Stage de master ATIAM (MIS)

Projet de Fin d'Etudes d'ingénieur
ENSTA

Domaine :
Acoustique musicale appliquée à la voix chantée

Caractérisation de la voix mixte en termes de mécanismes laryngés

Mars-juillet 2006

Etudiant : **Sylvain Lamesch**

Encadrement : Michèle Castellengo (LAM)
Nathalie Henrich (ICP)

Tuteur ENSTA: Antoine Chaigne

Laboratoire d'acoustique Musicale 11, rue de Lourmel 75015 PARIS	Institut de la Communication Parlée 46, avenue Félix Viallet 38031 Grenoble Cedex 1

Table des matières

Remerciements **5**

Introduction **7**

1 La voix et la voix mixte **9**
1.1 Description physiologique 9
1.2 Les mécanismes laryngés 12
1.2.1 De quoi s'agit-il? 12
1.2.2 Configuration vibratoire des cordes vocales en mécanismes M1 et M2 . . 13
1.2.3 Relations entre registres et mécanismes laryngés 15
1.3 La voix mixte 15
1.3.1 Définition des chanteurs 15
1.3.2 Position du problème 16

2 Méthodes exploratoires, paramètres caractéristiques utilisés **17**
2.1 L'électroglottographie 17
2.1.1 Description de l'appareil et de son fonctionnement 17
2.1.2 Caractéristiques du signal obtenu 17
2.1.3 Le signal électroglottographique et sa dérivée 18
2.2 Méthode acoustique et visualisation 21
2.2.1 L'enregistrement acoustique 21
2.2.2 La cinématographie ultra-rapide 21
2.3 Paramètres glottiques et acoustiques 22
2.3.1 La fréquence fondamentale 22
2.3.2 L'intensité du signal acoustique 23
2.3.3 Le quotient ouvert 24
2.4 Etude des dédoublements de pics du signal électroglottographique dérivé 27
2.4.1 Position du problème 27
2.4.2 Algorithme de détection 28
2.4.3 Limites de l'algorithme 29
2.5 Mécanismes laryngés, quotient ouvert, caractérisation électroglottographique . . 30
2.5.1 Changement de mécanisme laryngé lors d'un glissando 30
2.5.2 Mécanismes et quotient ouvert 31

3 Protocole expérimental **33**
3.1 Choix des sujets . . . 33
3.2 Dispositif expérimental . . . 34
3.3 Constitution de la base de donnée exploitée . . . 34
3.3.1 Enregistrement de la soprano (S) . . . 35
3.3.2 Enregistrements de CT . . . 36
3.3.3 Séance d'écoute . . . 37

4 Résultats et discussion **38**
4.1 Caractéristiques des mécanismes laryngés M1 et M2 chez les deux sujets . . . 38
4.1.1 Etude des productions de CT . . . 39
4.1.2 Etudes des productions de S . . . 40
4.2 Un mixte, des mixtes... Etude du quotient ouvert et de l'intensité. . . . 42
4.3 Nuances d'intensité et voix mixtes . . . 43
4.4 Caractérisation du mixte 1 par rapport au mécanisme M1 . . . 45
4.4.1 Résultats établis . . . 45
4.4.2 Etudes de decrescendos de mécanismes M1 . . . 45
4.4.3 Le mixte 1 en contexte musical . . . 47
4.5 Caractérisation du mixte 2 par rapport au mécanisme M2 . . . 48
4.5.1 Résultats établis . . . 48
4.5.2 Etude de crescendos et decrescendos . . . 49
4.5.3 Etude des dédoublements de pics . . . 51
4.5.4 Etude en contexte musical . . . 52
4.5.5 Description des mouvements laryngés en mixte 2 . . . 53
4.5.6 Le mixte 2: un autre mécanisme laryngé? . . . 53

Conclusion **57**

Annexes **59**

A Cas litigieux de passage de mécanisme. **59**

B Etude de la dépendance de l'enveloppe du signal électroglottographique avec l'intensité en mécanisme M2 et voix mixte. **63**

C Un signal électroglottographique très atypique **66**

Table des figures **68**

Bibliographie **71**

Remerciements

C'est, je crois, une grande chance qui m'a été offerte que de pouvoir effectuer ce stage au confluent des deux domaines à priori séparés que sont la musique et la science. Je souhaite donc en tout premier lieu remercier chaleureusement mes deux encadrantes qui m'ont permis d'avoir cette joie.

Merci, donc, à Michèle Castellengo, qui a su me transmettre un petit bout de son extraordinaire expérience dans le domaine de l'acoustique musicale, ainsi que sa passion toujours aussi vive pour la compréhension des phénomènes acoustiques en relation avec la musique, sa curiosité communicative, sa bonne humeur.

Je remercie également chaleureusement Nathalie Henrich qui aura su me faire part de son optimisme, son dynamisme, et sa rigueur inébranlable face à tout problème surgissant. Je souhaite également la remercier pour les nombreux conseils prodigués quant à l'utilisation du logiciel Matlab!

J'adresse également des très sincères et chaleureux remerciements à Robert Expert. Contreténor professionnel, gérant aujourd'hui une carrière d'envergure internationale, il s'est montré disponible au delà de toute attente pour venir au laboratoire à plusieurs reprises effectuer des enregistrements et des séances d'écoutes, malgré son emploi du temps d'artiste surchargé. Une très grande partie des aspects musicaux de ce mémoire lui sont dues, qu'il soit donc tout particulièrement remercié pour son engagement et sa participation à ce travail de recherche. Merci également à Salomé Haller, soprano, qui a aimablement accepté de se prêter à la séance d'enregistrement et nous a fait bénéficier de sa technique vocale.

Je me permet également d'adresser une petite pensée à l'ensemble du personnel du LAM et de l'ICP, ce fut un bonheur de travailler avec les uns comme les autres.

Le mot de la fin sera adressé à Antoine Chaigne, qui m'a donné la chance de m'orienter dans le domaine de l'acoustique musicale depuis l'ENSTA.

Introduction

La voix chantée est un "instrument de musique" qui, de tous temps, a été considéré comme étant à part. Historiquement, il a d'abord été l'instrument "parfait", avec lequel tout était possible de faire. Aujourd'hui encore, le vocabulaire employé par les chefs d'orchestre révèle que la voix, même si elle est considérée comme un instrument de musique, reste à part: il n'est en effet pas rare de les surprendre parler "des musiciens et des choristes" (les choristes ne seraient donc pas des musiciens?). La singularité de la voix chantée vient probablement du fait que l'instrument n'est pas construit par l'homme, mais que, au contraire, nous disposons tous de cet instrument, et qu'il ne tient qu'à chacun de nous d'apprendre ou non à s'en servir dans une optique musicale. Aujourd'hui, dans le domaine scientifique également, la voix reste "à part", vraisemblablement pour des raisons similaires, et peut être aussi parce que l'étude de la voix nécéssite des moyens bien différents que celle de n'importe quel instrument de musique.

L'étude de la voix se révèle pourtant passionnante, d'abord parce qu'elle se situe au carrefour de bon nombre de domaines: ainsi la linguistique, la phoniatrie, l'acoustique, la mécanique, le traitement du signal, l'art sont-ils autant de domaines qui touchent de près ou de loin au fameux organe.

Dans le cadre de ce stage, nous aborderons l'étude de la voix d'un point de vue scientifique, avec tout de même un petit aspect musical, puisque nous nous proposons de chercher à caractériser la voix mixte, registre musical qu'apprennent à maîtriser certains chanteurs lyriques. Le but de cette étude est donc de contribuer à la compréhension du fonctionnement de l'appareil vocal utilisé à vocation artistique.

Après une mise au point physiologique, nous définirons clairement l'ensemble des termes sujet d'étude, notamment ceux de mécanisme laryngé et de voix mixte. Nous décrirons ensuite quels paramètres nous avons choisis d'étudier et par quelles méthodes de mesures nous y avons eu accès. Puis le protocole expérimental mis en oeuve sera détaillé. Nous proposerons enfin une étude des résultats portant sur la voix mixte.

Chapitre 1

La voix et la voix mixte

1.1 Description physiologique

Même s'ils sont longtemps restés inexpliqués, les mécanismes de génération du son chez l'homme sont aujourd'hui bien connus. Nous savons que toute phonation nécessite un flux d'air (une inspiration ou une expiration, même si c'est l'expiration que nous utilisons couramment), associé à un mouvement des cordes vocales, qui est périodique dans le cas des sons voisés.

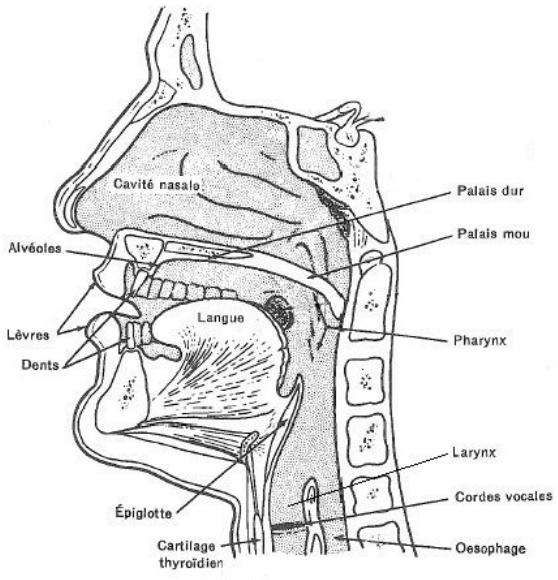

FIG. 1.1 – *Schématisation du conduit vocal et du larynx. D'après Denes et Pinson [8].*

L'appareil vocal est habituellement décrit par un modèle source-filtre. La source est alors constituée du larynx, alimenté en air par les poumons par l'intermédiaire de la trachée-artère. Le larynx est constitué entre autres des cordes vocales, dont la vibration est à l'origine du son perçu. Le filtre correspond à un ensemble de résonateurs, nous en distinguant habituellement

trois: la bouche, les cavités nasales (ou les fosses nasales), et le pharynx, qui correspond à toute la zone située depuis le haut du larynx et jusqu'à la partie postérieure de la bouche. Le terme de conduit vocal désigne l'ensemble des organes et cavités par lesquelles l'air est susceptible de passer depuis le plan glottique et jusqu'au milieu extérieur. Il est représenté figure 1.1.

