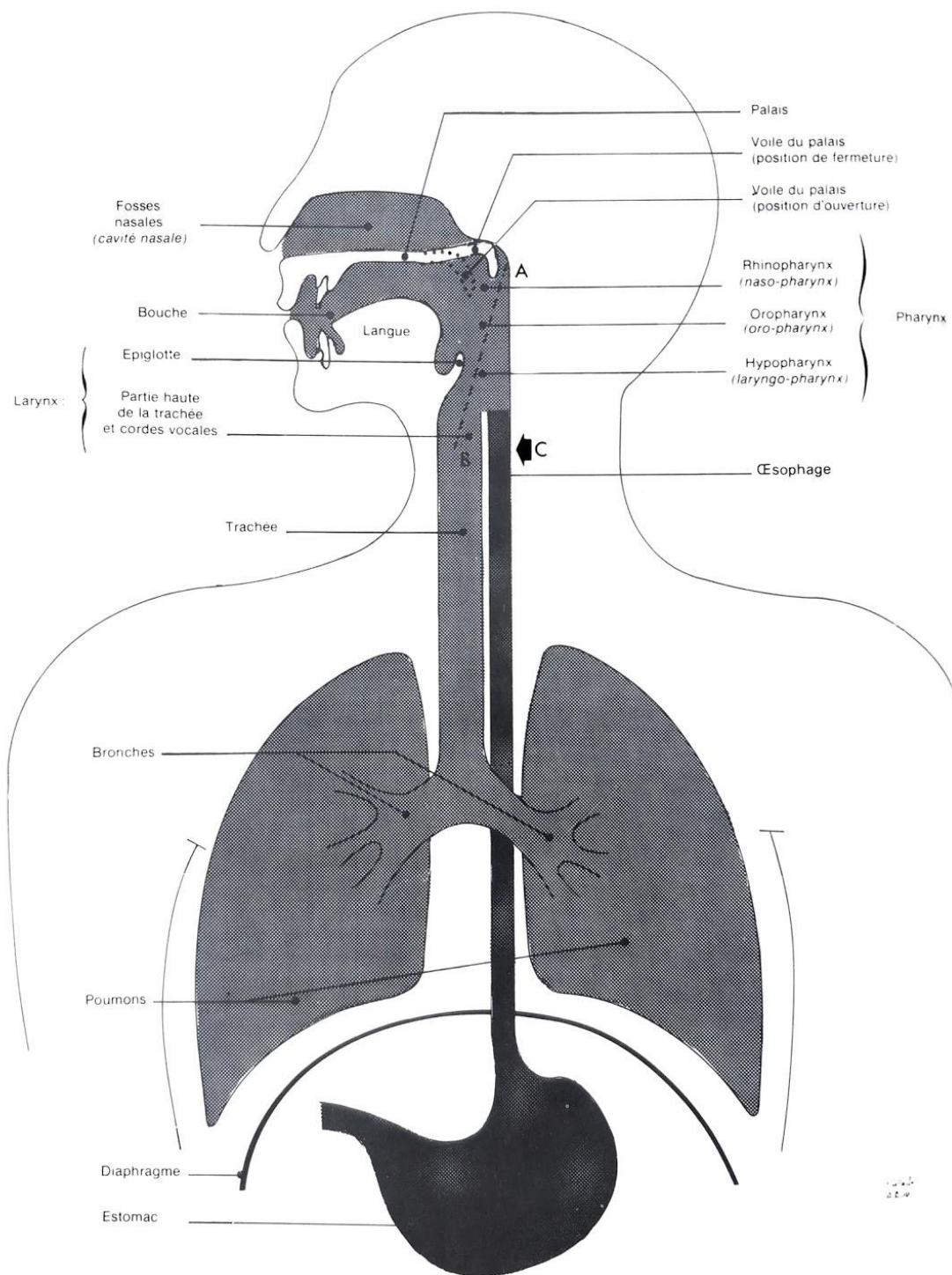
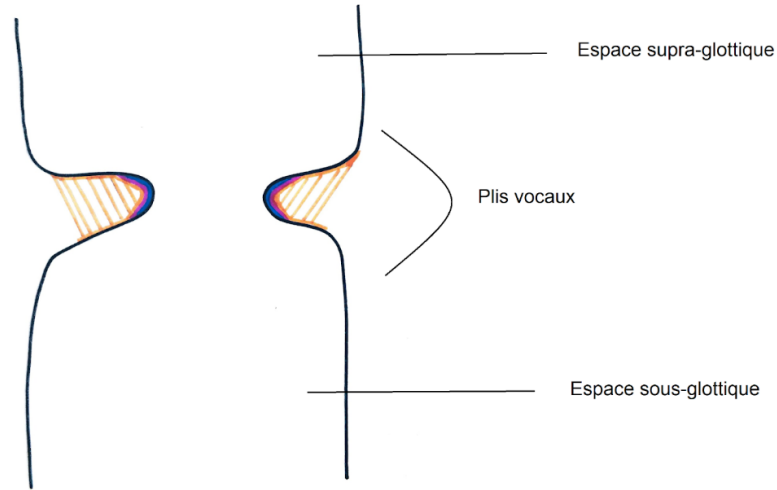


Fig. 1 : Vue d'ensemble des organes de la voix et de la parole.
 (La ligne en trait discontinu AB correspond au plan de coupe de la figure 2. La flèche C indique la direction selon laquelle est vue cette coupe).

Schéma 1 : Anatomie de l'appareil phonatoire (d'après le livre "La Voix", de François Le Huche et André Allali, 1984)



- COVER : Epithélium + couche superficielle de la lamina propria
- TRANSITION : Ligament vocal (comprenant les couches moyennes et profondes de la LP)
- BODY : Muscle thyro-aryténoïdien

Schéma 2 : Description anatomique et biomécanique des plis vocaux

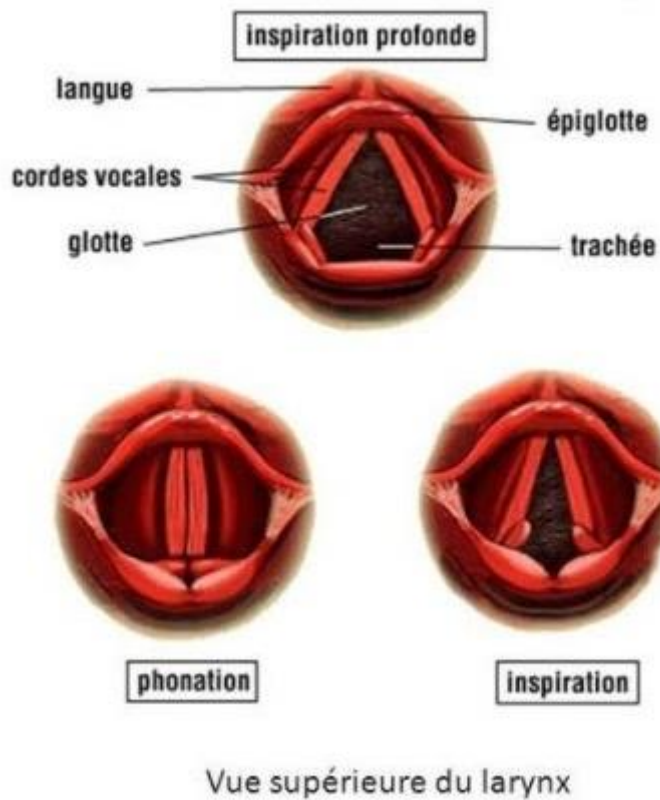
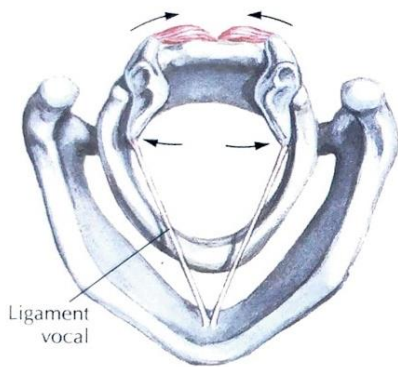
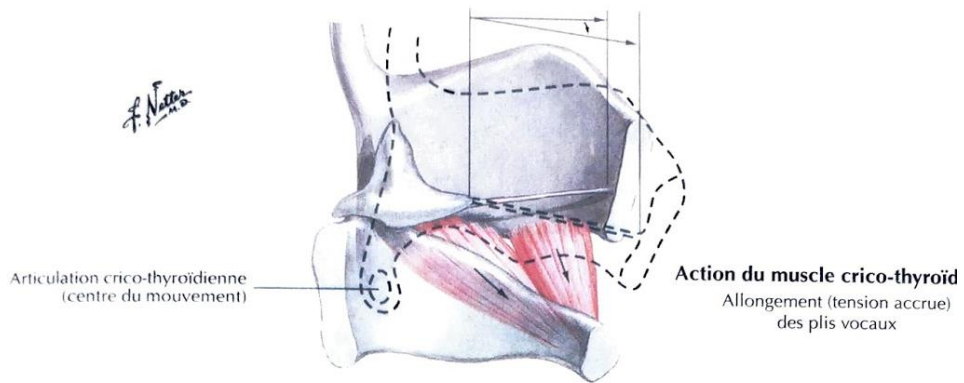
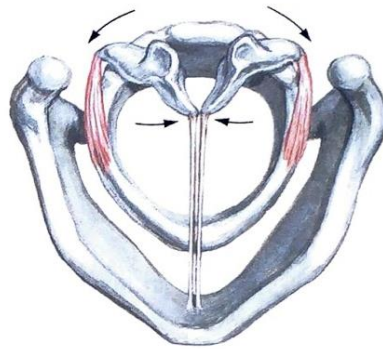


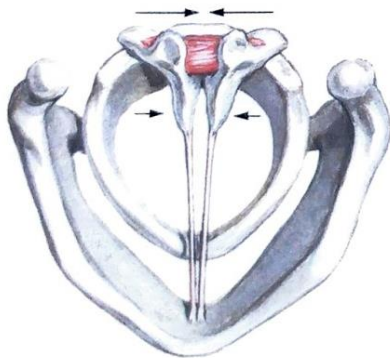
Schéma 3 : Vue supérieure des plis vocaux dans les différentes activités phonatoires du larynx d'après la Thèse de Laaridh, Imed. (2017) - Évaluation de la parole dysarthrique : Apport du traitement automatique de la parole face à l'expertise humaine.



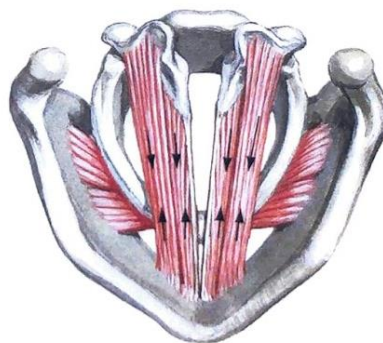
Action du muscle crico-aryténoïdien postérieur
Abduction des plis vocaux



Action du muscle crico-aryténoïdien latéral
Adduction des plis vocaux



Action des muscles aryténoïdiens transverse et oblique
Adduction des plis vocaux



Action du muscle thyro-aryténoïdien
Raccourcissement (relâchement) des plis vocaux

Schéma 4 : Actions des muscles intrinsèques du larynx (d'après l'ouvrage L'anatomie en orthophonie, McFarland and Netter, 2016)

1.1.3. Les articulateurs

L'appareil phonatoire contient des cavités de résonance pharyngées, buccales et nasales.

Les ondes sonores produites dans le conduit vocal ont des caractéristiques fréquentielles qui vont être amplifiées ou réduites selon les propriétés acoustiques du conduit vocal. Ces propriétés dépendent de la position des articulateurs et des conditions au niveau glottique et au niveau de la sortie de l'air (sortie buccale et/ou nasale).

Ces résonateurs sont propres à chaque individu et définissent le timbre de la voix ainsi que la signature acoustique. Nous les détaillerons plus loin dans notre étude.

1.1.4. La phonation

La phonation a lieu lors de la phase d'expiration, les plis vocaux sont en position phonatoire. L'air expulsé des poumons arrive sous les plis vocaux créant une augmentation de pression au niveau sous-glottique. Cette pression fait entrer les plis vocaux en vibration créant une onde sonore. L'énergie aérodynamique est transformée en énergie acoustique. L'onde sonore passe ensuite dans les résonateurs avant de devenir la production vocale.

La phonation nécessite un équilibre entre l'expiration, la phonation et l'articulation. La gestion de la pression de l'air sous-glottique est primordiale pour l'auto-oscillation des plis vocaux, et nous la détaillerons plus en détails plus loin dans cette étude. Cependant, le facteur déterminant pour cette oscillation est la différence entre la pression sous-glottique et la pression supra-glottique (au-dessus des plis vocaux) et non pas la pression sous-glottique elle-même.

Plusieurs mécanismes sont utilisés pour faire varier la fréquence fondamentale de l'onde sonore produite lors de la phonation.

Tout d'abord, l'augmentation de la pression sous glottique et du débit d'air glottique fait varier la fréquence de vibration. Elle augmente lorsque la pression ou lorsque le débit d'air augmente en l'absence d'autres contrôles laryngés.

Ensuite, la contraction des muscles crico-thyroïdiens provoque une bascule du cartilage thyroïde qui allonge les plis vocaux. Cela entraîne une augmentation de la fréquence fondamentale par augmentation de la raideur et un allègement de la masse vibrante des plis.

1.2. Mécanismes laryngés

Grâce à sa structure multicouche, les contraintes des plis vocaux (longueur, raideur et épaisseur) sont ajustées lors de la vibration des plis. Nous pouvons dégager quatre mécanismes laryngés utilisés pour balayer l'étendue vocale des hommes et des femmes.

1.2.1. Définition

Un mécanisme laryngé est une configuration glottique spécifique dans laquelle plusieurs paramètres entrent en compte tels que la raideur, l'épaisseur et la longueur des plis ainsi que les actions des muscles intrinsèques du larynx.

Le mécanisme laryngé M0 permet la production des sons les plus graves. On l'appelle également "vocal fry" ou "strobass". 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.

Le mécanisme laryngé M1 est utilisé au quotidien par les hommes et les femmes. D'après *Roubeau et al. (2004)*, il permet la production des sons graves à médiums, sur une tessiture moyenne de Ré1 à Sol3 chez les chanteurs et Ré2 à Sol3 chez les chanteuses. On l'appelle aussi le mécanisme lourd. Les plis vocaux restent courts et épais. L'activité musculaire du TA augmente par rapport à celle observée en M0. L'ensemble du pli vocal participe à la masse vibrante en action.

Le mécanisme laryngé M2 est utilisé en voix chantée pour produire des sons médiums à aigus, sur une tessiture moyenne de Mi2 à Fa4 chez les chanteurs et Fa#2 à Si4 chez les chanteuses (*Roubeau et al.*). On l'appelle également le mécanisme léger. La particularité de ce mécanisme est le découplage des plis : le muscle vocal ne participe plus à la masse vibrante de l'action, seule la partie supérieure des plis vibre. L'activité musculaire du TA diminue au profit de celle du CT, qui étire les plis. Les plis vocaux sont alors plus longs et moins épais qu'en M1. La masse vibrante est moins importante que lors du M1.

Le mécanisme laryngé M3 permet la production des sons les plus aigus. Il se caractérise par des plis vocaux très tendus et très fins.

La voix humaine est parfois capable d'émettre la même fréquence sonore dans deux mécanismes laryngés voisins : c'est ce qu'on appelle la zone de chevauchement des mécanismes.

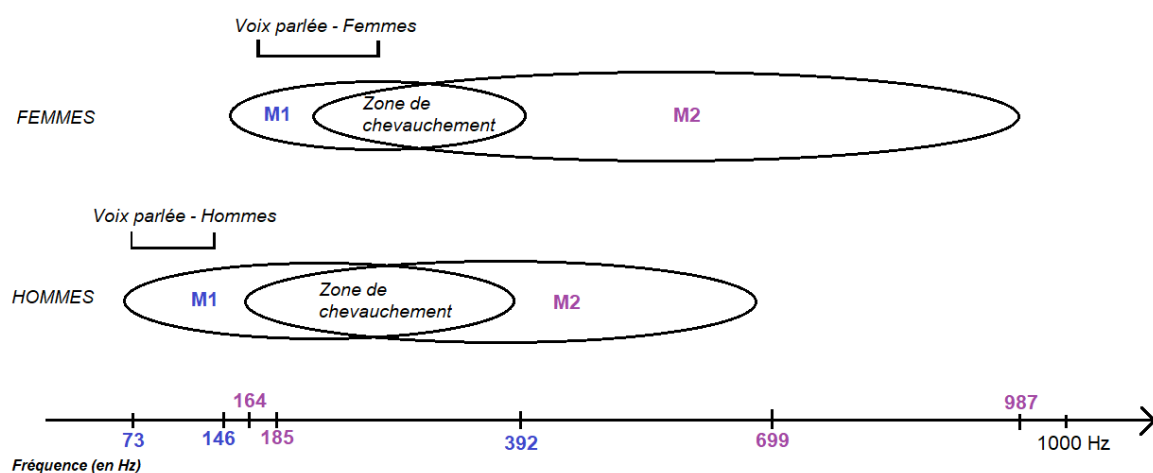


Schéma 5 : Zone de chevauchement des mécanismes laryngés

1.2.2. Comparaison avec les catégories vocales

D'après *Nathalie Henrich*, les registres vocaux désignent une réalisation complexe englobant tout à la fois les mécanismes laryngés et les adaptations du conduit vocal connues sous le nom de « registre résonantiel » (que nous verrons un peu plus bas dans cette recherche).

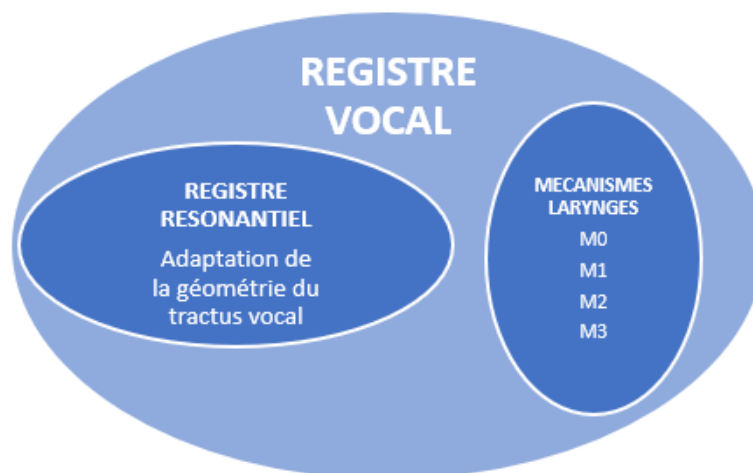


Schéma 6 : Détail de la notion de registre vocal

Le terme “catégories vocales”, quant à lui, est utilisé en chant afin de classer les voix des chanteurs selon leur tessiture et leur étendue vocale. Il est donc à bien distinguer du terme “registre vocal”. Il existe trois catégories vocales chez les hommes et trois autres chez les femmes. Du plus grave au plus aigu, on retrouve les catégories basse, baryton, ténor pour les hommes et contralto, mezzo-soprano et soprano pour les femmes.

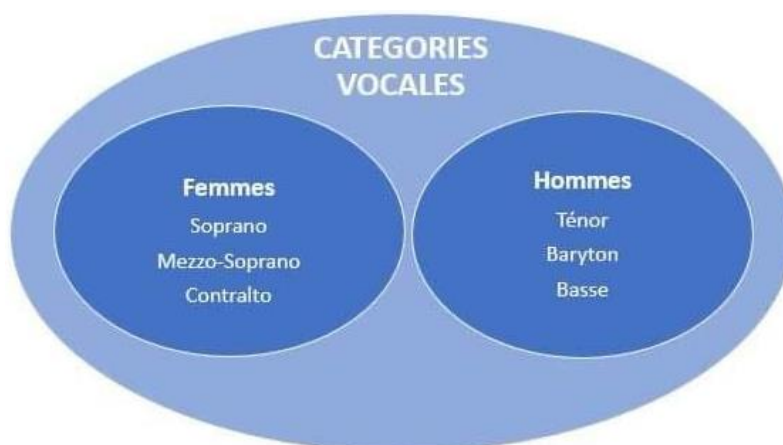


Schéma 7 : Détail de la notion de catégories vocales

Les mécanismes laryngés 1 et 2 sont utilisés lors du chant. Certains chanteurs utilisent de manière quasi exclusive le M1, tandis que certaines chanteuses l'utilisent peu ou pas au profit du M2. On appelle communément “voix de poitrine” ce qui est généralement du M1 et “voix de tête” ce qui est généralement du M2.

Cependant, il est important de notifier que ces appellations sont plus de l'ordre du perceptif : en effet, les termes “voix de poitrine” et “voix de tête” ne recouvrent pas exactement les mécanismes laryngés M1 et M2. C'est pour cette raison qu'il existe un certain flou dans la littérature au niveau des registres vocaux, dû à la perception du chanteur (*Roubeau*).

1.3.Changement de mécanisme laryngé

1.3.1. Définition

Lors d'un effort vocal, un phénomène de modification du timbre peut être perçu par l'auditeur, à certaines hauteurs spécifiques. Il s'agit d'un changement de mécanisme laryngé.