Le larynx

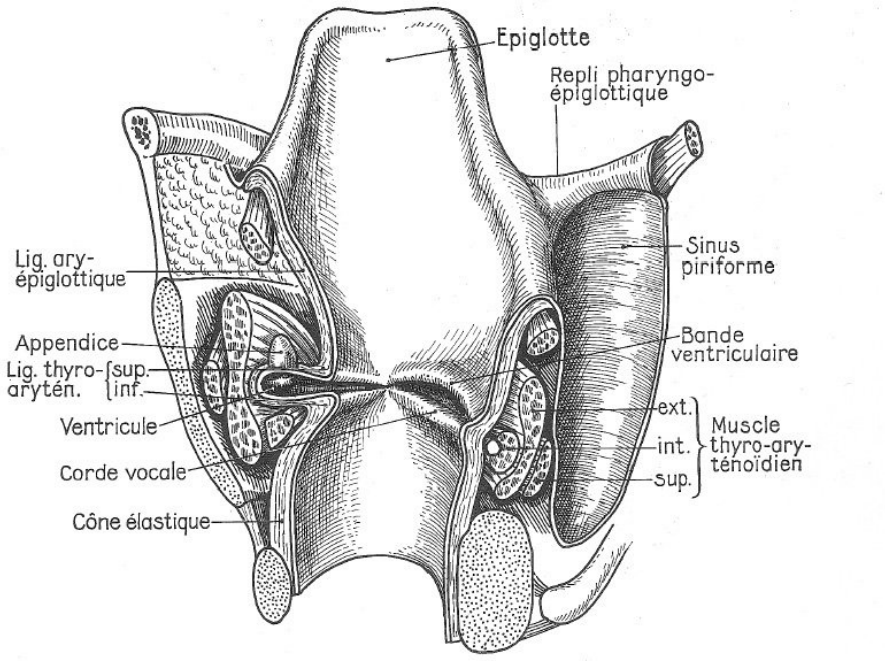

FIG. 1.2 – *Coupe transversale d'un larynx. D'après Legent et al. [16].*

Une coupe transversale du larynx est schématisée figure 1.2. Un muscle important de production des sons voisés est le muscle thyro-aryténoïdien, appelé également muscle vocal ou vocalis. Une corde vocale est constituée essentiellement de ce muscle, recouvert de fibres et de muqueuse. Sa contraction entraîne une augmentation de l'épaisseur des cordes vocales, qui sont situées entre les cartilages aryténoïdiens et le cartilage tyroïdien comme le montre la figure 1.3 (représentation (c)).

Lors d'une inspiration ou expiration non voisée, les aryténoïdes s'écartent pour laisser passer le flux d'air (comme représenté sur la figure 1.4). Lors d'une émission voisée, les cordes vocales sont accolées. Le sujet augmente la pression sous glottique, qui, lorsqu'elle dépasse un certain seuil, pousse les cordes vocales à se séparer. La pression sous-glottique baisse alors brutalement, et les cordes vocales se rejoignent. Puis le cycle recommence. Le nombre de cycles par seconde permet de définir la fréquence de vibration des cordes vocales, qui correspond à la fréquence fondamentale du signal sonore.

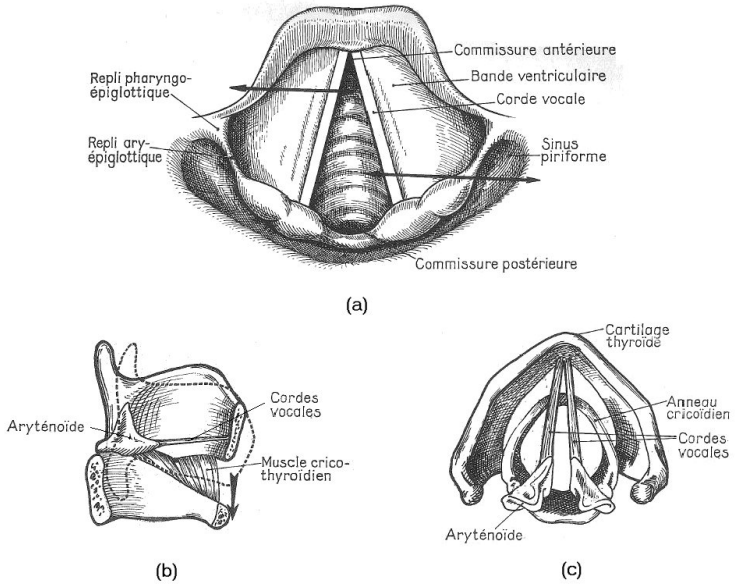

FIG. 1.3 – *(a): Schéma d'une laryngoscopique du larynx. (b) et (c): Schématisation des muscles intrinsèques du larynx et de leur actions. D'après Legent et al. [16].*

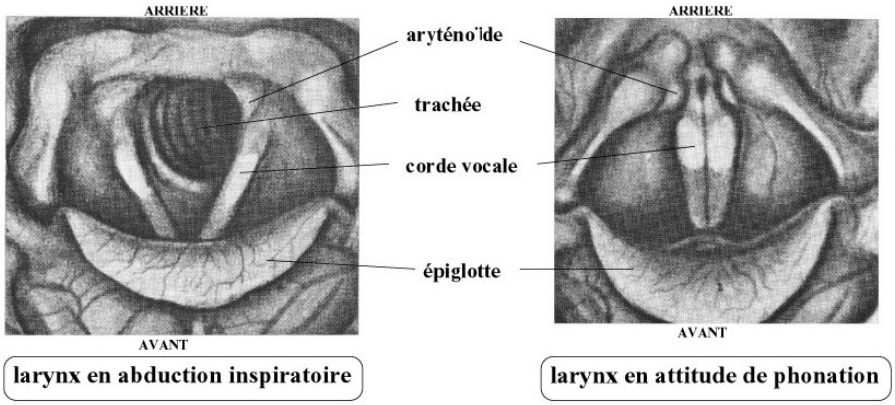

FIG. 1.4 – *Images laryngoscopiques d'un larynx en position de respiration et phonatoire. D'après Henrich [11].*

Un second muscle participe notablement à l'émission vocale, il s'agit du muscle crico-tyroïdien (figure 1.3, partie (b)). L'équilibre des activités de ces deux muscles permet de définir la longueur, l'épaisseur et la tension des cordes vocales, donc notamment la hauteur de la note chantée.

1.2 Les mécanismes laryngés

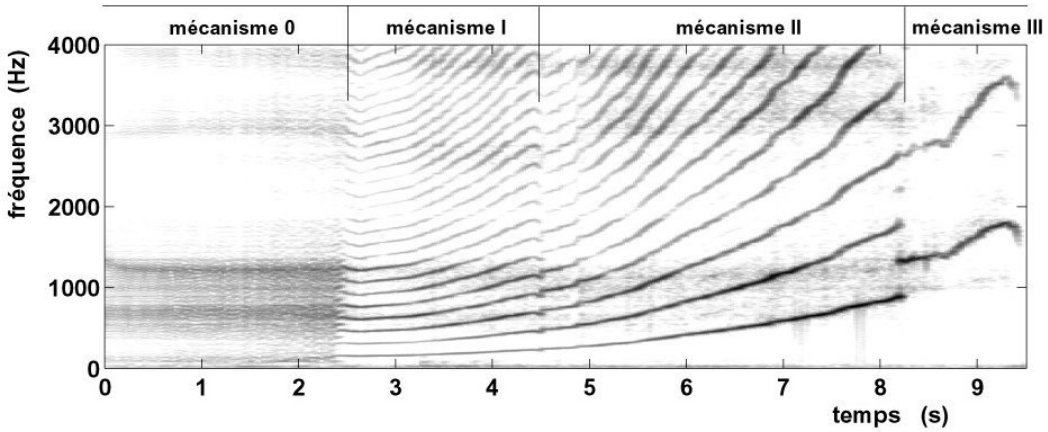

FIG. 1.5 – *Glissando ascendant chanté par une soprano, utilisant les quatre mécanismes laryngés. D'après Henrich [11].*

1.2.1 De quoi s'agit-il?

La figure 1.5 correspond au sonagramme d'un glissando ascendant effectué par une soprano sur la totalité de sa tessiture. Nous pouvons clairement y distinguer 4 zones séparées par des transitions visibles sur le sonagramme, et correspondant, à l'audition, à des discontinuités dans l'émission. Ces quatre zones correspondent à quatre configurations vibratoires des cordes vocales qui sont appelées mécanismes laryngés, de gauche à droite sur la figure 1.5: mécanisme M0, M1, M2 et M3.

Nous pouvons constater sur la figure 1.5 que le passage d'un mécanisme à l'autre s'accompagne d'un saut de la fréquence fondamentale. Il s'agit là d'un phénomène que l'on observe chez une partie de la population. Certaines personnes semblent en effet être capables de passer du mécanisme M1 au M2 sans transition notable, alors que pour d'autres, un tel passage nécessite un apprentissage et une attention parfois soutenue.

Conformément à la figure 1.5, nous pouvons noter que chaque mécanisme a sa propre tessiture, donc sa propre plage fréquentielle d'émission potentielle. Le mécanisme M0 correspond aux sons les plus graves, puis viennent dans l'ordre les mécanismes M1, M2 et M3. Ajoutons également que les plages de fréquence de chaque mécanisme ne sont pas disjointes, il existe au contraire

une plage fréquentielle de recouvrement, dans laquelle le chanteur peut choisir quel mécanisme il souhaite utiliser.

Les quatre mécanismes sont communs à l'homme, la femme et l'enfant. Dans le chant lyrique occidental, ce sont les mécanismes M1 et M2 qui sont principalement utilisés. Le mécanisme M3 est développé par les sopranos et sopranos coloratures pour chanter leurs notes les plus aiguës. Comme l'explique Expert [9], l'utilisation des mécanismes laryngés a varié au cours des siècles. Aujourd'hui, les voix de basses et de ténors (voix d'hommes) utilisent exclusivement le mécanisme M1, et les contre-ténors (voix d'hommes), altos, sopranos (voix de femmes) principalement le mécanisme M2, même si elles peuvent se servir du mécanisme M1 pour leurs émissions graves.

1.2.2 Configuration vibratoire des cordes vocales en mécanismes M1 et M2

Comme souligné précédemment, la vibration des cordes vocales dépend fortement du mécanisme utilisé. La figure 1.6 représente l'évolution de la configuration laryngée au cours d'une période pour les mécanismes M1 et M2.

- en mécanisme M1 : les cordes vocales sont épaisses. L'ouverture s'effectue sur l'épaisseur des cordes vocales: initiée au niveau inférieur du vocalis, elle se propage sur l'épaisseur du muscle pour finir par séparer les deux cordes vocales. Cette ouverture se propage ensuite le long des cordes vocales pour que, à l'instant du maximum d'ouverture, les deux cordes vocales soient complètement ouvertes. Elles se referment ensuite en se recollant depuis le dessous, puis sur toute leur épaisseur. La vibration en mécanisme M1 met en jeu une masse importante, et est caractérisée par une importante activité du muscle vocal.

- en mécanisme M2 : les cordes vocales sont cette fois-ci fines, le muscle vocal ne participe pas à la masse vibrante. Le contact ne s'effectue que sur la partie supérieure des cordes vocales. Lors de l'ouverture, les cordes vocales se séparent en leur milieu, et l'ouverture s'étend sur la longueur du muscle, mais seulement sur les deux tiers des cordes vocales environ. La phase ouverte est beaucoup plus longue que pour le mécanisme M1.