Cette courte transition de quelques centaines de millisecondes est liée à une modification de la configuration glottique. Elle entraîne, d'après *Nathalie Henrich*, "une perte de contrôle momentanée de la fréquence fondamentale".

Dans cette étude, nous nous intéresserons uniquement aux changements entre les mécanismes 1 et 2.

Le déroulement exact de ce changement de mécanisme est encore très discuté dans la communauté scientifique.

La théorie la plus communément admise et la plus ancienne (*Hirano, Titze*), fait part d'une modification des activités des muscles laryngés thyro-aryténoïdien et crico-thyroïdien, où la chute de l'activité du premier et l'activation du deuxième serait synonyme du passage du mécanisme 1 au mécanisme 2.

Mais en réalité, et après de nombreuses observations cliniques de ce passagio, les cliniciens se sont aperçus que le changement de mécanisme est difficilement observable physiquement, ce qui pourrait signifier que l'action musculaire telle qu'on l'entend ne serait pas aussi binaire. Les actions des muscles thyro-aryténoïdiens en mécanisme 2 ne peuvent pas être ignorées, de même pour les actions des muscles crico-thyroïdiens en mécanisme 1.

Une autre théorie, plus récente, est apparue soulevant la question d'une transition spontanée, sans la nécessité d'ajustements des muscles laryngés, et utilisant la notion de "bifurcation" du système vibratoire (*Titze & al, Herzel, Svec & al*).

Nous ne chercherons pas ici à nous positionner pour une théorie plutôt qu'une autre. Cependant, il est nécessaire d'explicitier les grandes lois qui régissent ce phénomène, et pour cela, nous pouvons recourir à la physique acoustique.

Une chose est certaine : notre configuration glottique est modulée par un seul et même but lors d'un passage du M1 au M2 : faire varier la tension et la masse vibrante.

Il est évident que lorsque les cordes vocales sont au maximum de leur étirement, la seule solution pour obtenir une plus grande fréquence est de venir jouer sur la masse vibrante.

Nous pouvons alors nous pencher sur la formule de la vibration :

$$F = \sqrt{k/m} \text{ (F = fréquence ; k = raideur ; m = masse)}$$

On y voit bien que la vibration est inversement proportionnelle à la masse : lorsque le pli vocal vibre dans son entièreté et lorsque les cordes vocales sont épaisses, on obtient un registre plus grave, correspondant au M1, et lorsqu'une mince partie de la masse des cordes vocales (le cover) est mise en vibration, on observe alors un registre plus aigu, correspondant au M2.

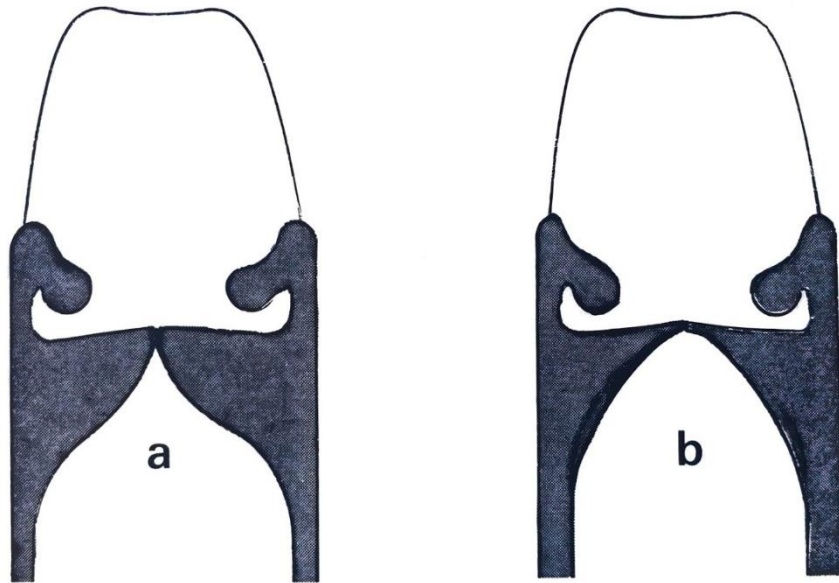


Fig. 63 : Coupe frontale du larynx lors de l'émission des deux registres principaux
 a) registre grave, dit « de poitrine »
 b) registre aigu, dit « de tête »

Schéma 7 : D'après le livre "La Voix", de François Le Huche et André Allali

Il est donc évident que pour présenter de telles variations fréquentielles, des modifications physiques s'opèrent dans l'espace glottique. Néanmoins, nous n'en connaissons pas encore, de façon certaine, la nature.

1.3.2. Modifications anatomiques

D'après *Christian T. Herbst*, pendant la phonation, les parties phonatoire, résonnante et respiratoire de l'organe du tractus vocal peuvent interagir. Les actions dans un de ces sous-systèmes provoquent inévitablement des effets sur les autres.

Nous venons de voir l'aspect vibratoire de la phonation, voyons à présent les sous-systèmes avec lesquels il interagit.

1.3.2.1. Tractus vocal et articulation

Le changement de modalité vibratoire des cordes vocales n'est pas le seul élément modulable lors d'un effort phonatoire. Comme nous l'avons précisé plus haut, il faut bien distinguer les mécanismes laryngés, responsables des modes vibratoires des cordes vocales, des registres résonnants, qui eux se différencient par les modifications de la configuration géométrique du tractus vocal. Ces deux modalités sont indépendantes l'une de l'autre, et peuvent donc être modifiées distinctement.

Ces modifications dans la géométrie du tractus vocal sont utilisées comme facteur de stabilisation dans le chant professionnel (*Echternach & al. 2017*) mais également par les

chanteurs amateurs avancés et, dans une certaine mesure, par des chanteurs non experts (R. Vos, Daffern, M. Howard. 2017).

Voici les éléments en jeu, dans ces accords résonantiels :

1.3.2.1.1. Les cavités supraglottiques

Le tractus vocal est un élément dynamique et modulable, comprenant plusieurs cavités supraglottiques : le vestibule laryngé, le pharynx, les sinus piriformes, la cavité orale et la cavité nasale.

Au sein de ce tractus, on admet généralement 3 cavités de résonance distinctes : la cavité pharyngale, orale et nasale.

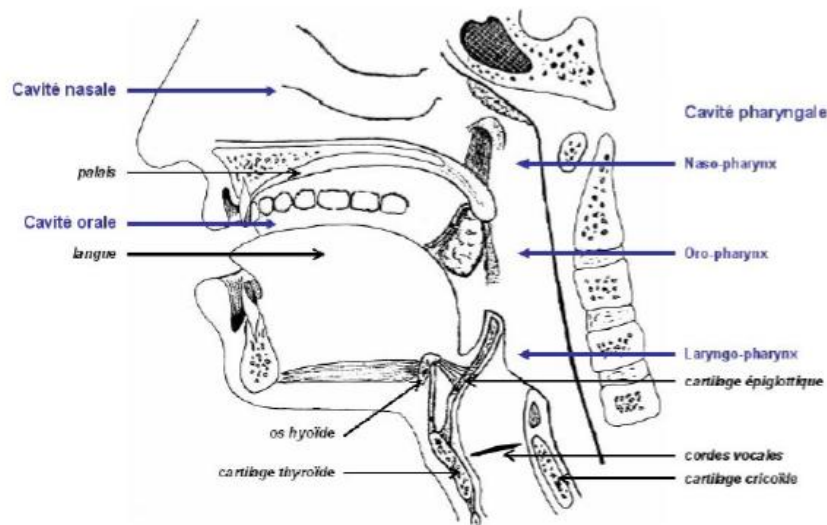


Schéma 8 : Coupe sagittale présentant les cavités de résonances du tractus vocal.
D'après l'article Résonance sonore et cavités supra laryngées de A. Ghio, S. Pinto

- Le pharynx :

Cette cavité verticale ouverte à chaque extrémité relie le larynx avec les fosses nasales et la cavité buccale, ce qui en fait le premier résonateur. Elle comprend le voile du palais qui permet la nasalisation des sons.

- La cavité orale :

Délimitée par les lèvres en avant, et par la cavité pharyngale en arrière, par le palais en haut, et par la langue en bas, mais également par les joues et les arcades gingivo-dentaires sur les côtés ; elle agit comme une véritable caisse de résonance, avec une grande précision et une impressionnante adaptabilité dans sa forme et dans sa dimension. Ces caractéristiques font d'elle un élément irremplaçable, qui permet l'articulation de presque tous les phonèmes du langage articulé.

On peut en désolidariser deux autres parties : la cavité buccale et la cavité labiodentale, qui peuvent toutes deux être individualisées lors de l'émission de certains phonèmes.

La cavité labiale seule, est formée par la protrusion des lèvres, dont l'arrondissement constitue alors le dernier résonateur de ce grand ensemble qu'est le tractus vocal.

- Les fosses nasales :

Lors d'une émission, si le voile du palais s'abaisse, l'air expiré passe alors non seulement par la cavité orale, mais également par la cavité nasale. Ce son est alors dit "nasalisé" et on le retrouve pour certains phonèmes précis.

Ce sont ces éléments qui participent à la structuration des sons de la parole : ces différentes cavités supra laryngées ont la possibilité de modifier le signal généré par le larynx, en affaiblissant ou en amplifiant certaines fréquences. En effet, chacune de ces cavités possède sa résonance propre, ce qui lui permet d'avoir l'effet d'un véritable filtre acoustique sur le son émis : on parle du modèle source-filtre.

C'est l'ensemble de ces résonances qui donne à la voix sa singularité, sa signature : le timbre.

1.3.2.1.2. Les articulateurs

Mais ces cavités seules ne suffisent pas à produire tous les phonèmes d'une langue : les articulateurs jouent un rôle essentiel.

Les articulateurs sont tous les éléments mobiles du conduit vocal sur lesquels le sujet peut agir volontairement et qui sont fonctionnels dans la production des sons de la parole.

On considère donc communément les articulateurs suivants :

- Les lèvres :

Leur rétraction ou leur protrusion entraîne une modification de la longueur du tractus. Leur action peut également participer à la fermeture totale du conduit vocal, avec les actions conjointes de la langue et de la mâchoire.

- La langue :

Un des articulateurs principaux pour la parole. Elle peut se déplacer d'avant en arrière, de haut en bas, s'arrondir ou s'aplatir, afin de générer des zones de constriction ou d'occlusion. Ces mouvements permettent la modification multidimensionnelle de la cavité orale.

- Le voile du palais :

Lorsqu'il est abaissé, il permet la production des phonèmes nasaux.

- La mandibule :

Son degré d'ouverture participe à la configuration du tractus en influençant le volume de la cavité orale. Ses mouvements influencent également ceux de la langue, cette dernière étant reliée à la mandibule par sa base.

C'est l'action coordonnée de ces articulateurs qui va permettre une modulation du conduit vocal.

1.3.2.2. Notion de résonance

1.3.2.2.1. Rappels

Dans la phonation, l'amortissement ou l'amplification du son est dû aux changements de position et de tension des articulateurs.

En effet, le tractus vocal humain résonne pour certaines fréquences de la source, et cette sélection de fréquences dépend de la forme donnée au tractus, qui agit comme un filtre, il s'agit du modèle source-filtre dont nous avons déjà parlé un peu plus haut, où le larynx est la source des sons voisés, et le tractus vocal en est le filtre.

On appelle formants, les fréquences de résonances interprétées perceptivement comme des voyelles. Il s'agit de zones fréquentielles renforcées, dont la valeur change d'une voyelle à l'autre, sous l'effet des modifications de la géométrie des cavités, elles-mêmes générées par les articulateurs.

Dans la parole, mais aussi et surtout dans le chant, la phonation repose sur un principe appelé l'accord phono-résonantiel : afin d'émettre un son suffisamment puissant, sans que cela ne représente une trop grande dépense énergétique, le sujet vient accorder ses cavités de résonance (et donc, ses formants) en fonction du son laryngé émis.

Ainsi, pour que l'onde acoustique générée dans le conduit vocal puisse être transmise de façon efficace au milieu extérieur, il faut que les fréquences de résonance acoustique du conduit vocal soient positionnées à proximité d'un ou de plusieurs harmoniques de la fréquence fondamentale d'émission. Dans la plupart des cas l'accord phono-résonantiel consiste en un rapprochement entre R1, la première résonance acoustique du conduit vocal, et la fréquence fondamentale de vibration des cordes vocales, dite f_0 .

La discrimination d'une voyelle dépend de la fréquence et de la largeur de bande des trois premières résonances du conduit vocal, mais on utilise la base des deux formants les plus graves afin de classer ces voyelles.

En phonétique articulatoire, on décrit les voyelles à l'aide des repères suivants :

- La position de la langue :
 - Haute ou basse,
 - Reculée ou avancée,
- Le degré d'ouverture buccale

Ceci nous permet de dessiner le triangle vocalique ci-dessous.

On y retrouve la voyelle [ə] considérée comme la voyelle centrale "repère", avec une configuration articulatoire neutre issue de la résonance d'un tube de 17,5 cm sans constriction.

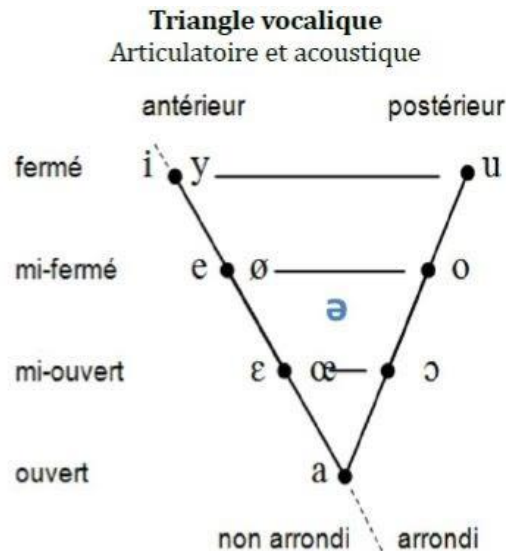


Schéma 9 : Triangle vocalique représentant graphiquement l'appareil vocal humain

On admet généralement que :

Le premier formant (F1) correspond au degré d'aperture buccale, soit la position d'ouverture de la mâchoire, et donc à la position du pharynx par extension (car l'ouverture de la mandibule entraîne la base de langue dans sa bascule et agit donc sur le pharynx)

Le deuxième formant (F2) correspond à la position de la langue (antérieure ou postérieure)

Le troisième formant (F3) correspond à la position des lèvres.

Néanmoins, il est important de préciser que dans le cadre de la reconnaissance des voyelles, ce troisième formant n'est pas nécessaire. En effet, les voyelles peuvent être effectuées sans suppléance des lèvres (comme nous le prouve la ventriloquie), mais bien évidemment que l'utilisation de ces dernières fournit une plus grande intelligibilité.

Les consonnes seront produites par la suite, grâce aux mouvements des articulateurs tels que des placements spécifiques de la langue et des lèvres, ou encore des claquements de langue par exemple.

Les formants s'abaissent uniformément au fur et à mesure que la taille du tube s'allonge : cet abaissement peut être obtenu par un positionnement plus bas du larynx ainsi que par une protrusion des lèvres. Ces manipulations conduisant à un allongement de la longueur du tube, cela explique donc qu'à fréquence vibratoire égale, on obtienne une perception plus "sombre" de la phonation. Et a contrario, une élévation du larynx ainsi qu'un étirement des lèvres génère un tractus plus court, ce qui conduit à une perception plus "claire" de l'émission vocale. Comme nous le verrons plus loin, les chanteurs sont habitués à jouer sur ces configurations afin d'amener leur vocalisation à une "couleur" vocale recherchée.

Pour *A. Giovanni* : "Dans le cadre de la parole, les fréquences de résonance conditionnent la perception des voyelles. Le locuteur doit donc les maintenir aussi stables que possible dans les zones formantiques caractéristiques de chaque voyelle. Mais lorsqu'il

cherche à augmenter l'intensité perçue de sa voix, il peut être amené à accorder la fréquence de la première résonance au premier ou au second harmonique selon le degré d'ouverture de la voyelle recherchée"

Pour ce faire, il procédera donc à des modifications de ses articulateurs suivant les configurations énoncées plus haut.

1.3.2.2.2. Accord résonantiel chez les chanteurs

Le chanteur, lui, est généralement amené à faire un compromis : son but est bien évidemment de maintenir autant que possible les résonances acoustiques du conduit vocal dans les zones caractéristiques de la parole. Cependant, il peut être amené à chercher un équilibre entre l'intensité sonore, l'intelligibilité, le timbre, et l'esthétique (*Nathalie Henrich Bernardoni, 2012*)

Pour ce faire, le chanteur va façonner ses résonateurs suivant le son attendu, en modifiant la géométrie de son tractus vocal.

N. Henrich distingue globalement deux types d'accord phono-résonantiel :

Une adaptation induite par les contraintes acoustiques de production vocale, avec un accord $R1:f_0$, tel que nous l'avons évoqué plus haut. La proximité de la fréquence fondamentale avec la première fréquence de résonance du conduit vocal est essentielle pour transmettre efficacement les premiers harmoniques, ceux qui contribuent le plus à l'intensité vocale.

Une adaptation induite par le style, avec un accord $R1:f_2$. Cet accord est le témoin d'une recherche de timbre particulier, sans nécessité physio-acoustique. On le retrouve dans de nombreux styles de chant et il marque le choix d'une production vocale très sonore et très timbrée.

Néanmoins, dans le cadre du chant lyrique, un autre type d'accord peut venir s'ajouter, c'est l'accord $R2:nf_0$, appelé "singing-formant". Il s'agit d'un formant qui apparaît entre 2500 et 5000 Hz, plage correspondant aux fréquences les mieux perçues par l'oreille humaine, permettant ainsi une intensité vocale inégalée.

Toujours d'après *Henrich*, dans le chant lyrique, la fréquence de résonance 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 peuvent être ponctuellement observés.

Cette étude cite notamment le cas de la voix soprano, où un accord $R2:2f_0$ est souvent observé dans une partie de la tessiture, accompagnant l'accord $R1:f_0$. En effet, il n'est pas rare de produire des sons au-delà de la première résonance (autour de 330 Hz), notamment dans les aigus chez les femmes. Cette spécificité demande donc aux chanteurs d'adapter leur geste vocal afin de maintenir la fréquence de la première résonance $R1$ à proximité du premier harmonique f_0 . Pour ce faire, les adaptations utilisées peuvent être une ouverture buccale doublée d'un abaissement de la mâchoire.

Cependant, il semblerait que dans l'extrême aigu de la voix de soprane, la seconde résonance R2 puisse prendre la relève de la première (R1) et être ajustée au premier harmonique (accord R2:f0) par certaines chanteuses pour maintenir l'accord avec f0.

Le couple mis en jeu lors de ces accords phono-résonantiels est donc variable suivant les contraintes acoustiques, le timbre recherché par le chanteur mais également, d'après *Henrich, Smith & Wolfe - 2011*, suivant la hauteur dans laquelle se situe l'effort vocal et suivant la catégorie vocale du chanteur.

En effet, il semblerait que différentes stratégies de résonance s'offrent aux chanteurs, dans les fréquences aiguës, comme nous l'avons évoqué plus haut pour les sopranos, mais également lors de vocalisations dans les fréquences graves.

Dans les voix graves, la résonance peut être accordée tout en restant dans les plages de résonance normale pour la voyelle émise. On observe donc régulièrement que plusieurs stratégies d'accords sont employées car chacune ne peut se produire qu'à certaines notes voire à une seule hauteur.

Il semblerait également que suivant la catégorie vocale, au sens pupitre vocal, des différences subsistent dans la stratégie utilisée.

1.3.2.2.3. Accord résonantiel lors du passagio :

D'après *Neumann, Schunda & al (2005)*, lors d'un changement de mécanisme laryngé, l'accord des formants semble être le moyen le plus approprié pour gérer la transition et l'égalisation des mécanismes.

En effet, il faut envisager le changement de mécanisme comme le reflet d'un processus d'ajustement de l'espace glottique, mais également du tractus vocal, suivant les demandes de changement de fréquences fondamentales f0.

Au cours de ce changement M1 vers M2, on peut observer que les formants F1 et F2 constituant l'accord résonantiel initial commencent par suivre les harmoniques dans leur montée, ce qui entraîne généralement des modifications des articulateurs telles qu'une élévation du larynx, ou un raccourcissement de l'espace pharyngé par exemple.

Cependant, à une hauteur critique, les formants ne peuvent plus suivre : ils tombent en dessous de la fréquence des harmoniques. Un nouveau mode de résonance est alors établi, avec de nouveaux accords entre F1, F2 et les différents harmoniques du tractus. L'équilibre de rayonnement redevient optimal.

On peut noter que cette modification peut se faire par étapes, notamment dans les registres de voix plus "profondes", comme les basses et les barytons, pour qui cet échelonnement serait nécessaire.

La technique la plus utilisée par les chanteurs classiques pour la gestion du passagio est appelée "couverture du son", qui consiste en un abaissement de F1 et de F2, en abaissant le larynx tout en allongeant le pharynx ainsi qu'en réduisant l'ouverture de la bouche à l'aide d'une protrusion des lèvres.

Il existe des alternatives à ce type de transition : le chanteur peut chercher à rester au maximum dans le mécanisme 1, et laisser ses formants suivre le plus loin possible les harmoniques lors de leur montée. Cette manœuvre conduit à un son “ouvert”, comme un cri. On appelle cela une “violation de registre”.

1.3.3. Respiration et pression sous-glottique

1.3.3.1. Respiration : rappels

Comme nous avons pu le voir plus haut, le cycle respiratoire lors de la phonation est bien différent du cycle respiratoire au repos. On peut y observer un allongement du temps d’expiration et un raccourcissement du temps inspiratoire, ainsi qu’une augmentation des volumes mobilisés à chaque cycle.

Un locuteur sain contrôle la phase expiratoire à l’aide des muscles abdominaux, et sa phase inspiratoire devient totalement passive, sous l’effet du relâchement de ces derniers. Ce relâchement va entraîner une descente complète du diaphragme ainsi qu’un élargissement du diamètre thoracique afin d’augmenter le volume pulmonaire.

Dans la phonation chantée, les muscles intercostaux externes seront également mobilisés, afin d’obtenir un élargissement de la cage thoracique encore plus important.

1.3.3.2. Pression sous-glottique et phonation

La phonation est classiquement définie comme étant le résultat d’un équilibre entre différentes forces physiques. C’est ce que nous allons vous décrire.

Dans un premier temps, les cordes vocales doivent être correctement positionnées de part et d’autre de la ligne médiane (position fermée dite “pré-phonatoire”) avec une tension appropriée. Elles opposent ainsi une certaine résistance à l’écoulement de l’air.

D’après *A. Giovanni* : “Dans le cadre de la phonation, le mécanisme de la vibration correspond en la résolution d’un conflit entre les forces de fermetures des cordes vocales (contraction musculaire du muscle vocal lui-même et élasticité) d’une part, et les forces qui tendent à les écarter (pression sous-glottique) d’autre part.”

B. Amy de la Bretèque ajoute alors que “la masse d’air amenée par la poussée expiratoire, rencontrant la résistance des cordes vocales, est portée à un certain niveau de pression, dite pression sous-glottique.”

Cette pression sous-glottique va, à un moment donné, dépasser le seuil de cette résistance : c’est le seuil de pression phonatoire, lui-même dépendant de la raideur des plis vocaux. L’air, poussant ainsi contre les plis vocaux, va tendre à écarter les bords libres des cordes vocales, jusqu’au moment où une petite quantité d’air (dite “puff” d’air), va s’en échapper.

La pression sous-glottique diminue alors, et les cordes vocales se referment, sous l’effet de leur force de rappel élastique, et sous l’effet de Bernoulli.

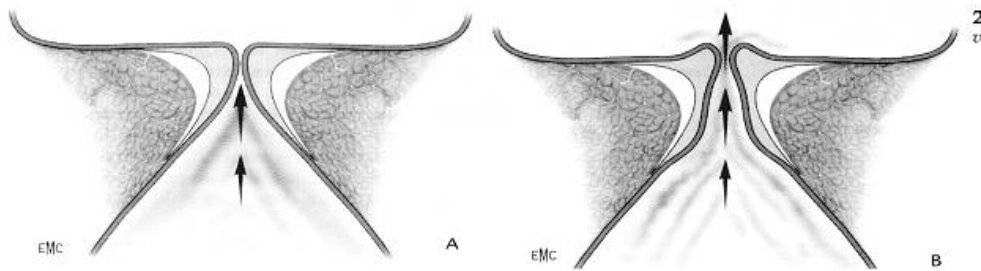


Fig. 15 : coupe frontale des cordes vocales illustrant la résolution du conflit élastique entre l'air sous-glottique (force d'ouverture) et les forces musculaires et élastiques des cordes (force de fermeture)

Schéma 10 : D'après A. Giovanni - Anatomie et physiologie de la phonation

Dès lors qu'elles sont à nouveau fermées, les forces expiratoires étant toujours en action, le même phénomène d'écartement se reproduit alors, de façon périodique générant de nouveaux cycles vibratoires et provoquant ainsi, la mise en vibration des cordes vocales.

La fréquence vibratoire des cordes vocales est donc représentative du nombre de cycles ouverture/fermeture par seconde.

Le Huche ajoute alors que l'air s'échappant à chaque battement de la vibration cordale va transiter dans les cavités de résonance en constituant une masse d'air sus-glottique. La vibration va donc, par la suite, se propager à l'intérieur du tractus vocal et connaître les modifications que nous avons traitées plus haut dans cette étude.

1.3.3.3. Pression sous-glottique, intensité et fréquence fondamentale

Les variations de pression sous-glottique ont des effets sur deux qualités acoustiques de la voix :

- La hauteur :

F. Le Huche définit la hauteur comme "la fréquence de la variation de pression correspondant au son émis. Elle dépend directement de la périodicité du mouvement des lèvres glottiques, c'est-à-dire en pratique, du nombre d'ouvertures glottiques par seconde."

Cette hauteur peut être modifiée à l'aide de la raideur des cordes vocales et de la masse vibrante (comme nous l'avons indiqué dans l'équation énoncée plus haut dans cette étude), mais également par la pression sous-glottique.

En effet, l'augmentation de la pression sous-glottique est responsable d'une augmentation de la fréquence car elle vient modifier la tension de la corde vocale, et donc par la même occasion, l'amplitude de vibration et sa fréquence. On peut l'observer principalement dans les fréquences basses, lorsque les cordes vocales sont courtes et détendues.

Mais cette interaction peut également s'observer dans le sens inverse : une augmentation de la fréquence fondamentale via une modification de la raideur des plis vocaux déplacerait alors le seuil de pression phonatoire : afin de maintenir la même amplitude vibratoire, la pression sous-glottique devra inévitablement augmenter.

- L'intensité vocale :

N. Henrich qualifie l'intensité vocale comme "une fonction croissante de la pression sous-glottique appliquée en entrée de l'instrument vocal."

En effet, l'intensité vocale entretient une relation linéaire avec la pression sous-glottique : plus la pression sous-glottique augmente, plus le son sera intense car pour pallier l'élévation fréquentielle, la force d'adduction entre les cordes vocales devra être plus importante, entraînant ainsi, un temps de contact prolongé entre les cordes.

A. Giovanni nous explique que : "l'augmentation du temps de contact est un facteur qui s'oppose à l'augmentation de fréquence et qui permet la transformation en augmentation de l'intensité vocale"

Les chanteurs formés comptent beaucoup sur leur contrôle à la fois, de la hauteur mais aussi de l'intensité vocale. Contrairement aux non-chanteurs, ils sont formés pour pouvoir les faire varier l'une comme l'autre de manière indépendante.

1.3.3.4. Pression sous glottique, registres vocaux et notion de résonance

Les chanteurs vont donc venir jouer de ces différentes interactions entre la pression sous-glottique, l'intensité vocale, la fréquence fondamentale et le temps d'ouverture des cordes vocales.

Cependant, la pression sous-glottique ne va pas uniquement jouer un rôle de soutien aux variations fréquentielles, nous allons voir qu'elle participe également à l'équilibre résonantiel lors d'un effort vocal.

Tout d'abord, une étude de *N. Henrich*, nous fait part d'idées très importantes : globalement, le temps de contact des cordes vocales lors d'un cycle vibratoire serait plus important au cours du registre M1 que lors du registre M2.

Le lien entre le temps d'ouverture des cordes vocales et l'intensité dépendrait du mécanisme laryngé. En effet, au cours du M1, l'intensité et le temps d'ouverture des cordes vocales seraient inversement corrélés : plus l'effort vocal est intense, plus le temps d'ouverture serait court. Cependant, au cours du M2, aucune corrélation n'a été retrouvée. Cela pourrait s'expliquer par une activité du muscle vocalis (thyro-aryténoïdien) moindre en M2 qu'en M1.

Le lien entre le temps d'ouverture et la fréquence fondamentale varierait également selon le mécanisme laryngé : au cours du M2, le temps d'ouverture des cordes vocales (quotient ouvert) et la fréquence fondamentale seraient inversement corrélés : plus haute est la fréquence fondamentale, plus court est le temps d'ouverture des cordes vocales et donc plus faible est le quotient ouvert. Mais là encore, aucune corrélation n'est clairement retrouvée au cours du M1.

Cette étude met en lumière une information particulièrement intéressante : les chanteurs sembleraient utiliser une méthode de "smoothing" (lissage) afin d'éviter les sauts fréquentiels qui génèreraient des "voice break" (littéralement, "cassure vocale") lors d'un changement de mécanisme laryngé. Et pour ce faire, ils chercheraient à ce que leurs valeurs

de quotient ouvert (temps d'ouverture des cordes vocales) soient identiques lors de leur transition d'un mécanisme à l'autre.

Pour cela, il faut que le quotient ouvert en M1 soit faible car le chanteur continuera en M2 à monter dans les fréquences plus hautes, où on le sait, le temps d'ouverture des cordes vocales est bien plus court là aussi. Il faut donc que le chanteur réduise son temps d'ouverture en M1 de façon à atteindre la plage de valeurs communes aux deux mécanismes.

Afin de réduire son quotient ouvert (QO) en M1, il est nécessaire de venir d'augmenter l'intensité vocale (I) car ils sont inversement proportionnels.

On obtient l'idée suivante :

$$\boxed{\nearrow} I \text{ en M1} = \boxed{\searrow} QO \text{ en M1} \Rightarrow QO \text{ en M2 similaire au QO en M1} \Rightarrow \text{Transition lissée}$$

La transition se ferait alors tout en douceur, de façon quasi imperceptible.

Il semble donc évident que la pression sous-glottique entre elle aussi en jeu dans l'égalisation des mécanismes, afin de venir augmenter l'intensité vocale.

Lorsque l'on augmente la pression sous-glottique, on vient également augmenter l'intensité car cela entraîne une diminution du quotient ouvert. Donc, afin de "lisser" le passage du changement de mécanisme, il faut venir réduire le quotient ouvert en augmentant l'intensité, et donc en modifiant la raideur des cordes vocales et/ou en augmentant la pression sous-glottique.

On retrouve également cette idée chez *Titze* qui a proposé que l'égalisation lors d'un changement de mécanisme puisse s'accompagner soit, d'un contrôle d'adduction plus important, soit d'une augmentation de la pression pulmonaire. Une pression pulmonaire augmentée devrait augmenter l'amplitude de la vibration des cordes vocales, réduisant ainsi le quotient ouvert et enrichissant le timbre.

Sundberg appuie lui aussi cette théorie. Il a été retrouvé au cours d'une étude que les chanteurs ont en moyenne doublé la pression sous-glottique lorsqu'ils ont augmenté la fréquence fondamentale d'une octave. Ainsi, non seulement les amplitudes harmoniques sont augmentées par une augmentation de la pression sous-glottique, mais aussi, la distribution spectrale est modifiée en faveur des harmoniques supérieurs.

Nous pouvons donc voir que même si l'accord des formants, tel que nous avons pu le voir plus haut, est le moyen le plus adapté d'égaliser les mécanismes lors d'un changement, le rôle du quotient ouvert fréquemment réduit pendant ce passage indique un contrôle adductif important pouvant également contribuer au maintien d'une bonne résonance.

2. Facteurs influençant la production vocale chantée

2.1. Genre

Tout d'abord, au niveau anatomique, il existe une différence entre le larynx féminin et le larynx masculin. En effet, le cartilage thyroïde, qui abrite les plis vocaux, est plus large chez l'homme que chez la femme d'où la saillie de la pomme d'Adam. Ainsi, les plis vocaux s'étendent sur une plus grande longueur chez les hommes que chez les femmes, respectivement 22 à 27 millimètres et 17 à 20 millimètres.

En ce qui concerne l'utilisation des mécanismes laryngés M1 et M2, ceux-ci coexistent chez l'homme et la femme sans être mobilisés de la même façon.

En voix chantée, les hommes et les femmes alternent entre le M1 et le M2. Il existe toutefois des distinctions notables dans l'utilisation des mécanismes laryngés dans la voix chantée selon les genres.

L'homme utilise de préférence le M1 en chant surtout dans les catégories graves de la voix chantée. L'utilisation du M2 pour l'accès aux aigus est notée dans les catégories aiguës des voix d'hommes telle que la voix de ténor. Néanmoins, lorsqu'on parle de "voix de poitrine" et de "voix de tête" chez l'homme il s'agit le plus souvent de deux registres résonantiels distincts en mécanisme M1.

Le mécanisme laryngé 1 de l'homme (de Ré1 à Sol3) serait plus étendu que celui de la femme (de Ré2 à Sol3). De plus, nous avons vu que chez l'homme, dans les notes graves, l'augmentation de la hauteur est assurée par la mise en tension du TA, ce qui n'est pas le cas chez la femme.

La femme, selon sa catégorie vocale mobilise de préférence le M1 ou le M2. La voix de soprano nécessite de manière quasiment exclusive le M2, tandis que les autres catégories vont alterner et changer de mécanisme plus facilement selon les notes produites.

Les chanteuses en voix de soprano sont amenées à produire des notes très aiguës. Dans ces cas-là, des adaptations des registres résonantiels sont nécessaires pour adapter le tractus vocal.

Ainsi la "voix de poitrine" est communément associée au mécanisme M1, et la "voix de tête" au mécanisme M2 mais ce sont surtout les adaptations de registre résonantiel, pour les notes les plus aiguës, qui génèrent ces appellations.

2.2. Spécificités de la voix chantée en regard de la voix parlée

En voix parlée, les hommes et les femmes utilisent de manière quasiment exclusive le M1, alors que leur utilisation est plus variable dans le chant comme nous venons de le voir.

Lors d'une production parlée, l'homme n'utilise que de manière très occasionnelle le M2. La femme utilisera plus facilement le M2 bien que le M1 reste prédominant.

Les étendues vocales en voix parlée selon le genre sont les suivantes :

- De 170 à 250 Hz pour les femmes, soit de Mi2 à Si2 environ donc 7 demi-tons.
- De 75 à 140 Hz pour les hommes, soit de Ré1 à Ré#2 environ donc 11 demi-tons.

En voix chantée, l'étendue vocale est bien plus importante qu'en voix parlée, elle recouvre près de 39 demi-tons (Ré1 à Fa4) chez l'homme et 33 demi-tons (Ré2 à Si) chez la femme (*Voir schéma 5 précédemment présenté*).

Par ailleurs, il y a des spécificités dans l'utilisation des registres résonantiels.

En voix chantée, les classifications des gammes des voix d'alto et de soprano, ainsi que des voix de ténor et de baryton, ne sont pas corrélées avec leurs valeurs de R1 et R2 pour la parole. Plutôt que de garder les résonances aux valeurs utilisées pour la parole, les chanteurs font varier leurs valeurs de R1 et R2 lorsque la fréquence fondamentale F0 varie pendant le chant.

Pour les notes basses (en dessous de Si2), les écarts types de R1 et R2, exprimés en pourcentage, sont similaires pour le chant et la parole chez tous les chanteurs. Cependant, au-dessus de cette note, la variation proportionnelle de R1 est environ réduite de moitié. Cela s'explique probablement par la recherche d'une valeur optimale définie pour chaque résonance dans les aigus, en particulier pendant l'accord de résonance. Alors que pour la parole, les valeurs de R1 et R2 doivent seulement tomber dans la plage attendue pour la voyelle souhaitée.

2.3. Distinction chanteurs / non chanteurs

Assurément, il n'y a pas de distinction anatomique entre un chanteur expérimenté et une personne qui ne chante pas. C'est l'entraînement de la voix qui va créer des différences dans la pratique. Cette dernière réside dans une ou plusieurs techniques de respiration, des ajustements au niveau des plis vocaux ou des résonateurs.

La posture globale du corps est primordiale dans la technique vocale afin de créer un état de détente et une colonne d'air idéale pour la phonation en voix chantée.

Le contrôle de la respiration thoracique ou abdominale ainsi que le ressenti des mouvements internes sont mieux perçus chez des chanteurs expérimentés.

Enfin, au niveau laryngé, le chanteur acquiert une maîtrise des muscles TA et CT afin de contrôler le changement de mécanisme laryngé. Le passage d'un mécanisme laryngé à un autre sera plus brutal pour une personne non-expérimentée en raison de l'absence de contrôle musculaire.

De plus, un autre élément joue un rôle dans le changement de mécanisme, il s'agit de la variation des quotients ouverts et fermés. Chez les chanteurs, lors d'un changement de M1 vers M2, l'idée est de réduire au maximum le quotient ouvert en M1, puisqu'il est naturellement bas en M2. Ils peuvent jouer notamment sur l'intensité et la pression sous-glottique afin que la transition soit plus douce. Grâce à toute cette technique et cette maîtrise, la perception de ce passage sera masquée chez les chanteurs expérimentés.

Ainsi, le chanteur est formé au bon contrôle de sa voix tant en intensité qu'en hauteur. Grâce à la modification de son tractus vocal, il est capable de couvrir une gamme plus large de fréquences et d'intensités. Contrairement au non-chanteur, il est formé pour pouvoir les faire varier l'une comme l'autre de manière indépendante. Par exemple, il semble probable que de nombreux sujets non formés augmentent habituellement l'adduction glottale lorsqu'ils augmentent l'intensité vocale.

3. Aspects physiologiques lors du chant

Lors d'une prestation vocale, nous pouvons parfaitement imaginer que le corps humain est le théâtre de nombreux bouleversements. Nous avons pu voir à quel point il est capable d'adaptations lors de la phonation, mais il est intéressant de voir quelles sont les répercussions de la phonation sur le corps humain.

3.1. Effets généraux du chant sur le corps

Bien que le chant soit généralement associé à une forme de loisir, ses effets sur le bien-être et la santé en général ne sont plus à prouver. Il interagit avec nos états émotionnels, aurait des répercussions sur notre respiration, notre circulation sanguine ainsi que sur notre système hormonal. Son action est même prouvée dans le cadre de pathologies respiratoires, de maladies chroniques (maladie de Parkinson par exemple), de troubles de l'humeur ou encore de syndromes démentiels ou d'aphasies.

Voyons de plus près ses effets sur notre corps.

3.1.1. Les changements respiratoires

Comme nous avons pu le voir précédemment, la respiration est à l'origine même de la phonation. L'air expiré est source d'énergie pour le chant et l'articulation, et il semble donc évident que des changements respiratoires ont lieu lors d'un effort phonatoire.

En effet, dans le chant, l'utilisation répétée des organes phonatoires mais également des structures voisines, génère non seulement une coordination de tous les sous-systèmes de la phonation, mais permet, par la répétition d'entraîner et d'améliorer la fonction pulmonaire. Ce bénéfice est bien connu et a pu être prouvé dans des études portant sur une population générale, mais également chez des patients présentant des pathologies respiratoires chroniques.

Chez le chanteur professionnel sain, on peut retrouver ce qui s'apparente à une "réserve de respiration". Cela signifie qu'il pourrait ajuster son mode de respiration de façon à transformer le plus efficacement l'énergie cinétique en énergie sonore.

La pratique du chant permettrait donc un renforcement des muscles respiratoires et de cette façon, à une respiration optimisée.

3.1.2. Les changements circulatoires

Parallèlement aux changements respiratoires, des modifications du système circulatoire peuvent être relevées. De nombreuses études ont montré une augmentation significative de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle systolique et diastolique en réponse à des conditions de performances à haut stress.

De plus, il semblerait que le système circulatoire soit modifié sous l'action de l'arythmie sinusale respiratoire. Il s'agit d'un phénomène physiologique spécifique qui permet une accélération des échanges gazeux pulmonaires et qui permet d'économiser de l'énergie cardiorespiratoire en supprimant les battements cardiaques inutiles ainsi que les ventilations inefficaces durant l'expiration.

Pour certains chercheurs, chanter pourrait donc entraîner à plusieurs reprises des synergies entre le système respiratoire et le système circulatoire afin d'obtenir la meilleure correspondance et développer un cycle respiratoire plus efficace.

Le chant induirait donc davantage de variabilité dans la fréquence cardiaque, ce qui serait une bonne chose car une variabilité réduite serait un facteur de risque de mort cardiaque subite et d'événements d'arythmie, mais également de troubles psychiatriques tels que la dépression et l'anxiété.

Des expériences ont permis de prouver que lorsque la structure de la musique chantée est régulière, les variations de la fréquence cardiaque s'homogénéisent avec la fréquence et le tempo de la musique.

3.1.3. Les changements hormonaux

En plus des changements vus ci-dessus, il a été prouvé que le chant en groupe permettrait d'aider les personnes présentant de l'anxiété ou des comportements dépressifs. Les hormones libérées lors d'une telle activité auraient un rôle déterminant dans le sentiment d'appartenance, de lien social mais également de connexion et plus globalement sur la qualité de vie.

Il en est de même pour une étude mesurant l'hormone d'ocytocine, que l'on identifie comme une des hormones clés dans les comportements sociaux et d'affiliation. On a constaté que l'ocytocine augmentait la confiance, réduisait les comportements négatifs et augmentait les capacités de théorie de l'esprit, indiquant une implication directe de l'ocytocine dans les processus de liens sociaux et de proximité interpersonnelle. Pendant cette étude, il a été montré une augmentation de cette hormone chez quatre chanteurs après une prestation de chant improvisée. On retrouve également une élévation du taux d'ocytocine après un cours de chant chez des sujets chanteurs et des sujets amateurs dans une autre étude.