Reprenons l'exemple 1.5 de la soprano effectuant son glissando. Etant en mécanisme M1, son muscle vocal participe pleinement à la vibration des cordes vocales, et la masse vibrante est importante. En montant en fréquence, les cordes vocales se tendent, la masse vibrante augmente, mais cependant la longueur des cordes vocales augmente sous l'effet de la contraction des muscles crico-tyroïdiens. Lorsque le muscle vocal atteint un certain seuil en tension et en masse vibrante (parfois appelé masse critique), alors l'augmentation de fréquence n'est plus possible que par un changement de configuration des cordes vocales, autrement dit, un changement de mécanisme laryngé. Le passage en mécanisme M2 nécessite donc un découplage entre le muscle vocal et les couches superficielles des cordes vocales, qui sont seules à vibrer en mécanisme M2.

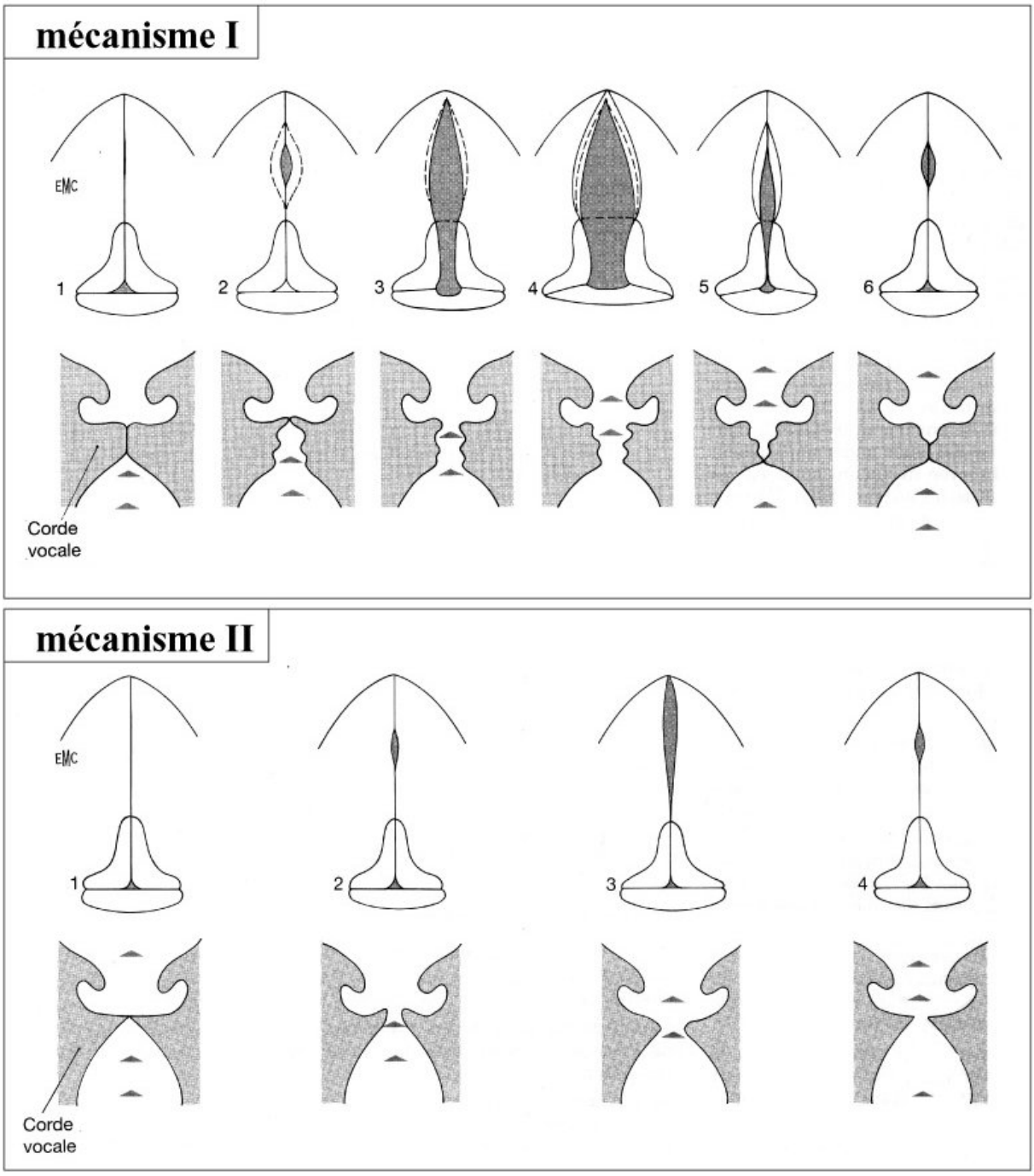

FIG. 1.6 – *Visualisation de la configuration glottique associée aux mécanismes M1 et M2. D'après Henrich [11].*

1.2.3 Relations entre registres et mécanismes laryngés

Les mécanismes laryngés correspondent à une réalité physiologique dont tout chanteur, amateur ou non, peut prendre conscience. C'est pourtant le terme de registre qui est couramment employé dans le milieu musical pour les désigner. Il est pourtant nécessaire d'établir une distinction entre les deux.

La définition du terme de registre a évolué au cours du temps, et diffère d'une culture (ou tradition) à l'autre (cf. Henrich, [12]). Un registre renvoie avant tout à des sensations qu'un chanteur éprouve, associées à une qualité de timbre donnée. Il existe beaucoup de registres, nous pouvons citer par exemple le registre de tête (head register), de poitrine (chest register), le falsetto. Cependant, des sensations sur lesquelles le chanteur se base pour établir ces registres peuvent avoir diverses origines, c'est pour cela que l'on peut être amené à distinguer les registres laryngées des registres résonantiels. Dans le premier cas, le chanteur effectue une action au niveau du larynx, alors que dans le second cas il joue sur ses résonateurs pour modifier le timbre du son, indépendamment (au moins dans une certaine mesure) de la source glottique. Dans cette optique, on pourrait considérer que les mécanismes laryngés décrits précédemment correspondent à des registres laryngés.

Cependant ce serait se risquer à une importante confusion terminologique. Ainsi le registre de tête chez l'homme utilise-t-il la partie la plus aiguë du mécanisme M1, alors que chez la femme il utilise le mécanisme M2! Le terme de mécanisme nous permet donc de nous référer sans ambiguïté à une réalité vibratoire des cordes vocales indépendamment du sexe du chanteur, de son style de musique, de sa culture, et de tout autre paramètre susceptible d'influencer sa propre définition des registres.

Les registres utilisant principalement les mécanismes M1 et M2 sont cités ci-dessous:

- chez la femme:
  - mécanisme M1 (ou mécanisme lourd): registre de poitrine
  - mécanisme M2 (ou mécanisme léger): registre de tête
- chez l'homme:
  - mécanisme M1: registre de poitrine et de tête (dans l'aigu)
  - mécanisme M2: falsetto

1.3 La voix mixte

1.3.1 Définition des chanteurs

L'évolution artistique occidentale de ces derniers siècles a conduit les chanteurs à développer une importante tessiture vocale (donc à travailler aussi bien leurs sons graves qu'aigus), et surtout à pouvoir proposer une continuité de timbre la plus parfaite possible. Nous avons vu que les sons graves étaient produits en mécanisme M1, et les sons aigus en mécanisme M2. Cependant le passage d'un mécanisme à l'autre provoque un changement de timbre important,

et peut même être accompagné d'un saut de fréquence comme nous l'avons vu grâce à l'exemple 1.5. Une importante technique vocale a donc été développée, visant à atténuer le passage de mécanismes, et même à obtenir un continuum de timbre d'un mécanisme à l'autre.

Ainsi la voix mixte est un registre qui s'étend sur une tessiture située au niveau de la jonction entre celles des mécanismes M1 et M2, et visant à effectuer une "adaptation de timbre" lors du passage de mécanismes. Il peut également être également utilisé en l'absence de passage de mécanisme, dans le cas de recherches d'imitations de mécanismes.

1.3.2 Position du problème

Le terme de voix mixte est lui même très ambigu, car le terme de "mixte" laisse supposer qu'il s'agirait d'un mélange... mais un mélange de quoi? S'agirait-il d'un mélange de timbre? de mécanisme laryngé? Et dans ces deux cas, comment est produit ce registre particulier? Correspond-il a un cinquième mécanisme?

Garcia est le premier professeur de chant qui, à la fin du XIXème siècle, a réussi à observer le mouvement des cordes vocales en phonation (cf. Henrich [12]). Il avait alors utilisé un petit miroir placé au fond de la gorge (le laryngoscope). Ses observations lui avaient permises d'affirmer que les vibrations des cordes vocales dans les deux mécanismes étaient totalement incompatibles, donc qu'une émission vocale en registre de voix mixte ne pouvait pas résulter d'un "mixage de mécanismes".

Cependant cette affirmation ne fait pas l'unanimité. Ainsi R. Miller [18] ou M.F. Castarède [2] décrivent la voix mixte comme un subtil mélange des caractéristiques acoustiques et physiologiques des deux mécanismes laryngés.

Plus récemment, Expert [9] considérait au contraire qu'il existait clairement deux sortes de voix mixtes, l'une émise en mécanisme M1, et l'autre en mécanisme M2, chacune ayant pour but soit d'imiter l'autre mécanisme, soit de "préparer" le passage. Des études menées par Castellengo et al. [3] ou D. Miller et Schutte [17] sembleraient corroborer cette hypothèse. La voix mixte serait alors un registre résonantiel, émis avec l'un ou l'autre des mécanismes. Le propos de ce travail est donc de tenter d'éclaircir la question et, si possible, d'apporter un début de caractérisation de la voix mixte. Nous chercherons, dans un premier temps, à vérifier que la voix mixte est émise soit en mécanisme M1, soit en mécanisme M2, ce qui nous amènera à étudier deux voix mixtes au lieu d'une. Nous chercherons ensuite à établir des caractéristiques de ces deux voix mixtes.

Chapitre 2

Méthodes exploratoires, paramètres caractéristiques utilisés

2.1 L'électroglottographie

2.1.1 Description de l'appareil et de son fonctionnement

L'électroglottographie est une méthode d'étude du contact entre les cordes vocales. Très simple d'utilisation, elle est non-invasive et laisse le chanteur pratiquement totalement libre de ses mouvements.

L'appareil en question est constitué de deux électrodes que l'on place sur le cou du chanteur, au niveau du cartilage thyroïdien, reliées à un générateur de courant constant et de très faible intensité. La mesure de la différence de potentiel aux bornes des deux électrodes nous permet de déterminer d'impédance du cou, constitué donc, si les électrodes sont placées convenablement, de la peau, des cartilages thyroïdiens, de muscles et de la glotte.

Les tissus étant meilleurs conducteurs que l'air, le signal devient beaucoup plus important lors des phases de contact entre les deux cordes vocales, donc lors des phases fermées.

2.1.2 Caractéristiques du signal obtenu

Le signal électroglottographique (EGG) est donc en toute rigueur un signal représentant une admittance. Cependant la signification de l'amplitude du signal peut être élargie : en effet, la surface de contact entre les corde vocales est proportionnelle à l'admittance mesurée par l'électroglottographe. Comme aucun calibrage ne peut être effectué au niveau du signal EGG, une valeur d'amplitude de ce signal n'a aucune signification en elle même. En revanche, les variations nous donnent des informations précieuses quant à la vibration des cordes vocales. En particulier, l'enveloppe du signal EGG nous permet d'estimer (relativement) la surface de contact, et une diminution brutale de l'enveloppe traduit un amincissement du contact.