Cette augmentation ne serait pas comparable au taux retrouvé après la participation à un groupe de parole, c'est donc réellement le chant qui induirait un bien-être psychologique individuel de même qu'une réponse sociobiologique.

De plus, une pratique du chant ou d'un instrument de musique permettrait l'augmentation de la sécrétion d'immunoglobuline A, qui serait le premier rempart aux bactéries et aux infections virales. On observe une augmentation d'autant plus importante si les taux sont pris après une performance vocale par rapport à une mesure après des répétitions.

Enfin, il a été prouvé lors d'une étude sur deux groupes issus de chorales que la bêta-endorphine, surtout connue pour ses effets analgésiques, euphoriques et sédatifs, serait libérée de manière accrue au cours des répétitions de chant, et que le chant déclencherait plus généralement la libération d'endorphines, permettant une augmentation de la tolérance à la douleur.

Cependant, toutes les études portant sur les changements hormonaux durant une activité de chant ne sont pas parvenues à un consensus. Plusieurs variables, comme le type d'interventions, de participants et de genres, influencent les résultats de ces recherches. Il faut donc prendre ces informations avec recul et esprit critique.

Néanmoins, la pratique du chant, et notamment en chorale, est de plus en plus étudiée pour ses potentiels effets sur la longévité et la qualité de vie ainsi que son incidence sur la rémission dans différents contextes pathologiques.

3.2. Manifestation des difficultés pendant la prestation vocale

La représentation est un moment charnière pour le sujet soumettant sa prestation vocale au public.

Comme nous avons pu le voir plus haut, chanter a différentes répercussions sur notre corps et lors d'une situation de stress telle qu'une prestation vocale, on peut relever des modifications significatives de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle, mais également une modification hormonale ainsi qu'une perte de complexité de la réponse cardiovasculaire, pouvant indiquer la difficulté d'adaptation physique à des conditions stressantes, et cela, peu importe le niveau de professionnalisme du sujet.

L'étude de *Viggo Pettersen and Kåre Bjørkøy*, nous permet d'appuyer cette idée de modifications respiratoires mais également, d'ajouter une composante musculaire dans cette gestion du stress lorsque le sujet est confronté à un stimulus émotionnel. En effet, il semblerait que les chanteurs classiques modifieraient leur rythme respiratoire lorsqu'ils vocalisent sous l'effet d'un stimulus émotionnel. Par rapport à une situation neutre, leurs résultats indiqueraient également qu'une vocalisation sous le coup d'un stimulus émotionnel faciliterait une activité plus importante de l'abdomen latéral inférieur dans la paroi abdominale, ainsi que du thorax, par rapport à l'activité musculaire observée pour une vocalisation sans stimulus émotionnel.

Une étude de *Daisy Fancourt, Lisa Aufegger et Aaron Williamon* a étudié la différence entre une situation de faible stress, durant une répétition sans public, et une situation stressante pendant une prestation en public, chez 15 sujets chanteurs professionnels.

Cette étude se concentrait sur les taux en cortisol et cortisone qui, lorsqu'ils sont augmentés, sont révélateurs d'une réponse physiologique à un stress aigu.

Les analyses ont permis de mettre en avant une distinction très intéressante : durant la situation de stress élevé, de fortes augmentations de ces taux ont été relevées, tandis que lors de la condition de stress faible, on en observe une diminution significative. Or, d'un point de vue biologique, une diminution de ce rapport cortisol/cortisone serait une forme de réponse de relaxation et pourrait se produire parallèlement à une réduction du niveau de stress.

Ces résultats très intéressants suggéreraient que chanter n'est jamais une activité neutre pour notre corps et qu'elle a systématiquement des répercussions biologiques. Lors d'une situation stressante de chant, les marqueurs biologiques de stress seraient très présents, mais lorsque cette activité est pratiquée dans de bonnes conditions, sans pression d'aucune nature, elle pourrait être, en soi, une activité de réduction de stress.

Pauline Larrouy-Maestri aborde également cette thématique de stress lors d'une performance, sous l'appellation d'état d'anxiété et plus précisément de l'anxiété de performance, qui est à l'origine de symptômes somatiques et/ou cognitifs.

Aux manifestations physiologiques que nous avons déjà abordées plus haut (fréquence cardiaque, respiration, hormones) viennent s'ajouter une modification de l'activité électrodermale et de la tension musculaire, avec une transpiration plus importante et parfois des maux de ventre ainsi qu'une diminution de la production salivaire. Des symptômes cognitifs tels que des troubles attentionnels et mnésiques, ainsi que des pensées négatives et un manque de satisfaction peuvent également se manifester.

Cette étude met également en avant l'influence du stress sur la justesse mélodique en voix chantée. Elle a permis de prouver que l'effet du stress dépend de l'enjeu lors de la phonation, et que la qualité de la prestation vocale semble liée à la perception des manifestations de l'état d'anxiété par le sujet lui-même. En effet, il semblerait que plus le sujet perçoit ses symptômes comme étant intenses, plus il produit des erreurs de justesse.

3.3. Gestion des difficultés liées à l'anxiété de performance et intervention orthophonique

Afin de conclure ce contexte théorique, il nous semblait important de venir souligner ce que ces études nous enseignent sur les interventions à mettre en place afin de gérer au mieux les difficultés liées à la représentation vocale et donc potentiellement, par extension, à mieux gérer les éventuels changements de mécanisme laryngé.

L'étude de *Viggo Pettersen and Kåre Bjørkøy* est conclue sur une idée particulièrement pertinente : "Les résultats indiquent que l'état d'esprit d'interprétation ne doit pas être sous-estimé lors de la formation, par rapport à des compétences techniques améliorées en chant classique.

En d'autres termes, l'état émotionnel est un élément majeur à prendre en compte lors d'une prestation. Et cet apprentissage de gestion de l'état émotionnel est tout aussi important que l'enseignement de la technique vocale en elle-même chez le chanteur lors de sa formation.

Le *Journal de l'association française des professeurs de chant* ajoute "l'importance des sensations corporelles dans l'ajustement du geste vocal".

Dans une démarche d'approche globale du sujet, il semble donc primordial d'être au fait de ces notions, notamment dans un suivi orthophonique, chez un sujet chanteur mais aussi chez un sujet non chanteur, comme nous le transmet *Pauline Larrouy-Maestri* : "Un des objectifs de la prise en charge logopédique des troubles vocaux est de permettre au patient d'utiliser son instrument vocal dans un contexte écologique. Considérant que parler/chanter hors des séances peut engendrer une anxiété de performance, qui elle-même, entraîne des manifestations physiologiques et psychologiques ayant une influence sur les performances vocales, il semble important d'en tenir compte au fil de la rééducation".

Se pose donc la question des éléments à mettre en place dans ce contexte.

Tout d'abord, une guidance auprès du sujet apparaît comme l'élément le plus naturel à mettre en place : le sensibiliser à ses sensations, à renouer avec ses impressions

proprioceptives. Pour cela, des explications sur l'anatomie et l'enjeu de cette détente sont primordiales.

Cependant, un concept apparaît de plus en plus, notamment avec l'essor des nouvelles technologies : celui du biofeedback.

Cette méthode consiste en une mesure d'une donnée physiologique/organique afin d'en connaître sa norme, mais également dans quelles circonstances elle évolue. Le but à terme est d'apprendre à contrôler cette donnée, afin d'améliorer ou maintenir un bon état de santé, et dans notre cas, un geste vocal sain, sans répercussions biologiques négatives sur le corps.

Des études du feed-back sur le chant font d'ores et déjà part de très bons résultats.

Notre étude s'inscrit dans cette volonté de développer davantage l'utilisation du biofeedback et de le rendre plus accessible à la pratique orthophonique.

4. Problématique et hypothèses

Comme nous avons pu le voir, la littérature se heurte donc à une question sur les modifications physiologiques (et notamment le stress physiologique) générées chez un sujet lors d'un changement de mécanisme laryngé. Si la littérature fait état de l'étude anatomique et fonctionnelle des changements des mécanismes laryngés d'une part et de l'étude des répercussions physiologiques des prestations et de la pratique vocale chez des chanteurs ou non chanteurs d'autre part, l'étude des répercussions physiologiques du changement de mécanisme laryngé chez les chanteurs et non chanteurs n'a, à ce jour, pas encore été étudiée.

Le changement de mécanisme laryngé est, lui-même encore étudié dans son fonctionnement et ses particularités, ce qui pourrait expliquer pourquoi il n'est pas encore, pour le moment, corrélé à des données physiologiques.

Une enquête auprès de sujets chanteurs et non chanteurs pour analyser leurs réponses physiologiques et perceptives serait alors intéressante.

L'objectif de cette étude exploratoire est donc de participer à l'enrichissement des connaissances relatives à cette thématique ainsi qu'au développement de la méthode d'exploration afin de permettre à d'autres études d'étendre la recherche. Nous partirons du postulat que les chanteurs connaissent et maîtrisent leurs mécanismes laryngés et que les non-chanteurs n'ont jamais pratiqué le chant ou aucun instrument de musique.

D'après les données de la littérature, nous formulons les deux hypothèses suivantes.

Une hypothèse physiologique : nous attendons qu'un changement de mécanisme laryngé soit corrélé avec la manifestation d'un stress physiologique, et ce d'autant plus chez des sujets non-chanteurs.

Une hypothèse perceptive : nous attendons que le changement de mécanisme soit plus détectable chez les sujets non-chanteurs (qu'ils soient hommes ou femmes) et les hommes (qu'ils soient chanteurs ou non-chanteurs), et qu'il soit plus inconfortable pour des sujets non-chanteurs.

4. Matériel et méthode

1. Population

Au total 28 sujets ont participé à notre étude. Les hommes représentaient 43% et les femmes 57% de l'échantillon. Sur l'ensemble des participants, il y avait une part égale de sujets chanteurs et de sujets non-chanteurs. Après avoir écouté les enregistrements, nous avons dû mettre de côté 2 chanteurs, 5 non-chanteuses et 1 chanteuse, faute de respect des consignes ou à cause d'erreurs de manipulation de notre part.

Les critères d'inclusion à cette étude étaient les suivants : des individus majeurs, hommes ou femmes, chanteurs ou non-chanteurs, ne présentant pas de troubles de la voix. Les sujets chanteurs devaient avoir une pratique de plusieurs années (au moins 2 ans) en conservatoire ou en chorale. Les sujets non chanteurs devaient n'avoir jamais fait de chant ou d'instrument de musique.

Ainsi, nous avons réparti les participants en quatre groupes : les sujets hommes chanteurs (CH), les sujets hommes non-chanteurs (NCH), les sujets femmes chanteuses (CF) et les sujets femmes non-chanteuses (NCF). Chaque sujet est porteur d'un numéro d'anonymat grâce à ce code composé des caractéristiques du sujet ainsi que d'un numéro de passage.

	Hommes	Femmes	Totaux
Chanteurs	7	4	11 (55%)
Non chanteurs	3	6	9 (45%)
Totaux	10 (50%)	10 (50%)	20

Tableau descriptif de la population étudiée

2. Matériel

2.1. BIOPAC MP36R

Les enregistrements physiologiques étaient réalisés à l'aide de la centrale BIOPAC MP36R. Il s'agit d'un système d'acquisition de données équipé d'amplificateurs universels qui permettent d'enregistrer de nombreux signaux physiologiques.

Il nous semblait très important que le système d'acquisition de ces signaux soit le moins invasif et perturbant possible pour les sujets car il aurait pu, le cas contraire, modifier leurs réponses biologiques et émotionnelles. Cette centrale nous permettait donc un compromis entre une acquisition efficace et une perturbation de l'utilisateur qui se voulait minimale.

D'après *Hamdi. H*, "les signes les plus nets d'une réaction émotionnelle concernent les changements dans l'activité du système nerveux végétatif. Selon les émotions, on peut observer des variations de température et la conductivité électrique de la peau, des augmentations ou des diminutions de la fréquence cardiaque, du volume respiratoire, etc."

Chaque signal ne doit cependant pas être analysé seul mais plutôt en corrélation avec d'autres signaux afin d'avoir une interprétation globale de l'état émotionnel du sujet.

Nous avons donc décidé de centrer nos acquisitions sur plusieurs de ces paramètres : la fréquence cardiaque, la fréquence respiratoire et l'activité électrodermale.

2.1.1. La fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque est définie, d'après le *Dictionnaire Médical 2021 de l'Académie de Médecine*, comme la "rapidité des contractions du cœur, mesurée par le nombre de contractions ventriculaires par minute". Sa norme serait, au repos et chez l'adulte, de l'ordre de 70 battements par minute.

Il est intéressant de noter que, d'après *Rainville et al.* "les changements rapides de la fréquence cardiaque sont couplés, en partie, aux changements de la respiration, car l'augmentation de la pression intra-abdominale pendant l'inspiration active un réflexe barorécepteur et produit des augmentations rapides de la fréquence cardiaque".

La fréquence cardiaque est en relation avec les activités végétatives et certains centres nerveux supérieurs d'intégration, ce qui la met en lien direct avec le traitement des émotions.

C'est en réalité sa variabilité qui peut être révélatrice de l'état émotionnel du sujet.

Il existerait 3 phases dans la réponse physiologique à la suite de la présentation d'un stimulus émotionnel :

- Une première phase de décélération de l'activité,
- Puis, une phase d'accélération,
- Et pour finir, à nouveau une phase de décélération.

L'importance de ces mouvements peut être associée à des émotions différentes, à valeur plutôt positive ou plutôt négative.

L'étude de la variabilité de la fréquence cardiaque liée aux émotions a été documentée principalement dans la peur. Par exemple, les crises de panique ont été associées à des niveaux de fréquence cardiaque plus élevés.

L'étude de *Rainville et al.* fait état de fortes augmentations de la fréquence cardiaque observées dans la peur, la colère, le bonheur et la tristesse, par rapport à une condition neutre.

2.1.2. La fréquence respiratoire

La fréquence respiratoire est définie, d'après le *Dictionnaire Médical 2021 de l'Académie de Médecine*, comme "nombre de cycles respiratoires par unité de temps". Chez l'adulte, la fréquence normale est de 16 à 18 cycles (inspiration/expiration) par minute.

La respiration est le plus souvent réflexe, mais il est possible de la contrôler consciemment, lors de certaines activités précises : le chant en fait partie.

En état de repos, la respiration se trouve lente et légère. A contrario, on la retrouve rapide et profonde dans le cadre de réactions émotionnelles et/ou d'activités physiques importantes.

On peut également souligner que les changements de fréquence respiratoire sont variables selon chaque individu : une étude de *Masaoka et Homma* a montré les différences de personnalité dans les schémas de respiration pendant le stress mental et la charge physique. Le niveau d'anxiété individuel affecterait donc la fréquence respiratoire, et en particulier le temps expiratoire.

L'anxiété d'anticipation, qui va particulièrement nous intéresser dans cette étude, a été définie comme le temps entre la présentation de l'avertissement et la stimulation. Elle augmenterait la fréquence respiratoire et ce changement ne pourrait pas être associé à la demande métabolique classique du corps humain.

Les changements respiratoires en réponse à l'anxiété seraient donc affectés par les centres supérieurs liés à l'émotion : la sensation respiratoire et les modifications des schémas respiratoires seraient impliquées ou provoquées par l'anxiété et la détresse.

On suppose qu'une augmentation de la fréquence respiratoire serait causée par une évaluation inconsciente dans l'amygdale (élément central de notre système limbique, centre de nos émotions) et que ces deux activités se produiraient en parallèle : la stimulation de l'amygdale produirait une augmentation rapide de la fréquence respiratoire suivie d'un sentiment de peur et d'anxiété. Une période de quelques centaines de millisecondes (entre 350 à 400 ms) serait nécessaire après le début de l'inspiration pour que la représentation consciente ou l'étiquetage de l'événement physiologique émerge au sujet.

2.1.3. L'activité électrodermale

L'activité électrodermale ou réponse électrodermale est définie comme étant un réflexe psycho-galvanique (autrement dit, l'action du courant continu sur les organes vivants, comme les muscles et les nerfs), lié à des changements de potentiels électriques et à la résistance de la peau.

Elle correspond à l'activité de glandes particulièrement présentes sur les paumes des mains qui sécrètent la sueur et permettent la transpiration.

Pour cette étude, nous avons procédé à une analyse exosomatique, qui consiste à placer des électrodes sur deux doigts adjacents de la main, afin d'y faire circuler un très faible courant électrique imperceptible pour le sujet. On peut ainsi mesurer les variations de résistance provoquées par les changements de sudation.

L'AED est connue pour être un très bon indicateur de stress, générant des réponses phasiques et toniques auxquelles s'ajoutent parfois des variations transitoires, consécutives ou non à une stimulation ou à une action du sujet (respiration forte, mouvement).

2.2. Electroglottographe

Les participants étaient également équipés d'un électroglottographe ou EGG. Il s'agit d'un dispositif qui permet d'obtenir une image de l'accolement et de l'ouverture des cordes vocales grâce à la mesure de l'impédance électrique entre deux électrodes placées de part et d'autre du larynx. Bien qu'il ne donne pas une information réelle de la surface d'ouverture de la glotte, il permet cependant une très bonne représentation du cycle d'oscillation des cordes vocales, et permet une bonne mesure de sa fréquence car il est dénué de bruits aérodynamiques.

Le signal EGG se présente sous la forme d'une onde caractérisée par une modulation rapide, synchronisée avec le cycle d'ouverture et de fermeture des cordes, ainsi qu'une modulation lente, révélatrice des mouvements du larynx.

2.3. Montre Empatica E4

Afin de réaliser un double contrôle des paramètres cardiaques, respiratoires et électrodermaux, les participants étaient équipés d'un dispositif Empatica E4.

Cette montre enregistre différentes informations telles que :

- Le changement de volume sanguin à partir d'un capteur de photo pléthysmographie, à une fréquence d'échantillonnage de 64Hz,
- L'activité électrodermale, à une fréquence d'échantillonnage de 4Hz
- La fréquence cardiaque, à une fréquence d'échantillonnage de 1Hz
- L'accéléromètre, à une fréquence d'échantillonnage de 32Hz
- Ainsi que la température cutanée, à une fréquence d'échantillonnage de 1Hz.



Présentation de la montre Empatica E4

Comme expliqué précédemment, le matériel installé se voulait le moins invasif possible, afin de laisser à notre sujet toute la liberté de ses mouvements dans ces exercices vocaux. Cependant, il est important de ne pas négliger l'anxiété que pouvait générer la situation expérimentale en elle-même, ainsi que l'installation d'un matériel inconnu. Nous tâcherons de garder ces idées à l'esprit lors de l'analyse de nos résultats.

2.4. Microphone AKG 1000 S

Enfin, nous avons utilisé un microphone AKG 1000 S afin de procéder aux enregistrements audios de nos sujets.

3. Protocole expérimental

3.1. Recueil du consentement et installation du matériel

Pour réaliser cette étude, nous avons élaboré un protocole d'expérimentation afin de recueillir les données nous semblant nécessaires. Tous les enregistrements ont été sauvegardés de manière anonyme grâce au code établi précédemment. Les passations se sont déroulées sur 5 sessions, d'une journée complète à chaque fois.

Nous avons articulé la passation en plusieurs étapes. Tout d'abord, le sujet devait remplir un formulaire d'inclusion dans l'étude et de consentement d'utilisation des données (*annexe 1*). Un numéro d'anonymat lui était alors attribué suivant le code énoncé plus haut dans cette partie.

Par la suite, il fallait installer le matériel nécessaire aux mesures.

Les paramètres physiologiques étaient recueillis grâce au BIOPAC comprenant donc :

- Un capteur au niveau de l'annulaire de la main faible pour la mesure de la fréquence cardiaque,
- Deux électrodes sur l'index et le majeur de la main faible afin de mesurer la réponse électrodermale,
- Ainsi qu'une ceinture abdominale permettant de mesurer la fréquence respiratoire.

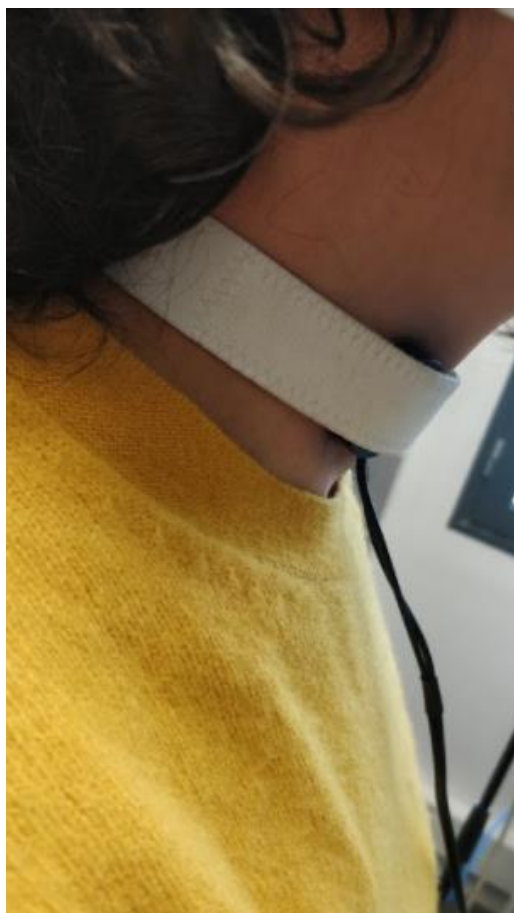


Présentation de l'installation des capteurs mesurant l'activité cardiaque ainsi que la réponse électrodermale



Présentation de l'installation de la ceinture abdominale

Enfin, il fallait installer un électroglottographe (EGG) dans le but d'obtenir un signal laryngé.



Présentation de l'installation de l'électroglottographe

Afin de synchroniser les mesures du BIOPAC, de la montre Empatica E4 et les données audios du microphone AKG 1000 S, nous réalisons une capture vidéo à partir de nos téléphones portables, montrant en temps réel, l'allumage de la LED de la montre, suivi du signal sonore correspondant au démarrage du BIOPAC. Ce signal sonore était capté par le micro des enregistrements vocaux, ainsi nous pouvions retrouver le tracer dans les données audios par la présence d'un pic spectral.

La vidéo permettait de mesurer le nombre de millisecondes entre l'allumage de la LED de la montre et le signal sonore afin de pouvoir synchroniser les données lors de notre analyse.

La partie traitant des paramètres aérodynamiques que nous offrait la station EVA2 a dû être écartée en raison de la situation sanitaire liée au COVID-19. Ces conditions exceptionnelles ne nous permettaient pas de garantir une sécurité optimale pour nos participants.

3.2. Déroulement de la passation

La passation se déroulait dans une salle calme, au LPL. Nous avons choisi de ne pas utiliser la chambre sourde afin de pouvoir aérer la salle entre chaque sujet tel que le protocole sanitaire lié au COVID-19 l'exigeait. Le sujet se tenait debout, face au micro à une distance d'environ 30 cm. Les instruments installés sur lui avaient pour objectif de ne surtout pas l'entraver dans sa liberté de mouvements.

Avant de démarrer l'exercice des sirènes à proprement dit, nous devons mesurer la fréquence fondamentale du sujet afin de savoir à quelle hauteur débiterait la manipulation. Cette donnée était obtenue grâce à l'enregistrement sur Audacity et l'analyse sur Praat du segment de phrase suivant : "Monsieur Seguin n'avait jamais eu de bonheur avec ses chèvres" (*Daudet, Lettres de mon moulin, 1869*). Une fois la fréquence fondamentale (dite F0) retenue, nous pouvions choisir la hauteur initiale d'où débiteraient les sirènes à produire.

Le sujet pouvait tester une production de sirènes sur la hauteur de sa F0 afin de se familiariser avec la consigne et tester l'installation du matériel.

Pour les femmes, l'exercice débutait à partir de la fréquence fondamentale, se situant généralement autour du La2 (220 Hz). Un ensemble de 4 sirènes était alors vocalisé à cette même hauteur. Puis nous montions d'un demi ton et ce même ensemble de sirènes était à nouveau vocalisé à la nouvelle hauteur, et ainsi de suite. Cette élévation s'étalait sur environ 7 demi-tons.

Pour les hommes, nous demandions un premier ensemble de sirènes au niveau de la fréquence fondamentale se situant généralement aux alentours de La1 (110 Hz), puis nous enchaînions directement à la quinte car le changement de mécanisme est plus haut chez l'homme. Ce qui pourrait donner par exemple pour une sirène initiale sur une F0 en La1, une seconde en Ré2 (146,8 Hz). Puis nous reprenions notre élévation d'un demi-ton à chaque fois, de la même façon que pour les femmes. Il s'agissait de couvrir une hauteur de 7 demi-tons afin de percevoir un changement de mécanisme laryngé.

Les sirènes servant d'exemple pour nos sujets, étaient modélisées à l'aide d'un générateur de balayage fréquentiel afin de leur fournir un modèle qui ne soit pas en voix humaine pour ne pas biaiser leur perception.

Pour faciliter la compréhension des consignes, les sujets avaient également un schéma représentant les sirènes à réaliser (*annexe 2*).

Les sirènes demandées étaient au nombre de 4 : 2 droites vocalisées sur les voyelles /a/ et /i/ et 2 renversées, là encore effectuées sur les voyelles /a/ et /i/. Nous avons choisi ces voyelles pour le geste vocal relativement opposé qu'elles nécessitent, à savoir que l'instant d'élévation ou d'abaissement du larynx ne sera pas le même chez l'une et chez l'autre. La voyelle /i/ donne au larynx une position relativement haute, et la voyelle /a/ une position davantage abaissée.

3.3. Questionnaire d'auto-évaluation adapté du VHI chanteurs

Une fois les mesures physiologiques et vocales réalisées, le sujet devait remplir un questionnaire d'auto-évaluation de sa voix lors des enregistrements. Ce questionnaire est inspiré du VHI chanteurs (*annexe 3*), en reprenant les items nous semblant les plus pertinents pour cette étude. Les sujets avaient pour consigne de le remplir en fonction de leurs ressentis lors des exercices effectués juste avant, et non pas par rapport à leurs impressions quotidiennes sur leur voix. Ces résultats formeront une partie de notre analyse perceptive que nous détaillerons dans les résultats.

4. Analyse des enregistrements

Avant toute recherche de résultats et d'interprétation, une analyse des enregistrements était nécessaire.

Dans un premier temps, il nous fallait traiter les acquisitions audios et électroglottographiques. Ce traitement avait pour but de détecter les instants où se produisaient des changements de mécanisme laryngé mais également de noter des modifications du signal lorsque le changement était sur le point de se produire ou lorsque la voix de notre sujet présentait une certaine instabilité.

Ce n'est qu'une fois ces informations temporelles détectées que notre étude physiologique pouvait vraiment débuter.

4.1. Analyse temporelle et électroglottographique par PHONEDIT Signaux

PHONEDIT Signaux est un logiciel gratuit d'analyse des signaux sonores, aérodynamiques, articulatoires et électro-physiologiques développé par le Laboratoire Parole et Langage, d'Aix-en-Provence, en France. Il fournit un environnement complet pour l'enregistrement, la lecture, l'affichage, l'analyse et l'étiquetage de données multiparamétriques.

Nous avons utilisé la version 4.2 lors de nos enregistrements. Elle autorise le contrôle du poste de travail EVA2. Il est possible d'enregistrer directement les données aérodynamiques d'EVA2 avec Phonedit.

Les plugins PHONEDIT Signaux peuvent être utilisés dans un environnement Linux/Cygwin pour personnaliser les processus avec un script bash. Il fonctionne avec un système d'exploitation Windows récent sur PC.

Afin de procéder à l'analyse, il nous fallait ouvrir l'ensemble des signaux que nous avons enregistrés lors de nos passations. Cela comprenait donc :

- Le signal du microphone sur pied,
- Le signal correspondant à l'acquisition de l'électroglottographe,
- Le signal de synchronisation entre le BIOPAC et la station EVA2,
- Le signal représentatif de la fréquence fondamentale moyenne,
- Le calcul de l'intensité du signal audio,
- Le calcul de la fréquence fondamentale du signal audio.

La première étape était de repérer, à l'aide de la bande du signal sonore ainsi que celle de la synchronisation entre le BIOPAC et la station EVA2, l'instant où avait lieu le bip sonore servant à la synchronisation de nos appareils. Cela se manifestait sous la forme d'une courbe nette, en créneau, d'une durée de 500ms. Nous notions donc le temps de référence de la première partie de ce créneau, comme repère temporel.



Illustrations du repérage du signal sonore servant à la synchronisation. Ici, le signal avait donc lieu à 7s et 248ms, comme nous l'indique l'emplacement en bas à droite de l'image.

Une fois le début de l'acquisition repéré, nous devons écouter la bande son et rechercher tout élément pouvant s'apparenter à un changement de mécanisme laryngé : dès qu'un passage dans la bande son nous semblait être un changement de mécanisme, nous pouvions venir le comparer aux signaux de l'électroglottographe afin de le confirmer.

Avant tout, voici les courbes caractéristiques d'une vocalisation en mécanisme 1 et en mécanisme 2 :

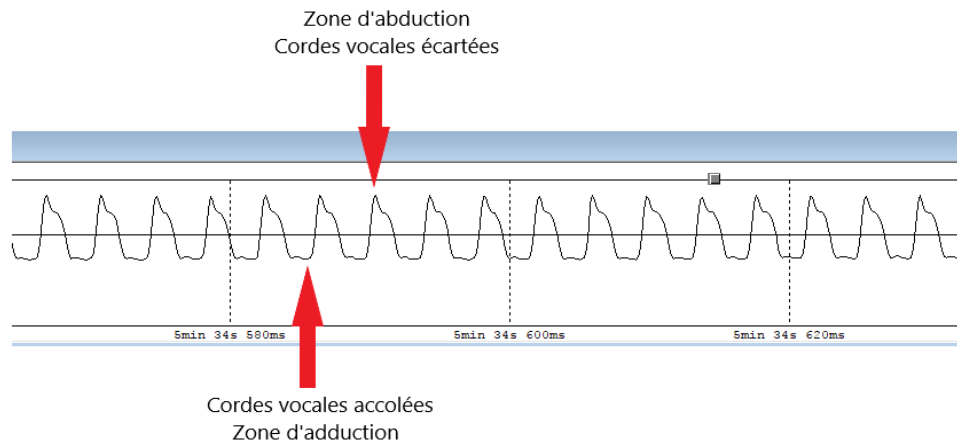


Illustration d'un enregistrement EGG lors d'une émission vocale en Mécanisme 1

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le mécanisme laryngé M1 se caractérise par des plis vocaux courts et épais, où toute la masse vibrante participe à la phonation.

Ces éléments génèrent un signal comme présenté ci-dessus, où les phases d'adduction et d'abduction sont particulièrement visibles. On comprend ainsi la notion de "mécanisme lourd", car l'accolement des cordes vocales y est particulièrement net et puissant.

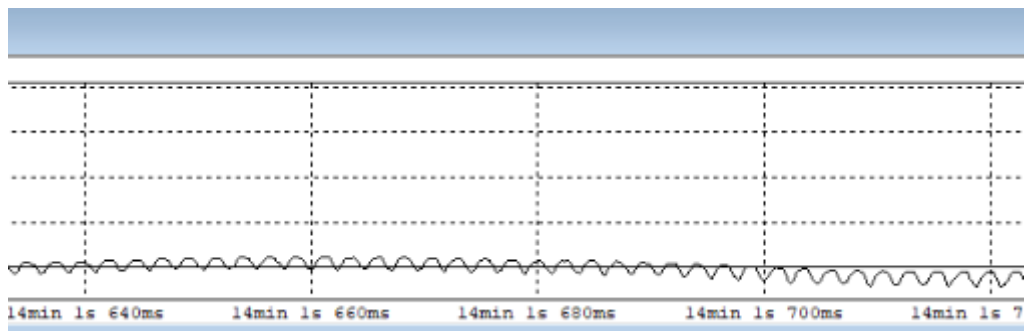


Illustration d'un enregistrement EGG lors d'une émission vocale en Mécanisme 2

Le mécanisme 2 quant à lui, est caractérisé par la mise en vibration de la partie superficielle des cordes vocales uniquement. Les plis vocaux y sont longs et moins épais, donc moins lourds. Ce mécanisme dit "léger" est donc caractérisé par une onde davantage sinusoïdale, où l'on ne retrouve pas de signes nets d'accolement.

Et à présent, voici des exemples de courbes spécialement remarquables que nous recherchions pour notre étude.

Passage M1 vers M2 :

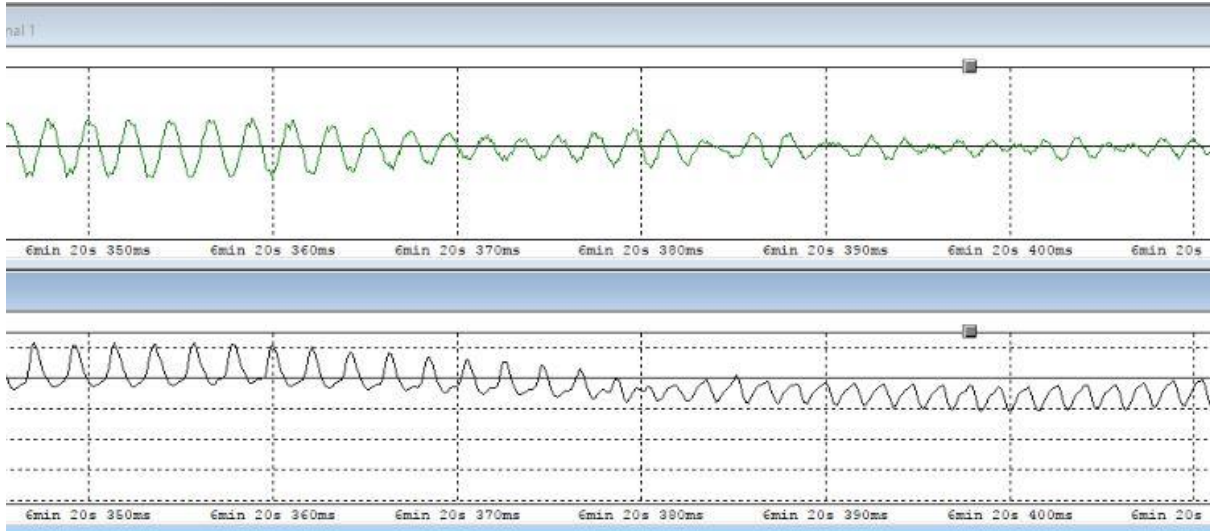


Illustration d'un changement de mécanisme laryngé M1 vers M2 à partir de l'enregistrement vocal (en vert) et électroglottographique (en bleu)

Passage M2 vers M1 :

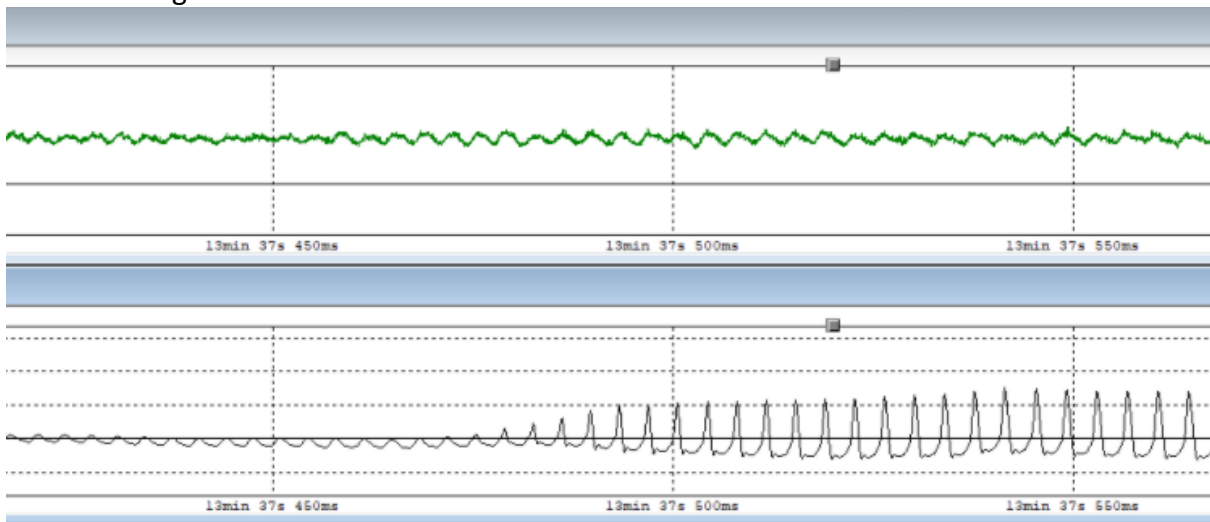


Illustration d'un changement de mécanisme laryngé M2 vers M1 à partir de l'enregistrement vocal (en vert) et électroglottographique (en bleu)

Nous pouvons voir, sur ces deux images, le très net passage d'un motif à un autre, signe d'un changement de mécanisme laryngé.

Chaque temps relatif aux perturbations observées retenait notre attention, et était répertorié dans un tableur, doublé de commentaires pour une évaluation plus qualitative, afin de connaître le contexte dans lequel s'inscrivait l'instant ciblé.

Ce sont ces informations qui nous ont permis de faire le pont avec nos acquisitions physiologiques.

4.2. Analyse des données physiologiques

A l'aide du tableur mentionné ci-dessus, nous avons entrepris une analyse des données physiologiques de nos différents enregistrements. Cette analyse était réalisée par un script python développé et adapté à notre étude.

Tout d'abord, nous avons établi différentes fenêtres à tester, afin de balayer un maximum l'événement ciblé, à savoir : le changement de mécanisme laryngé.

Les fenêtres étaient de :

- 1 seconde avant, et 1 seconde après l'événement cible,
- 2 secondes avant, et 2 secondes après l'événement cible,
- 1 seconde avant, et 3 secondes après l'événement cible.

Ces fenêtres devaient nous permettre d'obtenir une bonne vision de l'état avant et après le changement de mécanisme laryngé, qu'il soit de M1 vers M2 ou de M2 vers M1. Les deux dernières fenêtres se voulaient plus grandes et ciblées davantage sur l'après changement afin de pouvoir observer un potentiel effet de longueur à la réponse physiologique.

Au cours de ces fenêtres étaient calculés différents paramètres physiologiques :

- Pour la respiration : le volume moyen de la respiration et l'étendue des mouvements respiratoires.
- Pour la réponse électrodermale : la réponse moyenne et l'étendue des réponses électrodermales.
- Pour la fréquence cardiaque : la fréquence cardiaque moyenne et l'étendue des fréquences cardiaques.

Le script élaboré pour l'étude venait, par la suite, générer des graphiques représentatifs des variations de ces paramètres en opposant les résultats des sujets chanteurs et non-chanteurs dans les catégories hommes et femmes.

5. Jury d'écoute

Afin de procéder à une évaluation perceptive plus objective que le questionnaire adapté du VHI chanteurs, nous avons mis en place un jury d'écoute.

Pour cela, nous avons sélectionné, dans les passages entendus lors de nos analyses temporelles et électroglottographiques, les sirènes nous semblant les plus révélatrices. Il s'agissait de véritables changements de mécanisme laryngé, avérés par les signaux de l'électroglottographe, ou bien de passages sans changement.

Le jury était composé de 3 experts de la voix (1 phoniatre et 2 orthophonistes), qui avaient pour consignes d'écouter nos enregistrements à des temps précis et d'effectuer une cotation en 2 temps.

Tout d'abord, ils devaient annoter s'ils avaient perçu un changement de mécanisme laryngé ou non. Et, s'ils avaient bel et bien perçu un changement, ils devaient coter les sensations acoustiques qu'ils relevaient à l'aide d'une échelle inspirée du GRBAS, ne présentant que les items GRBA.

Chaque item devait être coté de 0 à 3 :

Altération du timbre sur la zone de passage			
G (perception globale du changement)	R (éraillement)	B (souffle glottique)	A (perte d'intensité)
0 : passage fluide	0 : non présent	0 : non présent	0 : non présente
1 à 3 : brusque à laborieux	1 à 3 : éraillement plus ou moins important	1 à 3 : souffle glottique plus ou moins important	1 à 2 : affaiblissement 3 : désonorisation

Les consignes et tableaux de cotation leur ont été transmis par mail (*annexe 4*), et les fichiers audios des enregistrements ont fait l'objet d'un envoi via WeTransfer.

5. Résultats

1. Résultats physiologiques

Tout d'abord, nous avons donc cherché à relever tous les instants mettant en jeu un changement de mécanisme laryngé chez nos sujets.

Pour une grande majorité, nous pouvions observer une modification nette du signal dans sa forme et dans son amplitude, comme sur les illustrations de la partie "Protocole expérimental". Ces instants nous montraient bien le passage d'un mécanisme à l'autre.

Cependant, l'analyse des signaux de l'électroglottographe était plus délicate pour d'autres sujets. En effet, et principalement dans un changement M1 vers M2, ils nous montraient une nette diminution de l'amplitude et ce, sans un véritable changement vers le mécanisme 2. Le sujet semblait conserver en partie son mécanisme 1 dans une amplitude extrêmement réduite.