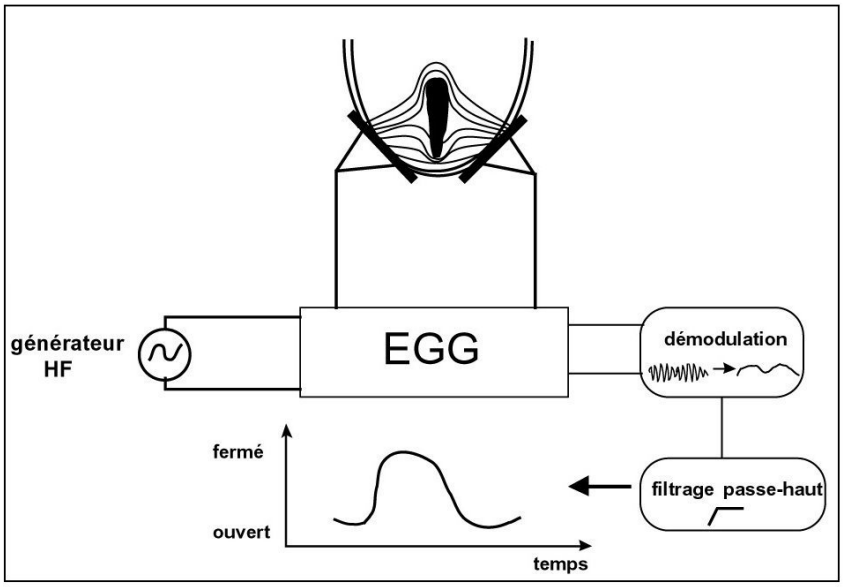

FIG. 2.1 – *Description du fonctionnement de l'électroglottographe. D'après Henrich [11].*

2.1.3 Le signal électroglottographique et sa dérivée

Un des intérêts de l'électroglottographie est de nous donner un accès direct à la source glottique. Le signal EGG permet de visualiser et déterminer les temps d'ouverture et de fermeture glottique, marqués par une variation brutale du signal. Ils sont donc caractérisés par une valeur très importante de la pente du signal EGG. En conséquence, sa dérivée (le signal DEGG) présente des pics lors de l'ouverture et de la fermeture glottique, nous parlons de pics d'ouverture et de fermeture glottique.

Schématisation des deux signaux

La figure 2.2 représente les signaux EGG et DEGG pour une période et pour les mécanismes laryngés M1 et M2.

Cette figure permet de décrire quatre phases du mouvement glottique:

- de 1 à 3: phase de fermeture. Les cordes vocales se referment, d'abord sur leur partie inférieure, puis sur leur partie supérieure. Cette phase est marquée par un pic très marqué sur le signal DEGG, correspondant à l'instant ou les cordes vocales s'accolent sur toute leur longueur.

- de 3 à 4: phase fermée.

- de 4 à 6: phase d'ouverture, marquée par un pic sur le signal DEGG. Celui-ci est habituellement moins marqué que le pic de fermeture.

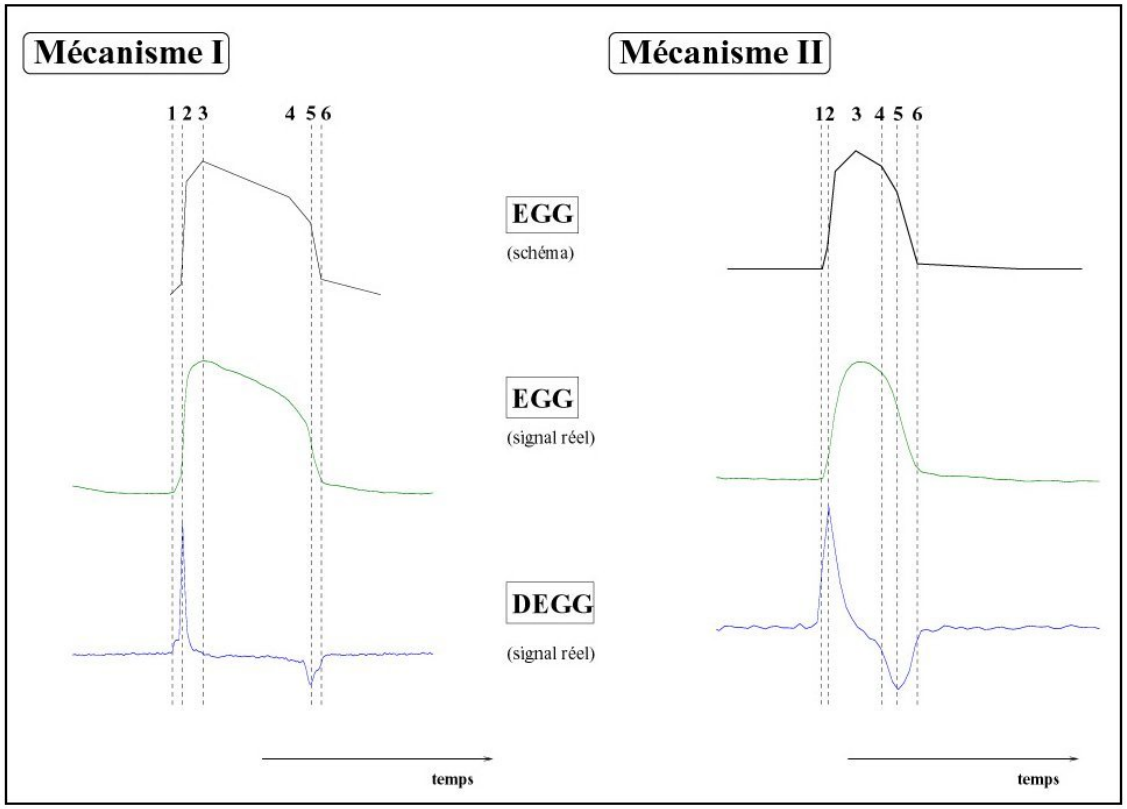

FIG. 2.2 – *Illustrations du mouvement glottique visualisées sur un signal EGG et sur sa dérivée. D'après Henrich [11].*

– de 6 à 1: phase ouverte. Elle est marquée par une très faible valeur du signal EGG. Cela tient au fait que les mouvements des cordes vocales sont difficilement visualisables sur le signal EGG une fois la glotte ouverte, celui-ci étant sensible avant tout au contact entre les cordes vocales.

Nous pouvons d'ores et déjà constater sur la figure 2.2 que les signaux EGG et DEGG différent significativement d'un mécanisme laryngé à l'autre. En particulier le mécanisme M1 se caractérise par une phase fermée plus importante, et le signal EGG semble plus symétrique en mécanisme M2.

Signification de la dérivée du signal électroglottographique

Nous avons vu que le signal EGG décrivait l'évolution de la surface de contact des cordes vocales au cours du temps. Les variations du signal DEGG correpondent donc à la dérivée de cette surface de contact. Ce terme ne prend une signification notable que lors des phases d'ouverture et de fermetures. Ainsi on peut considérer la valeur des pics d'ouverture (resp. fermeture) glottiques comme correspondant à des vitesses d'ouverture (resp. fermeture), même si ces valeurs n'ont un sens que relativement les unes aux autres.

Dans le cadre ce ce travail, nous avons utilisés les signaux DEGG pour chercher à caractériser des mouvements glottiques spécifiques. Cette démarche est explicitée en partie 2.4.

Des signaux réels

Les signaux schématisés ci-dessus correspondent à ce qui est le plus couramment observé chez les chanteurs lorsque on leur demande de chanter en utilisant tel ou tel mécanisme. Ils correspondent donc à une intensité "confortable" pour le chanteur, et les pics de fermeture et d'ouverture traduisent un mouvement net. Il n'en est cependant pas toujours ainsi. En effet, les signaux EGG peuvent non seulement varier significativement d'un chanteur à l'autre, mais aussi pour un même chanteur, en fonction d'autre paramètres, comme l'intensité. Nous présentons ici un exemple d'un signal DEGG "atypique".

La figure 2.3 correspond à un son de faible intensité. On peut constater sur le signal DEGG qu'il n'y a pas unicité du pic de fermeture. Cette donnée traduit une fermeture qui n'est pas franche, ou qui est effectuée en plusieurs étapes. Nous parlons alors de dédoublement du pic de fermeture. Le même phénomène peut être observé sur le pic d'ouverture.

Les dédoublements de pics correspondent à des phénomènes laryngés qui demeurent mal compris. Seule des méthodes de visualisation directe de la configuration laryngée (cf. partie 2.2.2) peuvent nous permettre de mieux comprendre leur signification. Notons cependant que ces dédoublements ont été observés sur un grand nombre de sujets, et qu'ils ne sauraient constituer un artefact de mesure.

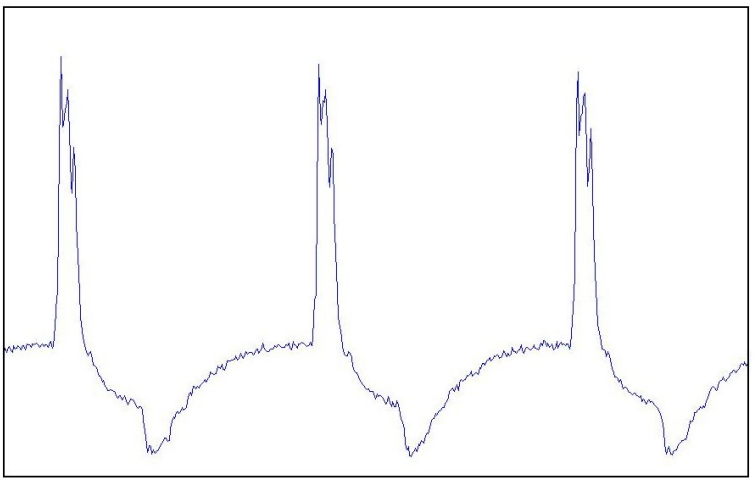

FIG. 2.3 – *Exemple de dédoublements (voir même dé-triplement ici) de pics de fermeture. Note: sib2, mécanisme M1.*

Il existe d'autres cas de signaux DEGG particuliers, nous en observerons d'autres, issus de la base de données étudiée, en 2.3.3.

2.2 Méthode acoustique et visualisation

2.2.1 L'enregistrement acoustique

L'enregistrement acoustique est sans aucun doute la méthode la plus simple à mettre en oeuvre, nous en retirons un certain nombre d'informations, comme par exemple l'intensité du signal émis, sa composition spectrale... Cependant il s'agit là du signal initié au niveau de la source glottique, qui a subit les déformations spectrales imposées par le conduit vocal. L'étude du signal acoustique ne nous permet donc pas de travailler sur la source glottique directement. Des méthodes de filtrage inverse existent, nous ne les avons pas employées dans le cadre de ce travail car elles supposent de connaître (ou de pouvoir déterminer) exactement la fonction de transfert des résonateurs, ce qui constitue un point délicat, dans le domaine de la voix chantée notamment.