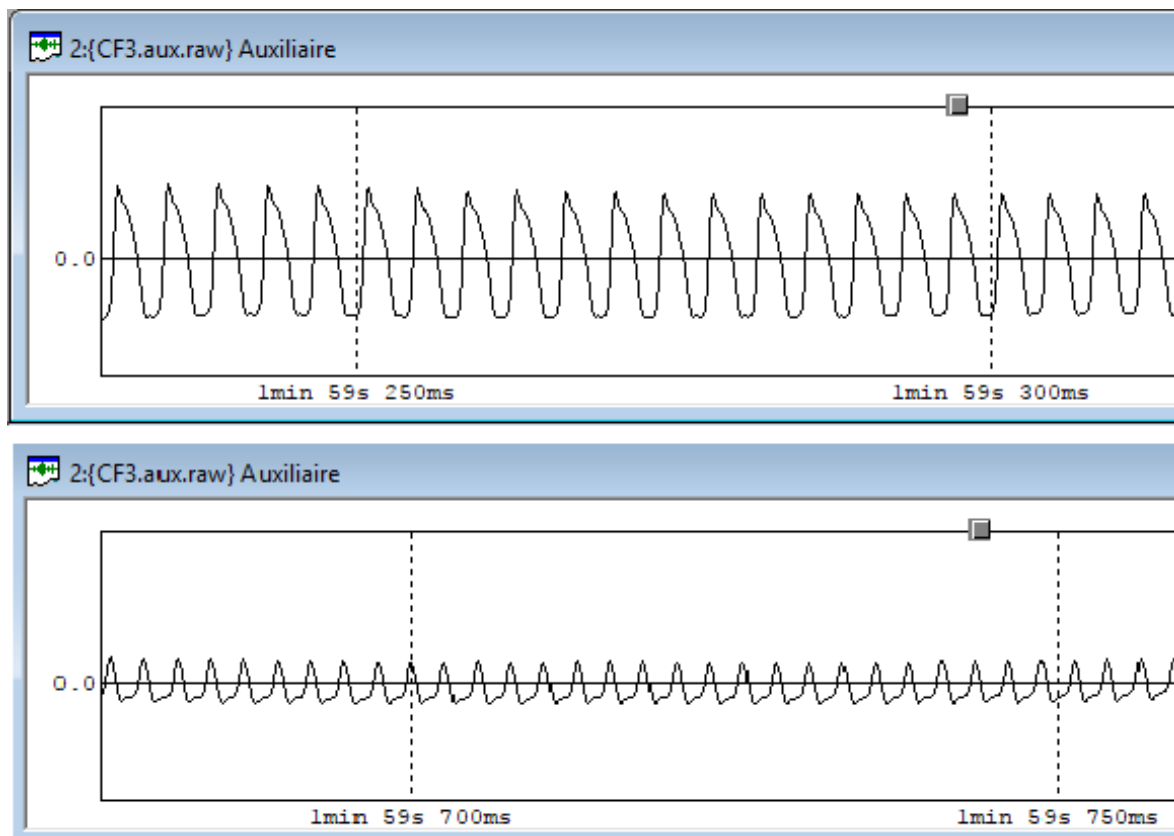


Illustration de la variation d'amplitude sans net changement de mécanisme chez un même sujet, à 400ms d'intervalle

Après observation de toute notre population, nous n'avons pas pu observer de tendance claire dans la manifestation de ces variations d'amplitude : elles ne semblaient pas plus marquées chez les sujets non-chanteurs que chez les sujets chanteurs, et semblaient apparaître tout autant chez les sujets hommes que chez les sujets femmes. Nous détaillerons ce qui pourrait être à l'origine de ces variations dans la partie discussion de notre étude.

Néanmoins, nous avons pris le parti de ne pas relever les temps de passage de ces phénomènes de variation d'amplitude. Ils sont certainement révélateurs d'une adaptation importante de l'espace glottique face à la montée dans les aigus, mais ils ne respectaient pas nos attentes d'un véritable changement de mécanisme laryngé.

A ces variations d'amplitude se sont inévitablement ajoutés des passages instables dans les signaux électroglottographiques où l'amplitude et le motif étaient irréguliers et confus. Nous n'avons, bien évidemment, pas relevé ces passages.

À la suite de ce repérage des instants nous semblaient intéressants, nous avons donc généré les données physiologiques respiratoires, cardiaques et électrodermales que nous souhaitons étudier. Cependant, lors de notre analyse, nous nous sommes rendu compte que les résultats de la montre Empatica et les données relatives à la fréquence cardiaque du Biopac n'étaient pas exploitables. Nous avons donc dû les écarter pour la suite de notre analyse physiologique. Nous en détaillerons les raisons plus tard.

Sur les graphiques que notre script a générés (*annexes 5, 6 et 7*), nous nous sommes concentrés sur les moyennes (légendées "*moy*") et les étendues (légendées "*dynam*") des réponses respiratoires ("*respi*") et électrodermales ("*EDA*"). Ces informations nous semblaient être les plus pertinentes et porteuses de sens.

Nous avons donc comparé d'un côté les résultats des sujets femmes, en opposant les chanteuses et les non-chanteuses, et parallèlement les résultats de sujets hommes, en opposant chanteurs et non-chanteurs.

Chaque pic représenté sur ces données marque un changement de mécanisme laryngé précédemment relevé, et chaque sujet a sa propre couleur. Lorsque le signal est plat, c'est qu'il n'y a aucune variation de ce paramètre relevée sur le temps de l'expérience.

Globalement, on peut noter qu'il y a une très grande variabilité dans les réponses que nous avons obtenues, qu'il s'agisse des réponses d'un même individu, ou dans une même catégorie de population, et encore de manière plus générale sur l'ensemble de notre panel. Il est donc impossible de déceler une tendance globale ou de conclure à un quelconque lien entre l'événement étudié et les résultats physiologiques.

Nous avons également cherché à comparer les résultats des différentes fenêtres en établissant des coefficients de corrélation afin de vérifier que nous ne passions pas à côté d'une information. Ces coefficients étaient tous du même ordre (autour de 0,9), cela nous indiquait donc que malgré la fenêtre grandissante ou décalée, les informations à cibler étaient les mêmes. Nos données n'étaient pas sensibles à la fenêtre d'observation, et donc toujours inexploitables en l'état.

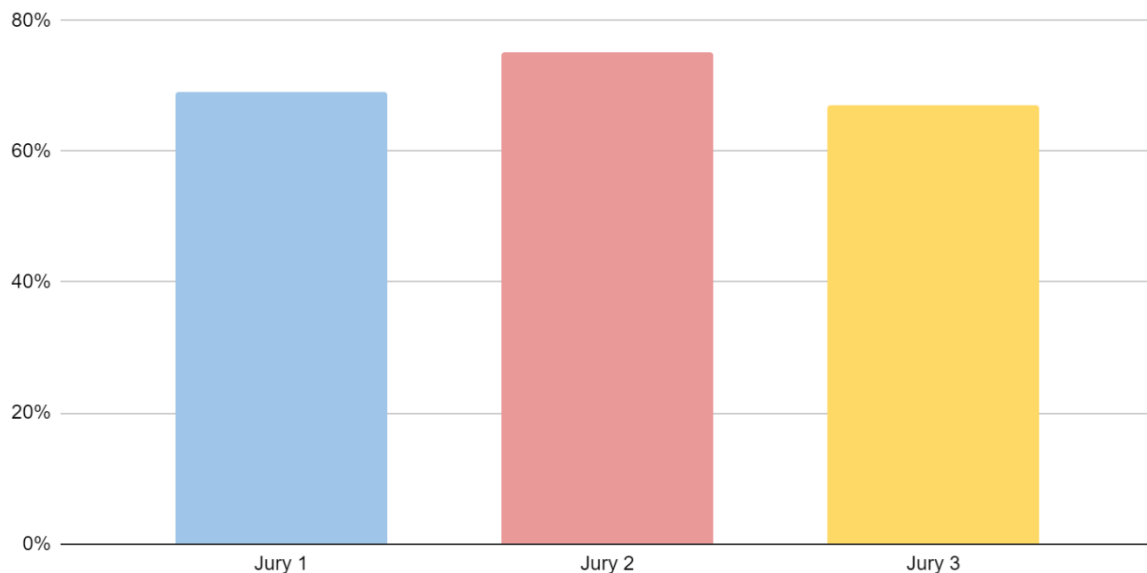
2. Analyse des évaluations perceptives

2.1. Evaluation perceptive objective : jury d'écoute

Une fois que nos jurys ont procédé à l'évaluation et à la cotation des passages que nous leur avons envoyés, nous avons procédé à une analyse de ces résultats.

Tout d’abord, nous avons regardé dans quelle proportion les changements de mécanisme laryngé étaient bien identifiés. Pour cela, nous nous basions sur la première cotation qu’ils devaient effectuer, à savoir s’ils relevaient ou non un changement de mécanisme laryngé. Les résultats sont présentés dans le graphique ci-dessous.

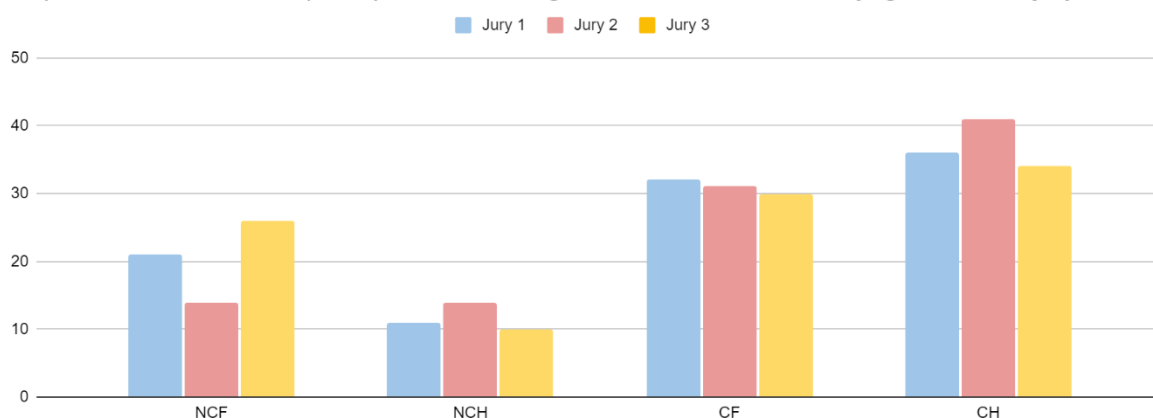
Proportion de changements de mécanisme laryngé perçus selon les jurys



Comme nous pouvons le voir, nos jurys ont globalement très bien perçu et identifié les changements de mécanisme laryngé à hauteur d’au minimum 65% chacun.

Cependant, nous avons cherché dans un second temps à identifier les classes de population qui avaient été à l’origine de mauvaises perceptions et donc de mauvaises cotations de leur part.

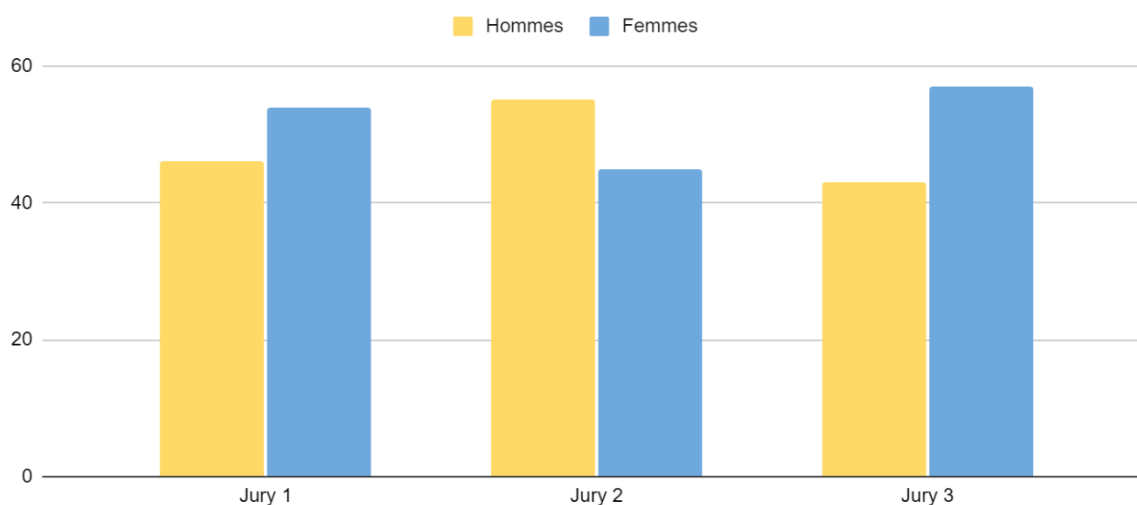
Proportion de mauvaises perceptions de changement de mécanisme laryngé selon les jurys



Ce diagramme nous montre une nette distinction dans les perceptions du jury entre les chanteurs et les non chanteurs. Le jury d’écoute a eu davantage de difficulté à identifier les changements de mécanisme laryngé chez les sujets chanteurs.

Pour finir, nous avons également regardé s’il y avait un effet du genre du sujet dans la perception du changement de mécanisme.

Proportions des mauvaises perceptions de changement selon le genre du sujet



Comme nous pouvons le voir, nous n'observons pas de net effet lié au genre du sujet. Les erreurs d'appréciation de changement de mécanisme laryngé n'étaient pas réalisées plus chez les hommes que chez les femmes.

À la suite de ces analyses, nous nous sommes penchés sur les répartitions des cotations G, R, B et A.

Une analyse statistique a été réalisée afin d'en dégager les grandes tendances. Voici les résultats :

Grade G : Fluidité du passage	Effet simple du sexe : les hommes sont significativement plus cotés que les femmes (df =11.75, p-value=0.0176)
	Pas d'effet de la pratique vocale
Grade R : Présence d'un éraïllement	Significativement plus élevé pour la population hommes que pour la population femmes (df = 11,36, p-value = 0,00016)
	Chez les hommes, on observe un plus grand effet de la pratique vocale (df = 11,63, p-value = 0,0019)
Grade B : Présence d'un souffle glottique	Significativement plus élevé pour la population hommes que pour la population femmes (df =89, p-value = 4.72 e-06)
	Chez les hommes, on observe un plus grand effet de la pratique vocale (df = 89, p-value = 3,07 e-05)
Grade A : Perte d'intensité	Significativement plus élevé pour la population hommes que pour la population femmes (df = 89, p-value = 4,72 e-06)
	Chez les hommes, on observe un plus grand effet de la pratique vocale (df = 11,88, p-value = 0,027)

2.2. Evaluation perceptive subjective : auto-évaluation adaptée du VHI chanteurs

Afin de procéder à une interprétation des données la plus juste possible, nous avons repris le barème de cotation du VHI chanteurs initial, à savoir :

Jamais	Presque jamais	Parfois	Presque toujours	Toujours
0	1	2	3	4

Cependant, étant donné que ce questionnaire était adapté, il nous semblait impossible de l'exploiter de cette façon. Nous avons donc transposé les résultats en pourcentage pour chacun des 3 items et pour chaque participant.

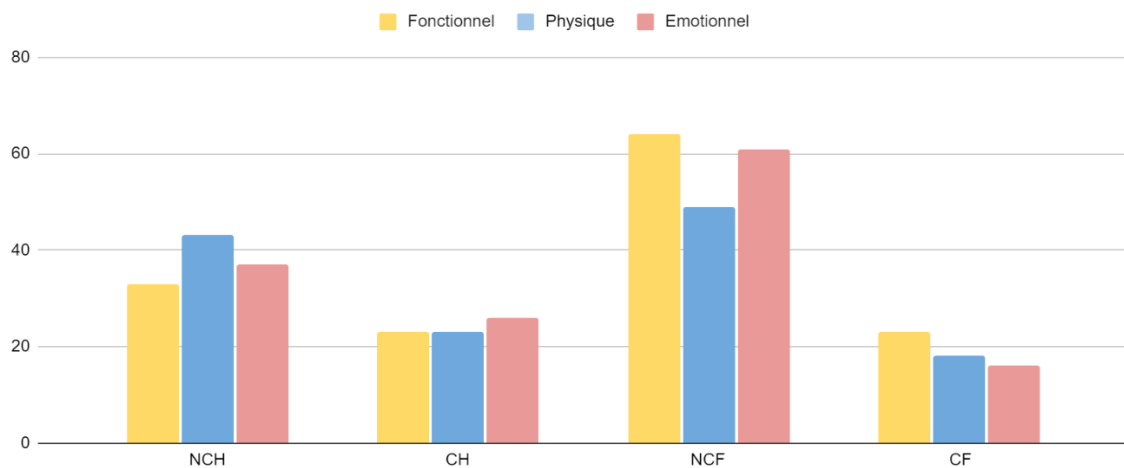
Ainsi, nous avons pu réaliser un schéma comparatif général pour chaque catégorie de la population et suivant chaque item (*graphique 1*), mais également deux graphiques nous permettant de comparer les sujets chanteurs avec les sujets non-chanteurs (*graphique 2*) et les sujets hommes avec les sujets femmes (*graphique 3*).

Pour rappel, voici les abréviations catégorielles utilisées pour cette analyse perceptive.

Catégories de population	Type d'items
C : Chanteurs NC : Non-chanteurs F : Femmes H : Hommes	F : Fonctionnel P : Physique E : Émotionnel

Les résultats généraux permettant de dégager les grandes tendances de cette analyse sont présentés dans les graphiques ci-dessous.

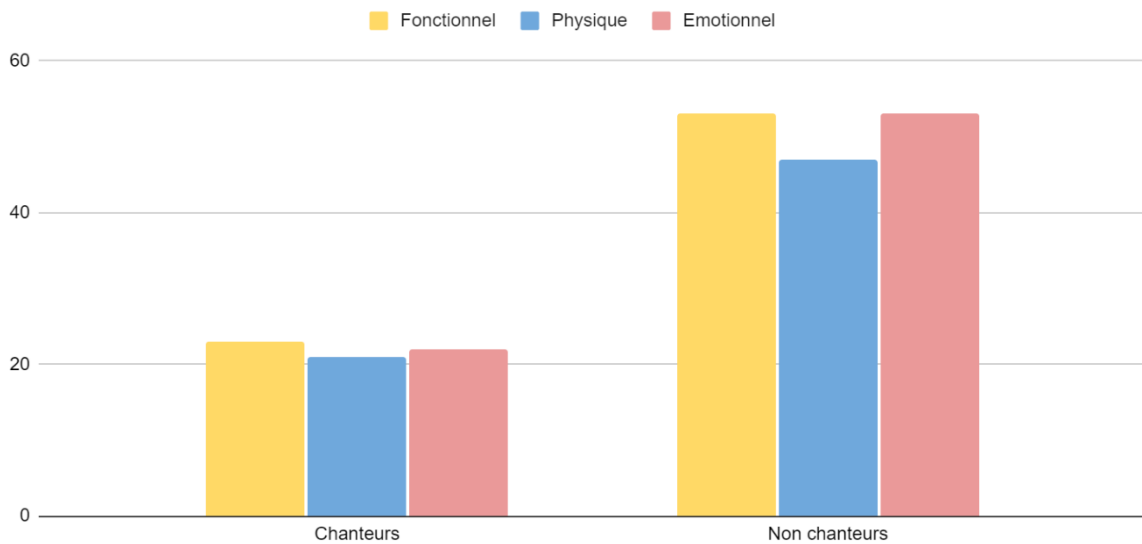
Pourcentages des paramètres du VHI chanteur adapté selon les catégories de population



Une certaine différence est notable lorsque nous analysons ce diagramme : en effet, les 2 populations de non-chanteurs se distinguent des 2 populations de sujets chanteurs. En outre, on peut observer que ce sont surtout les résultats des NCF qui sont particulièrement saillants, les résultats des NCH étant légèrement moins distincts des 2 autres populations.

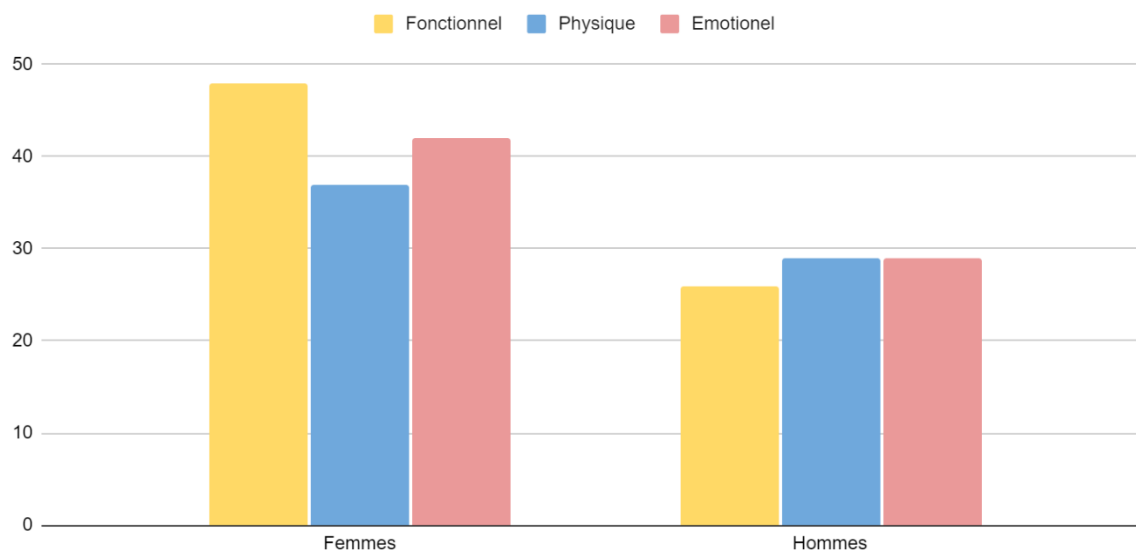
Lorsque l'on croise ces données, nous obtenons les résultats présentés dans les graphiques ci-dessous.

Pourcentages des paramètres du VHI chanteurs adapté selon la catégorie de population



Nous pouvons donc observer une nette tendance chez les sujets chanteurs, à se sentir globalement plus à l'aise lors de la réalisation de ces exercices.