2.2.2 La cinématographie ultra-rapide

La cinématographie ultra-rapide est une méthode invasive d'observation des cordes vocales. La glotte est éclairée en permanence, et des images sont enregistrées à l'aide d'une caméra introduite dans le conduit vocal, et prenant environs 4000 images par seconde. Cette fréquence d'enregistrement nous permet d'observer en détail chaque période du signal chanté.

Cette méthode est assez lourde à mettre en oeuvre, il n'existe d'ailleurs pas de tel système opérationnel en France actuellement. Très contraignante pour le chanteur (qui ne peut pas

articuler), cette méthode est néanmoins très précieuse, car lorsque l'enregistrement est effectué avec en parallèle un électroglottographe, elle permet de vérifier des hypothèses ou d'apporter des explications quant à un certain nombre de phénomènes observés. Par exemple un changement de mécanisme est très facilement repérable.

Aucun enregistrement de ce type n'a été effectué spécifiquement dans le cadre de ce stage, néanmoins des données déjà enregistrées par Henrich ont permis de confirmer des hypothèses comme nous allons le voir dans la partie 4.5.5.

La kymographie

A partie d'enregistrements de cinéatographie ultra-rapide, plusieurs études des mouvements laryngés sont possibles grâce à des techniques de traitement d'images. Nous en présentpons ici une que nous avons utilisés dans le cadre de ce travail: il s'agit de la kymographie.

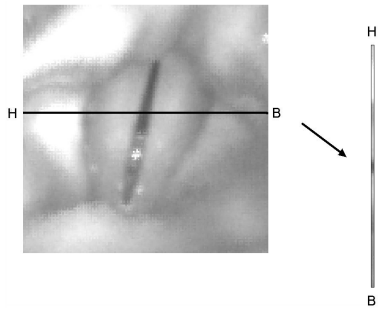

FIG. 2.4 – *Schéma explicatif du fonctionnement de la kymographie.*

Le Principe de la kymographie est décrite figure 2.4. Nous y voyons une image de larynx, enregistrée par cinématographie ultra-rapide. Nous choisissons sur cette image un axe de référence, un instant de début et un instent d'arrêt. Entre ces deux instents, pour chaque image, et chaque position le long de l'axe choisi, le logiciel copie l'évolution des couleurs. Le résultat est un graphique représentant en abscisses le temps, et en ordonnées la position le long de l'axe de référence. Un exemple est donné figure 4.14.

Dans le carde de notre étude, cette méthode nous permet d'étudier la glotte en phase ouverte, notammant en mesurant la distance d'ouverture entre les cordes vocales, ce qui n'est pas possible par des enregistrements EGG (qui sont sensibles au contact entre les cordes vocales).

2.3 Paramètres glottiques et acoustiques

2.3.1 La fréquence fondamentale

La fréquence fondamentale du signal correspond au nombre de périodes par seconde. Elle peut être estimée de diverses façons. Par exemple il est possible de la déterminer à partir de la détection des pics d'ouverture ou de fermeture glottique, visualisables sur le signal DEGG.

Il existe plusieurs algorithmes d'estimation de la fréquence fondamentale. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de travailler avec la méthode développée par De Cheveigné et Kawahara [7], et baptisée "YIN". Cette méthode est basée sur l'utilisation de la fonction d'autocorrélation, qui permet une première estimation de la fréquence fondamentale. Plusieurs autres méthodes ont été développées et implémentées pour réduire le taux d'erreur, ce qui en fait un algorithme très fiable, d'autant plus dans le cadre de l'étude d'une voix chantée (qui constitue un cas "simple" par rapport aux domaines d'applications possibles).

2.3.2 L'intensité du signal acoustique

Définition

L'intensité du signal acoustique est déterminée grâce à l'enregistrement acoustique. Il s'exprime habituellement en dB SPL, définis par:

$$I = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_c(t)}{p_0} \right)^2 dt \right]$$

où $p_c(t)$ correspond à la pression acoustique au niveau du microphone et p_0 une valeur de référence valant $2.10^{-5} Pa$.

Pour des raisons d'homogénéité avec des travaux antérieurs, nous avons choisi de l'exprimer en décibels "pondérés A" (dBA). La correspondance entre les deux grandeurs est obtenue à partir le la courbe isosonique correspondant à la valeur de 30 phones, définie par la norme NF ISO 226 (1987) [1]. Notons que cette norme a été révisée en 2003.

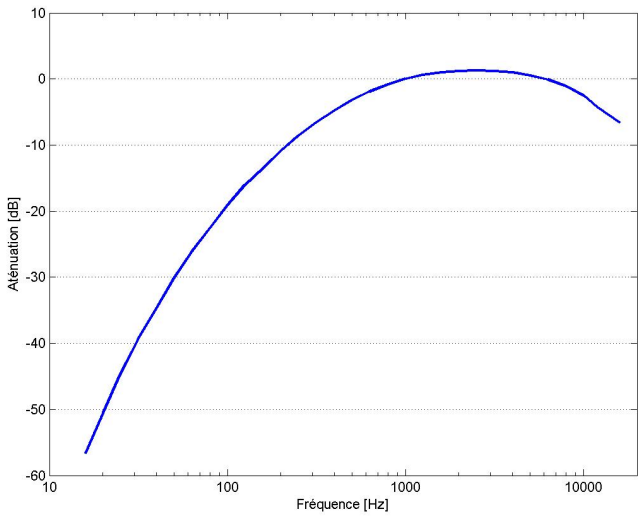

FIG. 2.5 – *Schématisation du filtre de pondération A.*

Le phonétogramme

L'intensité du signal acoustique est une valeur intéressante à deux points de vue: La valeur de l'intensité d'un son émis sur une note donnée est bien sûr une information fondamentale. Mais pour étudier la voix d'un chanteur donné, il est intéressant de déterminer sa dynamique vocale pour chaque note de la gamme, c'est à dire l'ensemble des intensités qu'il est capable de produire sur une note donnée. En pratique, cela se résume évidemment à déterminer le son de plus faible intensité (pianissimo) et celui de plus forte intensité (fortissimo) qu'il est capable de chanter. Le graphique présentant la dynamique vocale en fonction de l'intensité est appelé phonétogramme. Notons que l'on peut établir un phonétogramme pour chaque voyelle.

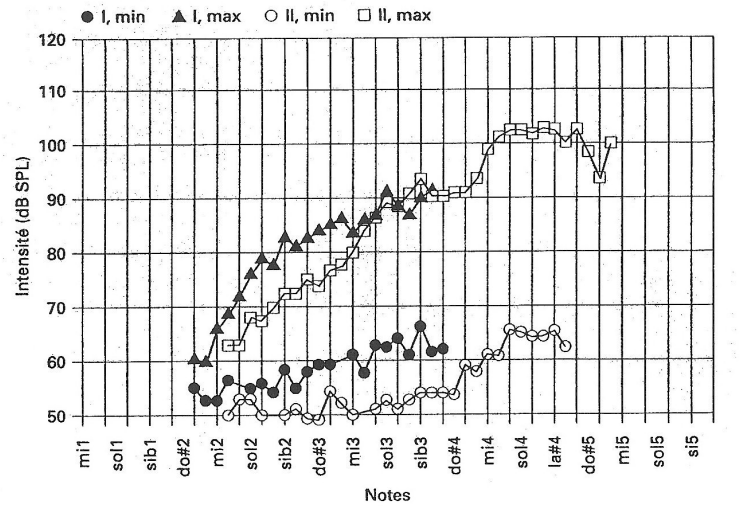

FIG. 2.6 – *Exemple de phonétogramme par mécanisme laryngé d'un sujet féminin chanteur confirmé. D'après Roubeau, Castellengo et Bodin [20].*

La figure 2.6 correspond à un phonétogramme par mécanisme laryngé. Sur cette figure on distingue les mécanismes M1 et M2. Une telle figure permet notamment d'établir clairement quelle est la zone de recouvrement des deux mécanismes, à la fois fréquentielle et en terme d'intensité.

2.3.3 Le quotient ouvert

Définition

Le quotient ouvert (Oq) est un paramètre lié à la source glottique. Il est défini par le rapport de la durée d'ouverture par la période. Il varie donc de 0 (cas théorique d'un cycle glottique sans ouverture) à 1 (cas d'une fermeture incomplète).

La détermination du quotient ouvert peut être effectuée à partir de différents signaux. Dans le cadre de ce travail, nous le déterminerons à l'aide du signal EGG, ainsi que de sa dérivée.

Méthodes d'estimation

Il existe différentes méthodes d'estimation du quotient ouvert. Nous avons vu en 2.1.2 que une période du signal EGG pouvait être décomposée en deux parties, l'une correspondant à la phase ouverte (valeurs faibles de l'EGG) et l'autre à sa phase fermée. La détermination du quotient ouvert nécessite la connaissance des durées d'ouverture et de la période.

- Méthodes basées sur le signal EGG uniquement: deux méthodes ont été utilisées jusqu'à présent, elles placent les instants d'ouverture est de fermeture glottique lorsque le signal vaut 50% ou 35% de son amplitude totale, l'instant d'ouverture se trouvant dans la phase de décroissance de l'onde, et celui d'ouverture lors de la phase de croissance. Les valeurs de 35% et 50% ont été choisies empiriquement, et n'ont donc pas de justification théorique précise. Cependant, on pourra noter la grande robustesse de ces méthodes (quoi que certains exemples étudiés dans ce travail les aient tout de même mis en défaut).

- Méthode "decom", basée sur le signal DEGG: comme nous l'avons vu dans la partie 2.1.3, le signal DEGG permet de déterminer très précisément les instants d'ouverture et de fermeture glottiques, une détection de pics permet à la fois de déterminer la fréquence fondamentale et le quotient ouvert. Le temps d'ouverture correspond à l'intervalle entre les pics d'ouverture et de fermeture (pris dans cette ordre). Cette méthode a été proposée par Henrich [11] lors de son travail de thèse, et montre de très bons résultats. Son inconvénient est qu'elle nécessite un signal DEGG propre avec des pics bien marqués, ce qui n'est pas toujours le cas.

- Méthode dite de Howard, basée sur les signaux EGG et DEGG: l'instant de fermeture est déterminé par détection du pic de fermeture du signal DEGG, et l'ouverture est estimée à 3/7 de l'amplitude totale du signal EGG sur une période. L'expérience a montré que cette méthode donnait de meilleurs résultats que les méthodes par seuils, et restait plus robuste que la méthode basée uniquement sur les signaux DEGG.

Une analyse comparative de ces différentes méthodes a été effectuée par Henrich [11].

Méthode utilisée

Pour obtenir des résultats comparables, nous avons été amenés à choisir une même méthode à utiliser pour l'ensemble de la base de données.

La figure 2.7 correspond à un signal DEGG relevé parmi la base de données enregistrée. Nous pouvons notamment remarquer une absence quasi totale du pic d'ouverture. On peut en déduire que la méthode basée sur la détection des pics d'ouverture et de fermeture ne pourra pas être utilisée dans le cas présent. L'exemple 2.8, correspond aussi à un enregistrement de la base de données, montrant cette fois-ci des doubles pics d'ouverture de même amplitude. Il n'y a alors pas de critère justifiant de prendre l'un plutôt que l'autre, et l'algorithme de détection choisira le plus grand. La méthode "decom" n'est donc pas assez robuste pour être utilisée ici.

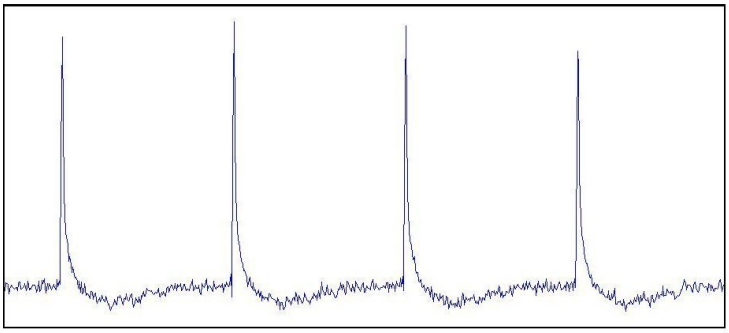

FIG. 2.7 – *Exemple de signal DEGG d'un des sujets observé, en mécanisme M1, sur do#3.*

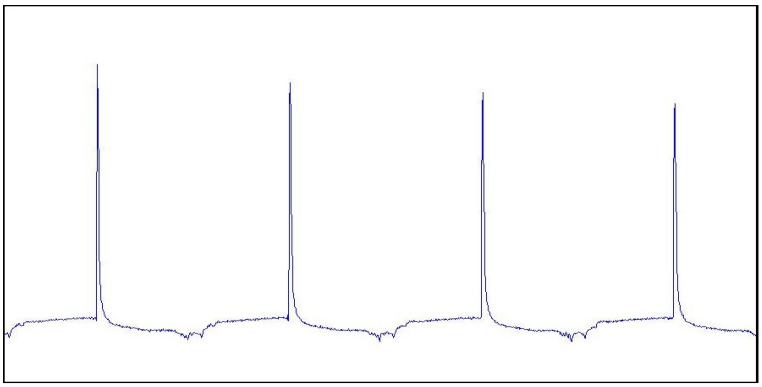

FIG. 2.8 – *Exemple de signal DEGG d'un des sujets observé, en mécanisme M1, sur do#3.*

Nous lui préfèrerons la méthode de Howard, qui fournit des résultats très proches de "decom", mais est plus robuste, notamment face à ce genre de situations.

2.4 Etude des dédoublements de pics du signal électroglottographique dérivé

2.4.1 Position du problème

Les dédoublements de pics correspondent à des phénomènes laryngés, et sont couramment observés, notamment dans les domaines d'intensité et de fréquences correspondant à la voix mixte. C'est le cas notamment des dédoublements de pics de fermeture, ce qui pose un problème de détermination du quotient ouvert compte tenu du choix de méthode d'estimation effectué. En effet le dédoublement choisi par l'algorithme est celui dont l'amplitude est la plus grande. Si le maximum passe d'un dédoublement à l'autre, nous observons sur la courbe du quotient ouvert un saut qui ne correspond pas à une modification laryngée brutale, mais résulte de la méthode de calcul utilisée. De façon encore plus évidente, dans le cas de deux dédoublements de même amplitude, nous n'avons aucun critère rationnel permettant de choisir l'un plutôt que l'autre... et l'on peut même se demander si le quotient ouvert a encore une signification dans la mesure où la fermeture (ou l'ouverture) est effectuée en plusieurs étapes.

Une étude des dédoublements de pics nous permet donc d'éviter d'effectuer un tel choix. Cependant, le procédé ne va pas sans poser un certaon nombre de problèmes: en effet, les dédoublements de pics sont des phénomènes qui demeurent mal compris. Certains cas de dédoublements ont pus être interprétés comme correspondant à une fermeture ou ouverture déphasée sur la corde vocale (grâce à l'appui de la cinématographie ultra-rapide, cf. Henrich [11]). Il pourrait être possible, notamment en mécanisme M1, qu'ils puissent correspondre à un mouvement en plusieurs étapes sur l'épaisseur, même si ce genre de mouvement est plus difficilement visualisable.

Le but de cette étude sur les dédoublements n'est donc pas (dans l'état actuel des connaissances) de décrire précisément la vibration (ni même le contact) glottique à partir du signal DEGG, mais d'établir des relations d'ordre laryngé entre différents enregistrements. Nous chercherons notamment s'il est possible de mettre en relation des modifications perceptibles de timbre et des changements de configurations des dédoublements.

Pour effectuer cette étude, un algorithme de détection des dédoublements de pics a été mis au point, et va maintenant être présenté.

2.4.2 Algorithme de détection

L'algorithme est basé sur la connaissance des instants de fermeture glottique. Dans le cas de dédoublements, cette détermination est à priori approximative, mais cela n'a pas d'incidence sur le fonctionnement du programme. Nous considérons donc que nous connaissons la période (approximative) du signal DEGG.

Chaque période est étudiée séparément.

- Dans un premier temps, la période étudiée, centrée sur le pic de fermeture, est isolée.
- La partie négative du signal DEGG est mise à zéro.
- Les maximums locaux sont détectés. Pour cela, nous calculons la dérivée du signal DEGG et nous cherchons les instants de changements de signe, passant du positif au négatif.
- Enfin, dans un soucis de ne garder que les valeurs les plus pertinentes, nous ne retenons que les quatre valeurs les plus élevées en terme d'amplitude du signal DEGG.

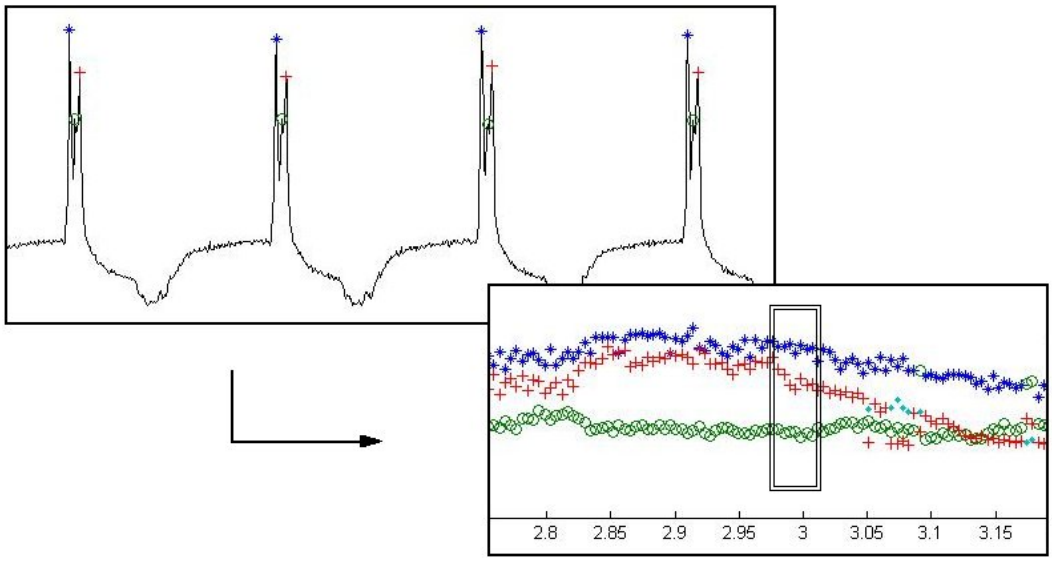

FIG. 2.9 – *Illustration du fonctionnement de l'algorithme. En abscisses sur la seconde figure: le temps (en secondes).*

La figure 2.9 illustre le fonctionnement de l'algorithme. Dans l'exemple représenté, il y a trois dédoublements de pics de fermeture du signal DEGG. Ces trois dédoublements sont détectés, et conduisent à trois courbes sur la seconde figure. La zone représentée sur le signal DEGG est doublement encadrée.

La figure 2.10 est un exemple de courbes obtenu à l'aide de l'algorithme. L'axe des abscisses correspond au temps (en secondes). Celui des ordonnées correspond à une unité arbitraire,

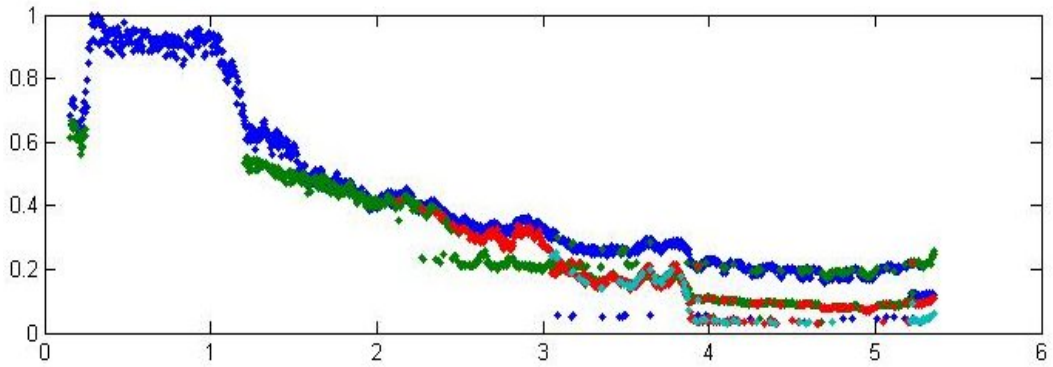

FIG. 2.10 – *Exemple de courbes obtenus grâce à l'algorithme. Le son étudié est un decrescendo du mécanisme M1 au mécanisme M2, sur un sib2.*

proportionelle à l'amplitude maximale du signal DEGG. Elle est normalisée de sorte que le maximum prenne la valeur 1.

2.4.3 Limites de l'algorithme

La figure 2.11 illustre le principal défaut de la méthode proposée: à chaque période, les amplitudes des dédoublements de pics sont stockés dans un vecteur, puis une première courbe représente l'évolution du premier dédoublement détecté pour chaque période. Dans le cas présenté, un second dédoublement apparaît en première position pour chaque période, donc la courbe représentant le dédoublement le plus grand est schématisée en bleu/étoilé alors des deux premières périodes, puis en vert/cerclé par la suite, alors qu'il aurait été plus logique qu'il soit représenté par une même courbe. La conséquence est donc que la signification des couleurs doit être prise avec beaucoup de précautions. Une illustration de cette situation est par exemple donnée figure 2.10. A $t = 2.2s$, nous constatons que le deuxième dédoublement passe du vert au rouge, sous l'effet de l'apparition d'un autre dédoublement d'amplitude moindre.