Pourcentages des paramètres du VHI chanteurs adapté selon la catégorie de population



Ce dernier tableau comparatif, quant à lui, nous donne à voir globalement une distinction entre la perception des sujets hommes et la perception des sujets femmes.

Il semblerait que les femmes aient davantage verbalisé les difficultés qu'elles ont éprouvées lors de ces exercices, qu'elles soient chanteuses ou non chanteuses.

6. Discussion

1. Discussion du protocole

1.1. Limites

En amont du protocole, le recrutement nous a mis face à des difficultés. Il fallait recruter assez de sujets pour avoir une cohorte intéressante, tout en ayant des sujets suffisamment expérimentés ou inexpérimentés afin que la population soit pertinente et sensible à nos attentes. En effet, les sujets qui se voulaient non-chanteurs étaient parfois en réalité légèrement sensibilisés au monde de la musique, et a contrario, les sujets qui se voulaient chanteurs n'étaient parfois pas suffisamment expérimentés pour marquer une nette différence, il était alors difficile de ne pas rentrer dans un continuum concernant les qualités musicales de nos sujets. Or, cela aurait pu fausser nos observations en ne distinguant pas clairement les résultats d'une population à l'autre.

Ensuite, le cœur même du protocole était basé sur les exercices vocaux. Des sirènes droites et renversées étaient demandées et cela a mis en difficulté un certain nombre de sujets non-chanteurs, car la tâche était peu compréhensible pour eux. La sirène renversée notamment, était difficilement reproductible car ils ne percevaient pas toujours la différence par rapport à la sirène droite. Cela nous a parfois contraints à les écarter de l'étude pour non-respect des consignes.

A cette problématique s'est ajoutée la barrière de l'imitation. En effet, notre protocole était établi de telle sorte que nous ne montrions pas l'exemple de la sirène attendue au sujet de façon à ne pas générer une imitation de notre production vocale. Cependant, cette consigne nous mettait parfois en difficulté face aux sujets qui ne pouvaient pas réaliser l'exercice car ils ne le comprenaient pas, et nous ne pouvions pas les accompagner.

Enfin, nous avons observé, chez les sujets non-chanteurs notamment, un effet d'accoutumance à la fréquence. Entre deux ensembles de sirènes demandés, la variation de fréquence était d'un demi-ton et les sujets n'en percevaient pas toujours la différence. Cela entraînait un maintien de la hauteur sur plusieurs sirènes consécutives, retardant ou même annulant toute perspective de changement de mécanisme laryngé.

A cela s'est ajoutée une impression de "crainte" de monter dans les aigus. Les participants non-chanteurs n'osaient pas toujours monter en fréquences et semblaient refuser l'accès aux aigus que nous espérions. Cela pouvait d'une part, être dû à la mise en difficulté que pourraient représenter ces hauteurs et donc à l'appréhension de leur qualité vocale à cet instant. D'autre part, cela pouvait s'expliquer par le fait que nous étions trois expérimentateurs dans la même pièce que le participant et cela a pu être intimidant pour certains.

Au vu des exercices demandés, plus ou moins bien réalisés selon les difficultés évoquées, les sujets ne sortaient pas toujours de leur zone de confort qu'ils soient chanteurs ou non-chanteurs.

Au niveau physiologique, nous avons également retrouvé des limites. Malgré un protocole strictement établi, la tâche demandée a été vécue et réalisée différemment selon les participants, révélant des variabilités interindividuelles et intra-individuelles.

Les mesures variaient selon les conditions de passation. Nous pouvons évoquer la température de la pièce selon les jours et les moments de la journée, la durée de la passation selon le nombre de sirènes effectuées et la compréhension des consignes, mettant les sujets plus ou moins à l'aise dans la situation d'expérimentation.

Enfin, les paramètres physiologiques sont des données propres à chaque individu, celles-ci n'ont pas été relevées au repos pour chacun des sujets. Il est alors difficilement envisageable d'analyser ces données sans comparaison avec les données au repos.

Cependant, grâce à l'analyse perceptive effectuée grâce à l'adaptation du VHI chanteurs et au jury d'écoute, nous avons pu mettre en avant l'importance et la pertinence de ces paramètres dans notre protocole expérimental.

Le traitement des données a également révélé certaines limites. Les signaux électroglottographiques étaient parfois trop faibles et donc inexploitable. Les sujets concernés devaient donc être mis de côté.

Les résultats de la montre Empatica ont été écartés car ils étaient redondants avec les données du BIOPAC lorsqu'ils étaient bien recueillis, mais souvent absents pour un certain nombre de sujets.

Enfin, les données du BIOPAC relatives à la fréquence cardiaque ne montraient pas de résultats suffisamment satisfaisants pour être étudiés. La constante de temps de la réponse cardiaque était plus grande que la fenêtre d'étude établie pour les réponses électrodermales et la respiration. La fréquence cardiaque ne changeait donc pas suffisamment rapidement dans ce bref intervalle de temps pour révéler des résultats.

Pour finir, les participants se trouvaient dans un espace inconnu, et face à une situation souvent peu commune. Cela pouvait jouer sur leurs réponses physiologiques, en les mettant dès le début dans un état de stress, avec à terme, le risque de camoufler une potentielle réponse physiologique au moment du changement de mécanisme.

1.2. Ouvertures

En ce qui concerne le recrutement, les critères devront être mieux définis et plus stricts afin de délimiter clairement les deux populations pour une étude dans la lignée de celle-ci. En effet, nous avons constaté qu'il s'agissait d'un élément important et décisif pour mener à bien l'étude.

Pour pallier la difficulté des exercices vocaux tout en gardant la contrainte du changement de mécanisme, nous pouvons évoquer l'idée d'exécuter seulement des sirènes relatives à l'étendue vocale et des fusées.

De plus, afin d'éviter l'effet d'accoutumance que nous avons observé, il serait intéressant d'échelonner plus largement les fréquences initiales des sirènes, afin que la différence de l'une à l'autre soit plus nettement audible. Par la suite, il serait possible de revenir sur les hauteurs qui n'ont pas été chantées afin de compléter le spectre prévu initialement.

Afin d'aider les participants à oser monter l'accès aux aigus, il nous semble pertinent de modéliser la hauteur atteinte en temps réel par un retour visuel. L'ajout d'un feedback lumineux, ou du moins visuel, pourrait être une solution. Il traduirait la bonne montée fréquentielle aux participants et les encouragerait à aller la rechercher.

Pour les sirènes servant d'exemple, l'idée d'une synthèse vocale ou du moins, d'enregistrements semblant plus "humains" serait pertinente. Il ne faut pas couper le sujet de ses repères physiologiques. Les sirènes que nous avons créées avec un générateur fréquentiel étaient trop éloignées d'une voix humaine, les sujets ne pouvaient pas s'y identifier et donc, les reproduire, à moins d'avoir une formation musicale minimale.

2. Discussion des résultats

2.1. Données physiologiques

Les données physiologiques n'étant pas concluantes, elles ne portent pas à interprétation.

2.2. Résultats du jury d'écoute

Les résultats obtenus grâce au jury d'écoute montrent une distinction de perception entre les chanteurs et les non-chanteurs. Cela valide une de nos hypothèses qui consistait à dire que le changement de mécanisme serait davantage audible chez les sujets non-chanteurs car moins bien stabilisé et maîtrisé que chez nos sujets chanteurs.

Néanmoins, nous n'avons pas relevé de distinction de genre. Ce résultat est intéressant car nous aurions pu nous attendre à ce que les changements de mécanisme chez les femmes soient moins bien perçus que chez les hommes en raison de la hauteur des sirènes que nous leur demandions d'effectuer. En effet, les femmes ayant une étendue vocale généralement plus importante que les hommes, il n'aurait pas été impossible qu'elles soient plus à l'aise dans l'exercice et donc qu'elles masquent davantage la zone de passage.

L'analyse statistique du GRBA a révélé des résultats intéressants qui sont sujets à interprétation. Pour chacun des marqueurs, les hommes sont plus cotés que les femmes. Ces résultats corroborent l'une de nos hypothèses. En effet, les hommes sont davantage mis en difficultés que les femmes car la zone de changement de mécanisme se trouve à une hauteur plus éloignée de leurs fréquences usuelles.

Le marqueur global (G) et ceux de l'érailement (R), du souffle glottique (B) et de la perte d'intensité (A) sont donc plus cotés chez les hommes que chez les femmes.

Pour les marqueurs R, B et A, la différence entre chanteurs et non-chanteurs est d'autant plus marquée chez les hommes, on note donc un plus grand effet de la pratique du chant chez les hommes que chez les femmes.

Cependant, étant donné les effectifs, nous ne pouvons pas donner un critère qui serait plus contrasté qu'un autre entre R, B et A.

L'analyse de ces données dans la population homme rejoint l'hypothèse selon laquelle les non-chanteurs auraient plus de difficultés à stabiliser le changement de mécanisme.

2.3. Résultats du VHI chanteurs adapté

Les résultats obtenus au VHI chanteurs adapté mettent en évidence une distinction entre les chanteurs et les non-chanteurs. Ce résultat corrobore l'une de nos hypothèses initiales, à savoir que les tâches demandées seraient plus difficiles à réaliser pour nos sujets non-chanteurs et donc que leur analyse perceptive serait à l'image des difficultés éprouvées. Les exercices, probablement assez surprenants pour des sujets tout-venants, pouvaient les mettre en difficulté, contrairement aux sujets chanteurs, davantage familiarisés avec la notion de vocalises et de passage d'un mécanisme à l'autre.

Les distinctions dans les réponses des hommes et des femmes sont sujets à interprétation. Il est cependant difficile de véritablement conclure sur la raison de cette distinction. Nous pouvons penser de façon purement hypothétique que la fréquence des sirènes et la fréquence vocale, naturellement plus élevée chez les femmes, ont joué un rôle dans ce ressenti. En effet, comme nous l'avons abordé lors de la partie théorique, dans les aigus il n'est pas rare de produire des sons au-delà de la première résonance (autour de 330 Hz). Afin de maintenir un bon accord résonantiel et de ne pas perdre en intensité vocale lors du changement de mécanisme laryngé, il est possible que les sujets femmes adaptent leur geste vocal en modifiant notamment la position de leurs résonateurs. Cette hypothèse pourrait être l'explication des sensations d'une difficulté plus importante chez les femmes.

Les résultats obtenus grâce aux réponses au VHI chanteurs adapté sont concluants à l'échelle de notre étude. Ils ne sont toutefois pas suffisamment étayés pour généraliser une conclusion. En effet, nous avons discuté auparavant les limites du protocole, celui-ci n'étant pas assez sensible pour la tâche demandée, les résultats ne sont pas totalement fiables. La plupart des participants n'exécutaient pas correctement la tâche et ne sortaient pas de leur zone de confort. Cela a pu biaiser les réponses des sujets au questionnaire auquel ils ont été soumis.

3. Perspectives

Le contexte sanitaire actuel ne nous a pas permis d'utiliser la station EVA2 afin de mesurer les paramètres aérodynamiques. Une étude complémentaire serait intéressante pour corrélérer les changements de mécanisme laryngé aux variations de pression sous-glottique et d'intensité ainsi qu'à la fréquence de la voix chantée à l'instant de ces changements de mécanisme.

De plus, une étude de l'effet de la voyelle utilisée (/a/ et /i/ dans notre cas) sur le déroulement du changement de mécanisme pourrait également être très intéressante. Elle pourrait permettre d'observer si la temporalité du changement de mécanisme est modifiée selon la voyelle vocalisée, avec peut-être une forme de contrainte à un changement précoce ou tardif.

La perspective d'utiliser un dispositif tel que la montre Empatica E4 ouvrirait la voie à un contrôle instantané des paramètres physiologiques (EDA, respiration, rythme cardiaque) au cours de séances de rééducation orthophonique ou de cours de chant.

Ce système de contrôle instantané existe déjà avec le logiciel VOCALAB par exemple qui permet une analyse spectrale de la voix en temps réel. Ce logiciel est aujourd'hui apprécié et utilisé par un grand nombre de praticiens en lien avec la voix.

Il serait pertinent, à terme, de proposer une alternative relevant des données physiologiques. Il paraît alors nécessaire de sensibiliser les expérimentateurs à l'installation du matériel afin d'éviter une nouvelle fois une perte des données. Les résultats obtenus pourraient être corrélés aux résultats du BIOPAC et ainsi constater la fiabilité de ce matériel.

Il aurait été intéressant de bénéficier de plus de temps avec les sujets. En effet, l'installation des appareils aurait pu être suivie d'un temps d'échange spontané pour recueillir les données physiologiques au repos de chaque participant. Le protocole serait alors plus long mais le recueil des données serait facilité et plus pertinent.

Un questionnaire de l'état d'anxiété tel que le CSAI-2R ou le State-Trait Anxiety Inventory de Spielberger aurait pu être proposé aux participants à l'issue des exercices vocaux. En plus de l'analyse perceptive de la qualité de sa voix, l'état d'anxiété du patient serait quantifié et permettrait une corrélation avec l'analyse des données physiologiques.

Nous avons précédemment fait remarquer nos difficultés lors du séquençage des changements de mécanisme laryngé dans les enregistrements audios. Nous pourrions interpréter ces observations comme une action des muscles laryngés qui, au passage de M1 vers M2, réduisent l'aire glottique par le rapprochement médial des plis vocaux, et donc par une diminution de l'amplitude vibratoire de ces derniers. Cela entraînerait un signal électroglottographique plus faible mais encore caractérisé par des phases d'accolement des plis vocaux qui continueraient à vibrer selon le schéma M1, généralement du côté postérieur.

Cela pourrait également s'apparenter à un effet du damping, un mécanisme supposé par lequel, en resserrant les apophyses vocales, il y aurait un raccourcissement de la longueur des cordes vibrantes. Il s'agit d'un phénomène généralement visible en registre ténor.

Cette observation pourrait faire l'objet d'une étude plus poussée sur les différences interindividuelles dans l'adaptation glottique lors d'une montée fréquentielle.

Enfin, il serait intéressant de conserver un protocole similaire mais de procéder à une analyse des données inverses, c'est-à-dire en partant des paramètres physiologiques saillants pour ensuite constater les éventuels événements révélés sur la courbe de l'EKG à ces instants précis.

7. Conclusion de l'étude

Au cours de cette étude, nous avons donc cherché à voir si la production d'un changement de mécanisme laryngé, entre M1 et M2, en voix chantée, pouvait générer une forme de stress physiologique chez des hommes et des femmes, chanteurs ou non-chanteurs.

Nous envisageons que cette réponse physiologique pourrait être plus importante chez des sujets non-chanteurs car peu familiers avec ce type d'exercice.

Enfin, nous supposons que ce changement de mécanisme aurait également des répercussions perceptives importantes, à savoir qu'il procurerait davantage de gêne vocale chez les sujets non-chanteurs mais également qu'il serait plus perceptible chez ces derniers ainsi que chez les sujets hommes.

Pour conclure cette étude, nous pouvons tout d'abord dire que nous n'avons pas obtenu de résultats concluants pour les données physiologiques. Nous mettons principalement en cause notre protocole expérimental, trop peu accessible pour bon nombre des participants.

Il est cependant à noter que les résultats du questionnaire adapté du VHI chanteurs ont fait ressortir des informations intéressantes, allant dans le sens de l'une de nos hypothèses, à savoir que les sujets non-chanteurs auraient davantage verbalisé la gêne vocale ressentie au cours de l'exercice.

De plus, le jury d'écoute que nous avons mis en place a révélé des données à prendre en compte. Les jurys auraient eu plus de difficulté à percevoir les changements de mécanisme chez les sujets chanteurs, cependant, aucune distinction de genre n'est à noter.

Quant aux cotations GRBA, nous pouvons observer globalement une distinction de genre, à savoir que les hommes auraient été davantage cotés que les femmes, et qu'on pourrait relever plus largement un effet de l'apprentissage vocal chez les hommes. Ces résultats vont également dans le sens de deux de nos hypothèses, à savoir que les hommes seraient plus en difficulté lors d'un changement de mécanisme, car plus loin de leurs fréquences usuelles ; et que les sujets non-chanteurs révéleraient moins de stabilité et de maîtrise dans leurs changements de mécanisme laryngé.

Néanmoins, ces résultats sont tout de même à considérer avec précaution en raison du manque de sensibilité du protocole.

Cependant, l'utilisation d'un questionnaire ainsi que d'un jury d'écoute tels que nous les avons mis en place restent des éléments intéressants à retenir pour des expérimentations futures.

Cette étude est une des premières à lier les changements de mécanisme laryngé aux réponses physiologiques qu'ils pourraient générer.

Elle laisse derrière elle de nombreuses perspectives avec un grand nombre d'indications sur ce qui peut être mis en place afin d'établir un recrutement plus strict et un protocole plus sensible, tout en donnant des conseils afin de rester vigilant à la bonne installation des instruments pour une captation efficace.

L'analyse de données physiologiques étant en pleine expansion, nous devrions voir apparaître bons nombres d'études de cette nature dans les années à venir. En espérant qu'elles puissent perfectionner notre pratique orthophonique déjà très riche.

8. Références bibliographiques

Amy de la Bretèque, B. (2011). L'équilibre et le rayonnement de la voix. Solal.

Brin, F. (2011). *Dictionnaire d'orthophonie*. Ortho Edition.

Brown, W., Hunt, E., & Williams, W. (1988). Physiological differences between the trained and untrained speaking and singing voice. *Journal Of Voice*, 2(2), 102-110.

Ciochină, P., Ciochină, A., Burlui, A., & Zaharia, D. (2007). *Biofeedback in young singer vocal training*. PubMed.

de Freitas Lopes Genilhú, P., & Côrtes Gama, A. (2018). *Acoustic and aerodynamic measures in singers: a comparison between genders..* Search.bvsalud.org.

Dictionnaire de l'Académie de Médecine. (2021).

Echternach, M., Burk, F., Köberlein, M., Selamtzis, A., Döllinger, M., & Burdumy, M. et al. (2017). Laryngeal evidence for the first and second passaggio in professionally trained sopranos. *PLOS ONE*, 12(5), e0175865.

Fancourt, D., Aufegger, L., & Williamon, A. (2015). Low-stress and high-stress singing have contrasting effects on glucocorticoid response. *Frontiers In Psychology*, 6.

Ghio, A., n.d. *Electroglottographie (EGG)*. [online] Www2.lpl-aix.fr.

Ghio, A., & Pinto, S. (2017). *Résonance sonore et cavités supra laryngées*. Lpl-aix.fr.

Giovanni, A., Lagier, A., & Henrich, N. (2014). *Physiologie de la phonation*. Hdl.handle.net.

Hamdi, H. (2012). Plate-forme multimodale pour la reconnaissance d'émotions via l'analyse de signaux physiologiques : Application à la simulation d'entretiens d'embauche.

Henrich, N. (2001). *La notion de mécanisme laryngé*. Voiceresearch.free.fr.

Henrich, N. (2012). Physiologie de la voix chantée : vibrations laryngées et adaptations phonorésonnantes. Afpc-evta-france.com.

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*, 117(3), 1417-1430.

Henrich, N., Smith, J., & Wolfe, J. (2011). Vocal tract resonances in singing: Strategies used by sopranos, altos, tenors, and baritones. *The Journal Of The Acoustical Society Of America*, 129(2), 1024-1035.

- Herbst, C. (2017). A Review of Singing Voice Subsystem Interactions—Toward an Extended Physiological Model of “Support”. *Journal Of Voice*, 31(2), 249.e13-249.e19.
- Homma, I., & Masaoka, Y. (2008). Breathing rhythms and emotions. *Experimental Physiology*, 93(9), 1011-1021. doi: 10.1113/expphysiol.2008.042424
- Howard, D. (2009). Acoustics of the trained versus untrained singing voice. *Current Opinion In Otolaryngology & Head And Neck Surgery*, 17(3), 155-159.
- Kang, J., Scholp, A., & Jiang, J. (2018). A Review of the Physiological Effects and Mechanisms of Singing. *Journal Of Voice*, 32(4), 390-395.
- Laaridh, I., 2017. Évaluation de la parole dysarthrique : Apport du traitement automatique de la parole face à l’expertise humaine. [online] Tel.archives-ouvertes.fr.
- Larrouy-Maestri, P. (2015). Influence du stress sur la voix parlée et chantée. Hdl.handle.net.
- Le Huche, F., & Allali, A. (1984). *La voix*. Masson.
- McFarland, D. (2016). *L'anatomie en orthophonie*. Elsevier Masson.
- Morsomme, D., Gaspar, M., Jamart, J., Remacle, M., & Verduyck, I. (2007). *Adaptation du Voice Handicap Index à la voix chantée*. Rev Laryngol Otol Rhinol. 128,5:305-314.
- Neumann, K., Schunda, P., Hoth, S., & Euler, H. (2005). The Interplay between Glottis and Vocal Tract during the Male Passaggio. *Folia Phoniatrica Et Logopaedica*, 57(5-6), 308-327.
- Patel, S., Lodhavia, A., Frankford, S., Korzyukov, O., & Larson, C. (2016). Vocal and Neural Responses to Unexpected Changes in Voice Pitch Auditory Feedback During Register Transitions. *Journal Of Voice*, 30(6), 772.e33-772.e40.
- Paul, N., Kumar, S., Chatterjee, I., & Mukherjee, B. (2011). Electroglottographic Parameterization of the Effects of Gender, Vowel and Phonatory Registers on Vocal Fold Vibratory Patterns: An Indian Perspective. *Indian Journal Of Otolaryngology And Head & Neck Surgery*, 63(1), 27-31.
- Pettersen, V., & Bjørkøy, K. (2009). Consequences From Emotional Stimulus on Breathing for Singing. *Journal Of Voice*, 23(3), 295-303.
- Rainville, P., Bechara, A., Naqvi, N., & Damasio, A. (2006). Basic emotions are associated with distinct patterns of cardiorespiratory activity. *International Journal Of Psychophysiology*, 61(1), 5-18.
- Sundberg, J., Titze, I., & Scherer, R. (1993). Phonatory control in male singing: A study of the effects of subglottal pressure, fundamental frequency, and mode of phonation on the voice source. *Journal Of Voice*, 7(1), 15-29.