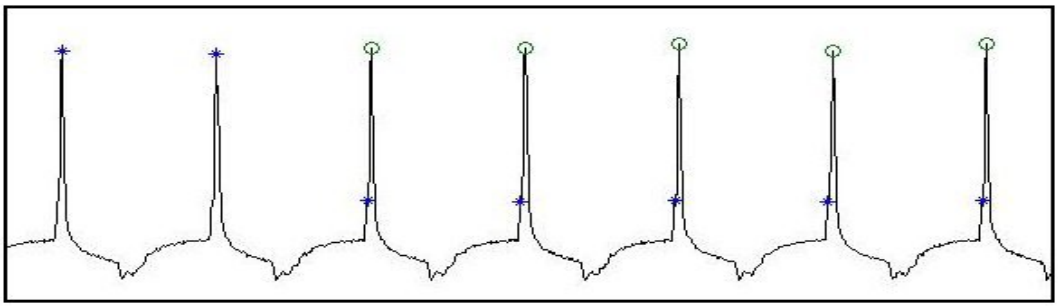

FIG. 2.11 – *Illustration d'un dysfonctionnement de l'algorithme de détection des dédoublements de pics.*

Nous avons volontairement écarté les méthodes basées sur l'amplitude des dédoublements, l'algorithme ayant avant tout une utilité lorsque plusieurs dédoublements ont la même amplitude. Une méthode de tri a été mise en place dans le cadre de ce stage, mais ne fonctionne que pour des cas "très simples", c'est à dire pour lesquels le signal DEGG présente très peu de dédoublements, ce qui n'est donc pas d'un grand intérêt. Nous utilisons donc l'algorithme présenté avant de proposer une méthode permettant un suivi de dédoublements.

2.5 Mécanismes laryngés, quotient ouvert, caractérisation électroglottographique

2.5.1 Changement de mécanisme laryngé lors d'un glissando

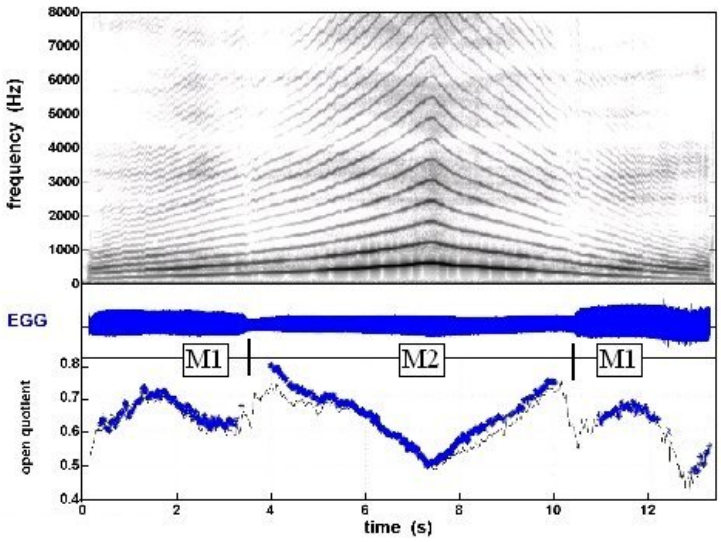

FIG. 2.12 – *Exemple de glissando ascendant puis descendant, effectué par un contre-ténor. L'exemple est marqué par deux passages de mécanismes. Le quotient ouvert a été calculé par la méthode "decom" (trait gras) et la méthode de seuillage du signal EGG à 35% de son amplitude (traits fins).*

La figure 2.12 illustre un changement de mécanisme laryngé du mécanisme M1 au M2, puis du M2 au M1. Comme nous l'avons vu grâce à la figure 1.5, le passage de mécanisme est marqué par un saut de fréquence fondamentale parfois très audible (valant souvent une tierce mineure). Nous constatons ici que ce saut de fréquence est accompagné:

– d'une **variation brutale de l'enveloppe du signal EGG**. Cette variation est due au changement de configuration glottique associé à chacun des mécanismes laryngés: en mécanisme M1, la masse vibrante est importante, les cordes vocales s'accolent sur leur épaisseur, donc la surface de contact est importante. Il en résulte une grande amplitude

du signal EGG. En mécanisme M2, au contraire, les cordes vocales ne s'accolent que sur leur surface supérieure, d'où une plus faible surface de contact, donc un signal EGG plus faible. Nous constatons ici que le passage d'une configuration à l'autre est très rapide, de l'ordre de quelques périodes.

– d'un **saut de quotient ouvert**: celui ci passe en effet de 0,6 environ en mécanisme M1 à 0,8 en mécanisme M2. Nous pouvons constater que la transition est marquée ici par l'apparition de dédoublements de pics, rendant impossible le calcul du quotient ouvert par la méthode "decom". Le résultat de la méthode d'estimation du quotient ouvert par seuillage à 35% montre une variation très rapide du quotient ouvert lors des deux passages (surtout le second).

La détermination d'un passage de mécanisme est donc habituellement un phénomène qui peut se manifester de part chacun des paramètres étudiés. Il est donc habituellement décelable, tant perceptivement que par les discontinuités de la fréquence fondamentale et du contenu spectral que par l'études de paramètres glottiques. Un exemple de cas litigieux est présenté en annexe A.

2.5.2 Mécanismes et quotient ouvert

De façon générale, il a été observé que le quotient ouvert est plus élevé en mécanisme M2 qu'en M1: il peut varier de 0,3 à 0,8 environ en mécanisme M1, et de 0,5 à 0,95 en mécanisme M2. Nous pouvons constater que ces ordres de grandeur sont très larges, et traduisent une très grande variabilité d'un chanteur à l'autre.

Evolution du quotient ouvert en mécanisme M1

Les variations du quotient ouvert au sein de chaque mécanisme laryngé ont été étudiées en détail par Henrich [11] au cours de son travail de thèse. Nous nous contenterons donc de relever ici les variations significatives pour les études à venir.

La figure 2.13 représente un crescendo, effectué en mécanisme M1 par un sujet masculin. Nous constatons une nette diminution du quotient ouvert de 0,68 à 0,50, associé à l'augmentation d'intensité de 85 à 100 dBA. Il semble donc que le quotient ouvert soit inversement corrélé à l'intensité. Cette constatation peut être étendue à l'ensemble des production de ce chanteur en mécanisme M1, et également à la plupart des chanteurs de façon générale. En revanche, la fréquence fondamentale n'a pas d'effet notable sur le quotient ouvert dans ce mécanisme.

Evolution du quotient ouvert en mécanisme M2

En mécanisme M2, les dépendances sont inversées, à savoir que le quotient ouvert est inversement corrélé à la fréquence fondamentale, mais très peu dépendant de l'intensité. Une

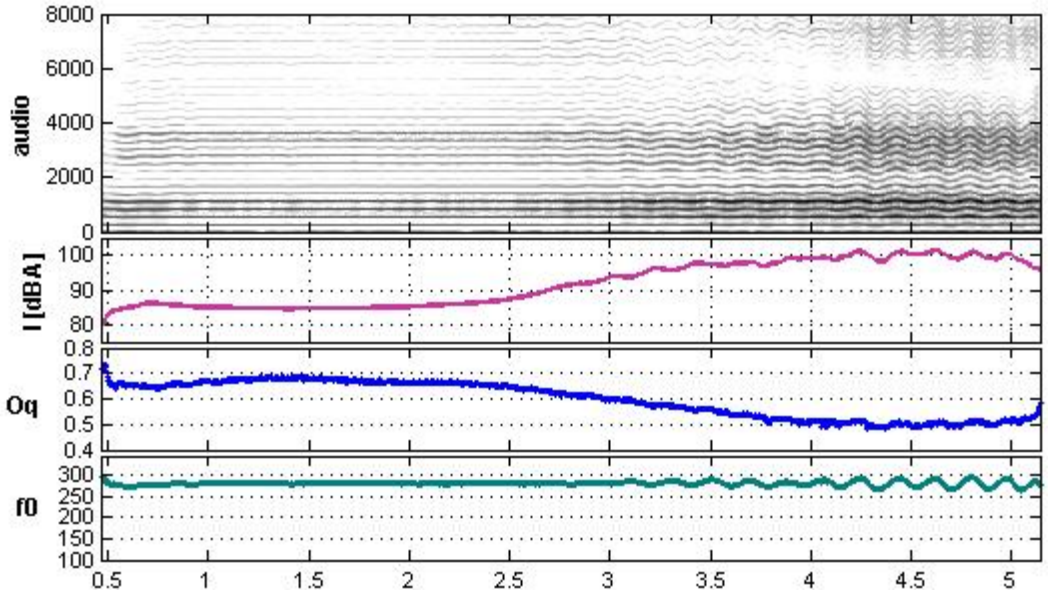

FIG. 2.13 – *crescendo effectué par un contre-ténor (sujet CT), en mécanisme M1, sur la voyelle [a] et la note do#3. D'après Henrich [12].*

illustration de ce phénomène est par exemple donnée figure 2.12.

Validité de ces dépendances et effet de la voyelle

Soulignons ici que ces constatations ont été vérifiées sur certains chanteurs, essentiellement masculins. Elles ne sauraient être généralisables à tout chanteur sans précautions. Il est donc important, avant de commencer à étudier les paramètres vocaux de tel ou tel chanteur, de vérifier comment ces paramètres évoluent dans les différents mécanismes laryngés. C'est ce que nous effectuerons en 4.1.

Enfin, il est à noter que la voyelle peut avoir des influences sur le quotient ouvert. La voyelle est une caractéristique du timbre qui, dans certains cas, permet de donner du sens à une phrase, musicale ou non. Chaque voyelle est le résultat d'une configuration spécifique des résonateurs, permettant de positionner les formants vocaliques aux fréquences souhaitées. Il est possible dans certains cas (et notamment dans la voix chantée) que les résonateurs exercent un effet de retour sur la source glottique, et donc influent sur le quotient ouvert. Ces effets ont été peu étudiés jusqu'à présent, mais sont susceptibles de varier d'un chanteur à l'autre.

Chapitre 3

Protocole expérimental

Avant de détailler le protocole expérimental, il est nécessaire de revenir sur le but de cette étude. Nous savons que la voix mixte est un registre particulier développé par les chanteurs professionnels, qui permet d'assurer une continuité de qualité vocale entre les deux macanismes.

Dans un premier temps, nous allons chercher à déterminer dans quel domaine se situe la voix mixte en termes de hauteur, d'intensité et de quotient ouvert. Cette première étude, que nous comparerons avec les données de ces mêmes paramètres correspondant aux mécanismes laryngés M1 et M2 nous permettra de valider le fait que la voix mixte est bien produite soit en mécanisme M1, soit en mécanisme M2, ce qui nous amènera à distinguer deux voix mixtes. Puis pour chacune d'elle, nous chercherons à donner des caractéristiques plus précises pour éventuellement proposer une caractérisation de la voix mixte.

Pour cela, plusieurs enregistrements et séances d'écoute ont été organisées. Nous détaillons dans une première partie les raisons nous ayant amené à choisir les sujets enregistrés, puis nous détaillerons le protocole d'enregistrement utilisé et l'ensemble de la base de donnée établie.

3.1 Choix des sujets

La voix mixte correspondant à une technique qu'il est difficile de maîtriser parfaitement, le nombre de sujets potentiels s'est trouvé d'emblée réduit, et nous a imposé de chercher des chanteurs professionnels qui soient parfaitement conscients du registre dans lequel ils se placent en chantant.