Titze, I. (1988). A framework for the study of vocal registers. *Journal Of Voice*, 2(3), 183-194.

Vos, R., Daffern, H., & Howard, D. (2017). Resonance Tuning in Three Girl Choristers. *Journal Of Voice*, 31(1), 122.e1-122.e7.

Więch, P., Sałacińska, I., Walat, K., Kózka, M., & Bazaliński, D. (2020). Can Singing in a Choir Be a Key Strategy for Lifelong Health? A Cross-sectional Study. *Journal Of Voice*.

9. Annexes :

Annexe 1 : Formulaire de consentement



Formulaire d'autorisation pour l'utilisation d'enregistrements

Je soussigné(e),

- Autorise l'équipe de recherche du LPL à m'enregistrer en photo/audio/vidéo et données physiologiques

- autorise l'utilisation de ces données, sous leur forme enregistrée aussi bien que sous leur forme transcrite et anonymisée.

à des fins de recherche scientifique (mémoires, thèses, articles scientifiques, exposés à des congrès, séminaires)

à des fins d'enseignement universitaire

pour une diffusion dans la communauté des chercheurs sous la forme d'éventuels échanges et prêts de corpus à des chercheurs, moyennant la signature d'une convention de recherche ou d'une licence non-commerciale

pour une diffusion sur le site <https://www.ortolang.fr/> dédié à la recherche

J'accepte le traitement informatisé des données nominatives qui me concernent en conformité avec les dispositions de la loi n°2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes et modifiant la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

J'ai compris que je pouvais refuser de participer à cette étude sans conséquence pour moi, et que je pourrai retirer mon consentement à tout moment (avant et en cours d'étude) sans avoir à me justifier et sans conséquence.

Compte tenu des informations qui m'ont été transmises, j'accepte librement et volontairement de participer à l'expérience qui m'est proposée.

Lieu et date : à Aix en Provence, le

Signature

Annexe 2 : Fiche présentée aux participants pour illustrer les exercices vocaux à effectuer

The diagram is enclosed in a rectangular border and is split vertically into two halves. The left half features a waveform that starts at a low level, rises to a high peak, and then falls back to a low level. Below this waveform are two square boxes: the left one contains the letter 'A' and the right one contains the letter 'i'. The right half features a waveform that starts at a high level, falls to a low trough, and then rises back to a high level. Below this waveform are two square boxes: the left one contains the letter 'A' and the right one contains the letter 'i'.

Annexe 3 : Questionnaire adapté du Voice Handicap Index - chanteurs, présenté aux participants après leur passation

Questionnaire adapté à partir du VHI chanteurs

Traduction validée en français, Adaptation du Voice Handicap Index à la voix chantée
Morsomme, D., Gaspar, M., Jamart, J., Remacle, M., & Verduyck, I. (2007). *Rev Laryngol Otol Rhinol.*
128,5:305-314.

N°	Items	J	PJ	P	PT	T
F1	Chanter me demande beaucoup d'effort					
P2	Ma voix craque et se casse					
F3	Je me sens frustré par mon chant					
F6	Ma voix m'abandonne pendant que je chante					
E7	Ma voix chantée me contrarie					
E9	Je suis embarrassé par mon chant					
P10	Je suis incapable de monter dans les aigus					
P13	Ma gorge est sèche pendant que je chante					
P21	J'ai du mal à chanter fort					
F22	J'ai du mal à suivre les notes avec ma voix					
E24	Mon chant "sonne" forcé					
E25	Ma voix parlée est rauque après avoir chanté					
P26	La qualité de ma voix est inconstante					
E29	Ma voix chantée se fatigue facilement (au cours de l'exercice)					
E30	Je ressens des douleurs, un serrage ou des à-coups lorsque je chante					
E31	Je ne suis pas sûr de ce qui va "sortir" quand je chante					

FICHE EVALUATEUR

⇒ Évaluation à remplir sur le fichier excel ci-joint. Chacun des sujets a son propre feuillet sur le document.

⇒ Merci d'écouter uniquement les passages indiqués ci-dessous afin de ne pas fausser votre analyse.

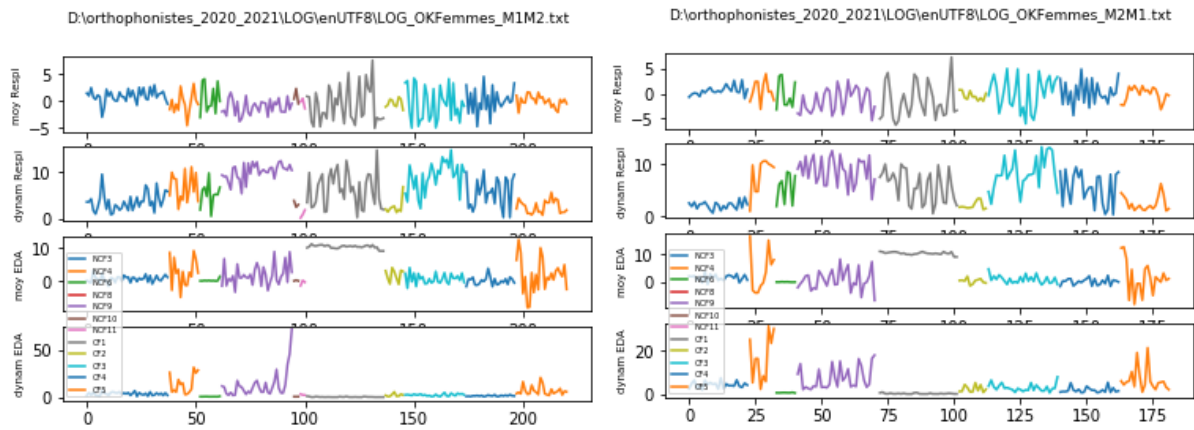
- Indiquez dans la colonne “Changement de mécanisme” :
 - **Oui** : si vous percevez un changement de mécanisme laryngé
 - **Non** : si vous n'en percevez pas.
- **Si votre réponse précédente est “Oui”**, merci d'évaluer les items dans les colonnes G, R, B, et A, de la façon suivante :

Chaque item doit être coté de 0 à 3 :

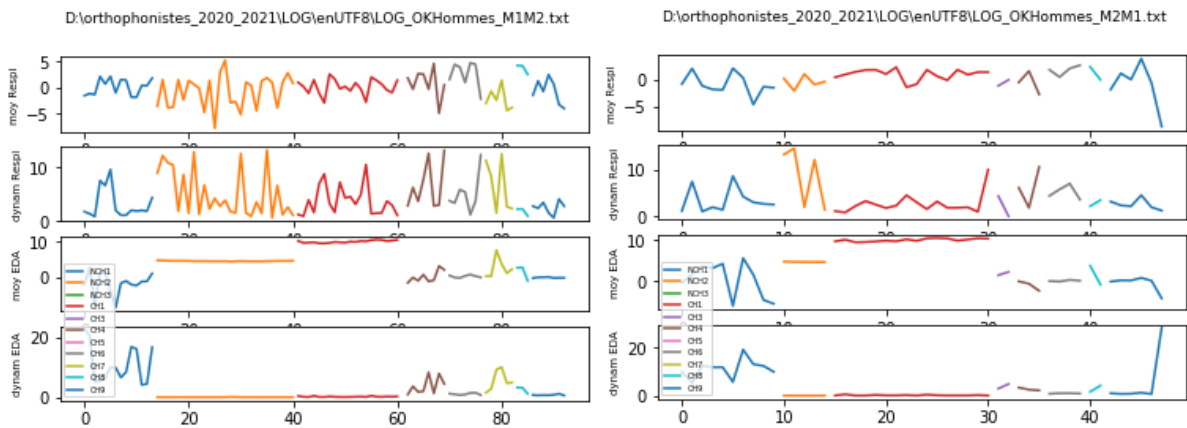
- **G** : Passage fluide (0), brusque ou laborieux (1 à 3)
- Altération du timbre sur la zone de passage :
 - Érailement **R** (1 à 3), ou non présent (0)
 - Souffle glottique **B** (1 à 3), ou non présent (0)
- Perte d'intensité **A** : non présente (0), affaiblissement (1 à 2), désonorisation (3).

N° du sujet	Passages à écouter et à coter
1	a. 3min 17s à 3min 20s b. 5min 36s à 5min 40s c. 5min 57s à 5min 58s d. 6min 03 à 6min 06
2	a. 5min 27s à 5min 30s b. 6min 27s à 6min 30s c. 6min 49s à 6min 53s d. 7min 29s à 7min 34s e. 7min 39s à 7min 43s f. 8min 23s à 8min 26s
3	a. 5min 21s à 5min 26s b. 5min 46s à 5min 51s c. 6min 43s à 6min 48s d. 7min 28s à 7min 35s e. 8min 21s à 8min 25s f. 8min 48s à 8min 53s

Annexe 5 : Résultats physiologiques - fenêtre 1s avant, 1s après

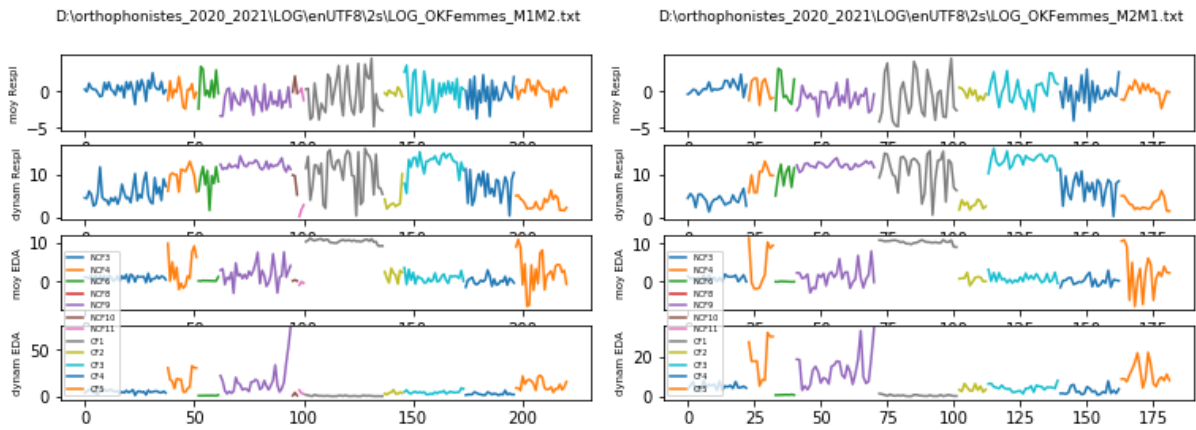


Résultats physiologiques des sujets femmes : à gauche lors des changements M1 vers M2 et à droite lors des changements M2 vers M1

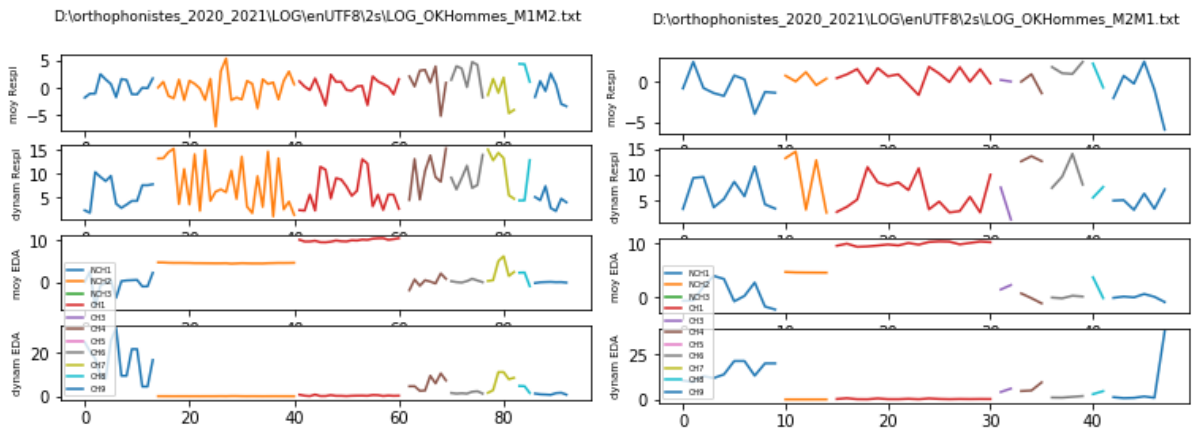


Résultats physiologiques des sujets hommes : à gauche lors des changements M1 vers M2 et à droite lors des changements M2 vers M1

ANNEXE 6 : RESULTATS PHYSIOLOGIQUES - FENETRE 2s AVANT, 2s APRES

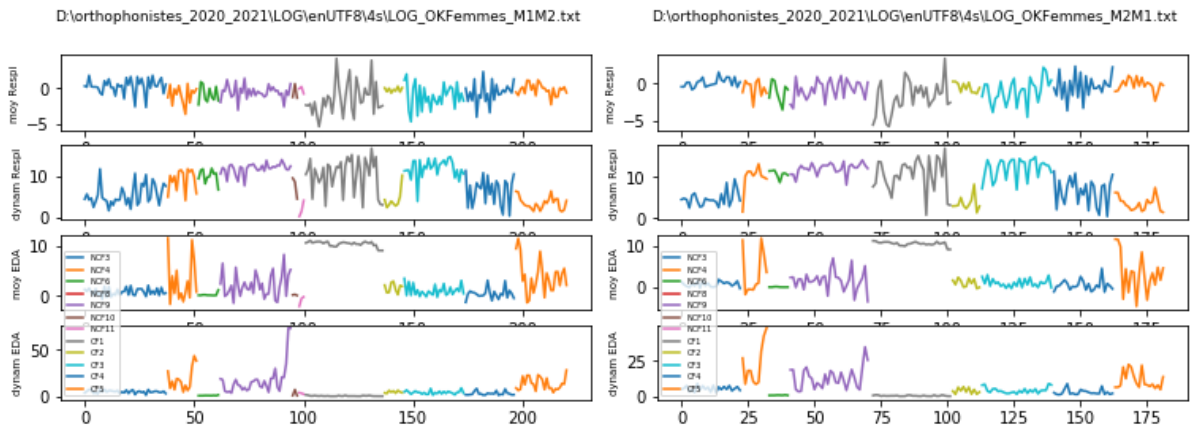


Résultats physiologiques des sujets femmes : à gauche lors des changements M1 vers M2 et à droite lors des changements M2 vers M1

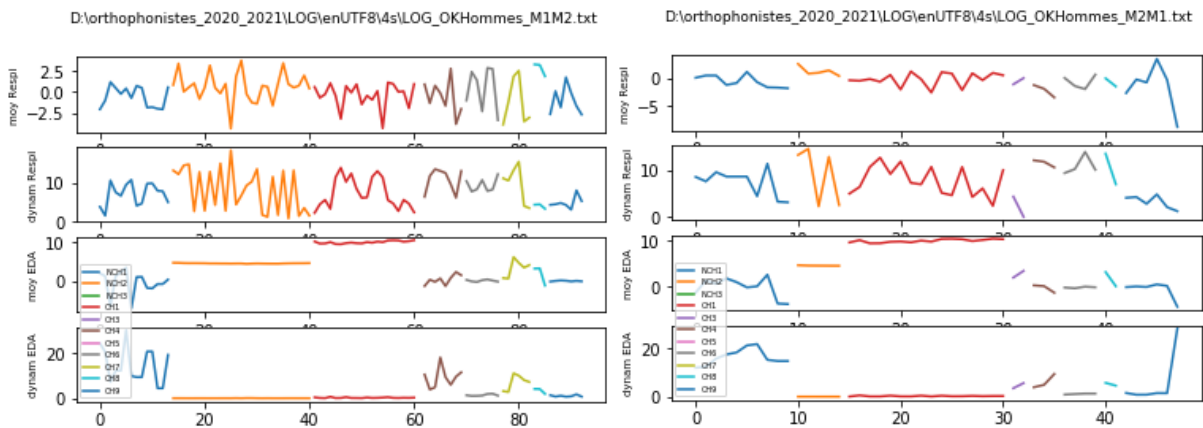


Résultats physiologiques des sujets hommes : à gauche lors des changements M1 vers M2 et à droite lors des changements M2 vers M1

Annexe 7 : Résultats physiologiques - fenêtre 1s avant, 3s après



Résultats physiologiques des sujets femmes : à gauche lors des changements M1 vers M2 et à droite lors des changements M2 vers M1



Résultats physiologiques des sujets hommes : à gauche lors des changements M1 vers M2 et à droite lors des changements M2 vers M1

10. Résumé

Le chant est une pratique vocale mettant en jeu de multiples dimensions du corps humain, ce dernier se modulant véritablement à l'effort phonatoire instigué par le sujet chantant. Le changement de mécanisme laryngé en est le parfait témoignage, nécessitant une grande adaptation des cordes vocales. Bien que cet instant, parfois redouté par les chanteurs, soit encore discuté dans son déroulé exact, nous lui connaissons des modifications anatomiques indéniables. Cependant, les effets physiologiques que cet événement peut avoir sur le métabolisme et le corps humain sont, jusqu'alors, inconnus.

Effectivement, si les répercussions physiologiques que la pratique du chant a sur notre biologie interne ont déjà été étudiées, l'instant précis du changement de mécanisme laryngé, lui, n'a pas fait l'objet de recherches spécifiques.

L'idée d'une étude analysant le potentiel stress physiologique généré par un changement de mécanisme laryngé, entre M1 et M2, en voix chantée a alors émergé.

Cette étude exploratoire a pour but de répondre à cette absence dans la littérature scientifique, en se basant sur un protocole expérimental faisant intervenir des sujets chanteurs et non-chanteurs, hommes comme femmes.

Nous avons enregistré des sirènes vocales sur différentes hauteurs afin de générer un changement de mécanisme laryngé et nous avons également mesuré un ensemble de paramètres physiologiques parallèlement à ces vocalisations. Nous avons ensuite procédé à une analyse physiologique, ainsi qu'à des analyses perceptives.

Notre étude a mis en avant des résultats intéressants concernant les analyses perceptives de ces instants de changement de mécanisme, à nuancer cependant en raison de la partie physiologique qui n'a malheureusement pas abouti, faute à un protocole expérimental certainement peu sensible.

Néanmoins, cette étude permet d'ouvrir la voie à d'autres recherches physiologiques donnant peut-être, à terme, de nouvelles dimensions du soin orthophonique dans l'accompagnement vocal.

Mots clés : orthophonie ; mécanisme laryngé ; changement mécanisme laryngé ; voix chantée ; paramètres physiologiques ; réponse émotionnelle ; électroglottographe ; EGG, biofeedback ; réponse électrodermale ; EDA ; fréquence respiratoire

Abstract

Singing is a vocal practice involving many aspects of the human body, which is modulated by the phonatory effort directed by the singing subject. The change in laryngeal mechanism is a good example because it requires a great adaptation of the vocal cords. Even if this moment, sometimes feared by singers, is still discussed in its exact course, we know that it generates undeniable anatomical modifications. However, the physiological repercussions that this phenomenon can have on the metabolism and on the human body are unknown at this time.

Indeed, while the physiological repercussions that the practice of singing has on our internal biology have already been studied, the precise moment of the change in the laryngeal mechanism has not been the subject of specific research.

Therefore, we had the idea of a study which would analyze the physiological stress potentially generated during a change of laryngeal mechanism, between M1 and M2, in singing voice.

This exploratory study aims to respond to this absence in the scientific literature, based on an experimental protocol involving singing and non-singing subjects, both men and women.

We recorded vocalizations at different frequencies in order to generate a change in the laryngeal mechanism. We also measured a set of physiological parameters during these vocalizations. We then performed a physiological analysis and perceptual analyzes.

Our study gave interesting results for the perceptual analyzes of these instants of mechanism change. However, they should be qualified because the physiological part was not successful, due to an experimental protocol that is probably not sufficiently sensitive.

Nonetheless, this study provides perspectives for further physiological research which may provide new dimensions of speech therapy in vocal accompaniment.

Key words : speech therapist, laryngeal mechanisms, register transitions, singing voice, physiological effects, electroglottograph, EGG, biofeedback, electrodermal activity, EDA, breathing frequency.