Par ailleurs, il nous a semblé nécessaire de choisir des sujets susceptibles d'utiliser les deux mécanismes laryngés. Les femmes peuvent utiliser les deux, mais les hommes (ténor et basses) chantent exclusivement en mécanisme M1 (sauf peut être pour certains effets très particuliers).

Compte tenu de ces exigences, il nous a semblé plus pertinent de ne pas effectuer une étude sur une importante population, ce qui aurait été très compliqué à mettre en oeuvre, mais plutôt de nous focaliser sur un très petit nombre de chanteurs, pour déterminer au cas par cas quelle

est la stratégie utilisée par chacun d'entre eux. Si nous obtenons des résultats satisfaisants, une étude sur un plus grand nombre de chanteurs pourra être envisagée.

Nous avons donc entrepris de travailler avec deux chanteurs: une soprano (S) et un contre-ténor (CT), tous deux issus du Conservatoire National Supérieur de Musique de Paris (CNSMDP). La soprano a la caractéristique de toujours être capable de dire parfaitement quel mécanisme elle utilise. Quand à CT, sa tessiture et son répertoire artistique l'ont amené à travailler de manière très approfondie ses stratégies de passage de mécanisme, et donc sa voix mixte. Les deux chanteurs utilisent principalement le mécanisme M2.

3.2 Dispositif expérimental

L'enregistrement simultané des signaux acoustiques et électroglottographiques est effectué dans le studio son du Laboratoire d'Acoustique Musicale.

Le signal acoustique est enregistré à l'aide d'un microphone électrostatique Neumann placé à 30 centimètres du chanteur. Le signal est numérisé directement sur un DAT à une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz, sur 16 bits.

Le signal électroglottographique est enregistré en simultané sur la seconde piste du DAT. L'électroglottographe est constitué d'une paire d'électrodes à appliquer sur le cou du chanteur. Il délivre un courant de 10 mA, modulé en fréquence à 2 MHz. Un gel est appliqué sur les électrodes lors de leur placement pour faciliter le contact avec la peau.

Le déroulement de l'enregistrement peut être suivi grâce à un oscilloscope placé dans la salle d'enregistrement, permettant un retour visuel des signaux acoustiques et EGG. Les hauteurs sont données à l'aide d'un petit synthétiseur. Avant tout enregistrement, une calibration en intensité est effectuée. Pour cela, il est demandé au chanteur de produire une note tenue d'intensité la plus stable possible. Le niveau de pression est mesuré au niveau du microphone à l'aide d'un sonomètre, et cette mesure permet de déterminer le gain de la chaîne d'acquisition.

3.3 Constitution de la base de donnée exploitée

L'établissement d'un **phonétogramme**, dont nous avons vu l'importance pour notre étude, est une tâche lourde à réaliser, car elle impose au chanteur d'émettre les sons le moins fort et le plus fort possible sur l'ensemble de sa tessiture et pour les deux mécanismes. Comme nous l'avons vu, ce travail est préalable à tout enregistrement de voix mixte à proprement parler. Effectuer un tel enregistrement pour chaque demi-ton est donc un travail de longue haleine, qu'il est surtout difficile d'effectuer en une seule séance. En effet, le fait de se maintenir dans un mécanisme donné, ou de chanter le plus fort possible, requiert une importante concentration, et est physiquement contraignant. Pour ces raisons, il n'est pas raisonnable d'envisager des séances d'enregistrement de plus d'une heure.

Il est également bien évident que les deux professionnels qui ont très gentiment accepté de se prêter à nos expériences ne sont pas disponibles à volonté. Pour toutes ces raisons, nous avons limité nos enregistrements au strict minimum, ce qui donne cependant déjà beaucoup de matière à dépouiller et à analyser. En particulier, nous n'avons pas enregistré de phonétogramme complet (couvrant la totalité de la tessiture des chanteurs), mais nous nous sommes restreints à la zone dans laquelle ils sont susceptibles de chanter en voix mixte.

Nous avons choisi de travailler à la fois sur:

- des **sons tenus** sur une note donnée. Nous avons donc demandé aux chanteurs d'effectuer des crescendos et decrescendos, ce qui leur permet de passer continûment d'un mécanisme à l'autre, de la voix mixte à l'un des deux mécanismes; ce qui nous permet de déterminer des transitions, donc de caractériser plus précisément des productions entre elles.
- des petites **phrases musicales**. L'intérêt est de permettre au chanteur de replacer la voix mixte dans un contexte musical, pour qu'il soit le plus à son aise et qu'il effectue des exemples les plus pertinents possible.

3.3.1 Enregistrement de la soprano (S)

Le protocole d'enregistrement de S a été le suivant:

- Glissandos ascendants et descendants, sur la voyelle [a], au cours desquels la chanteuse change de mécanisme. Il lui a été demandé d'effectuer ces glissandos sans masquer le passage, puis en le masquant.

- Enregistrement de notes tenues: nous avons travaillé sur quatre notes comprises dans sa tessiture de voix mixte: la2, do#3, mib3, et fa3. Sur chacune d'elles, il a été demandé de chanter la note en mécanisme M1, puis en mécanisme M2, puis enfin d'effectuer un crescendo avec passage éventuel du mécanisme M2 vers le M1, ainsi qu'un decrescendo du M1 vers le M2. Toutes ces productions ont été demandées sur les voyelles [a] et [i]. Enfin, sur le do#3 et sur le mib3, il a été demandé à la chanteuse de produire des sons en voix mixte.

- Il a ensuite été demandé de chanter une phrase musicale dans la zone de voix mixte, d'abord pianissimo, puis mezzo-piano, mezzo-forte et forte. La phrase couvre un demi ton, mib3 - ré3, les paroles sont "fra le tenebre". Elle est donnée figure 3.1.
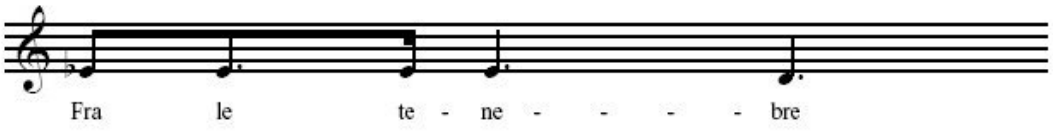
FIG. 3.1 – *Phrase musicale chantée par S.*

La chanteuse a ensuite repris cette phrase en effectuant des passages de mécanismes au milieu de la phrase.

Les crescendos et decrescendos sur les notes tenues nous permettent de déterminer la dynamique vocale de la chanteuse.

Cet enregistrement a été effectué au Laboratoire d'Acoustique Musicale avant le début de mon stage, et a donc constitué une première base de données disponible immédiatement.

3.3.2 Enregistrements de CT

Deux enregistrements ont été effectués avec CT. Le premier avait pour but d'établir son phonétogramme par mécanisme laryngé. Le second était plus orienté sur la voix mixte.

Constitution du phonétogramme

Pour établir le phonétogramme, nous avons demandé au chanteur d'effectuer, sur chaque note demandée, dans un premier temps un son tenu, d'intensité que nous qualifierons de "confortable" pour le chanteur. Nous lui avons ensuite demandé d'effectuer un crescendo et un decrescendo, pour qu'il explore toute sa dynamique en intensité.

L'ensemble de ces enregistrements a été effectué sur la voyelle [a]. L'étendue fréquentielle couverte va du sol1 au ré3 en mécanisme M1 et du solb2 au sib3 pour le mécanisme M2. Nous avons effectué un enregistrement sur chaque note de la gamme chromatique (sur toutes les notes, demi-ton par demi-ton). Le chanteur a confirmé lui même qu'il était capable de chanter plus haut et plus bas dans les deux mécanismes, mais ces zones additionnelles ne concernent pas la voix mixte, et sont donc d'un intérêt secondaire dans le cadre de cette étude.

Enregistrement de mixte

L'objectif de cette seconde séance était d'effectuer des enregistrements de voix mixte, en essayant de les replacer dans un contexte musical. Nous avons donc demandé au chanteur de choisir une phrase musicale sur laquelle il avait envie et se sentait à l'aise de faire de la voix mixte. La phrase choisie est représentée figure 3.2.
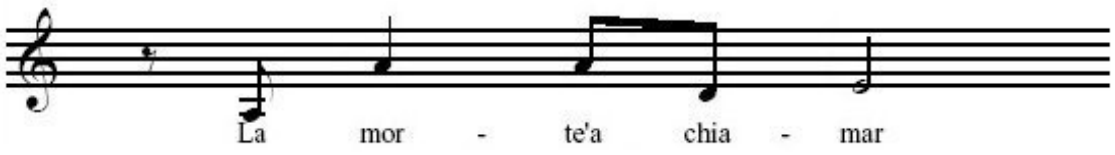
FIG. 3.2 – *Phrase musicale choisie par CT lors de la séance d'enregistrement.*

Nous avons à chaque fois pris soin de demander au chanteur sur quelle note il avait chanté en voix mixte pour n'avoir aucun risque d'ambiguïté. De manière générale, la voix mixte ne concernait que les trois notes les plus graves, la note la plus aiguë étant toujours en mécanisme M2 "franc". Cette phrase avait de plus la grande qualité d'être composée en grande partie

de [a], notamment les trois notes graves sur lesquelles CT a chanté en voix mixte étaient sur cette voyelle, ce qui nous a permis ensuite de comparer les paramètres glottiques et acoustiques mesurés ici avec ceux du premier enregistrement.

Nous avons proposé au chanteur d'effectuer le nombre d'essais qu'il voulait, en nous indiquant lequel il trouvait le plus réussi. Nous avons ensuite demandé à CT, à la suite de sa phrase musicale, de chanter une note tenue en voix mixte, sur la voyelle [a], puis sur la voyelle [i], la note choisie devant être l'une de celles de la phrase. Le but, encore une fois, est d'essayer d'inscrire l'émission de voix mixte dans un contexte musical plus favorable à ce registre.

Ce protocole a été répété sur trois notes de départ, en mécanisme M2, puis en mécanisme M1. Comme nous le verrons plus tard, ce chanteur perçoit distinctement le mécanisme qu'il utilise, et a effectué lui-même une recherche sur le sujet dans le cadre de sa scolarité au CNSM [9].

Enfin, nous avons demandé à CT d'effectuer des crescendos du mixte 2 vers le mécanisme M2, et des decrescendos du mixte 1 vers le mécanisme M1, sur plusieurs notes de départ. Pour finir, CT a effectué plusieurs glissandos, effectués d'abord en mécanisme M2, puis en mécanisme M1. Nous avons demandé à CT de rester en voix mixte, ou de nous signaler à quel moment il sortait du registre étudié.

3.3.3 Séance d'écoute

Les premiers travaux effectués sur les enregistrements du phonétogramme de CT nous ont montré que le chanteur avait utilisé la voix mixte lors de certaines prises. CT a aimablement accepté de revenir au laboratoire pour effectuer une séance d'écoute de cette base de données, pour qu'il nous dise, ce qui, selon lui, était du mixte et ce qui n'en était pas.

Nous avons donc repris l'ensemble des données enregistrées au cours de la première séance effectuée avec lui, que nous avons placé dans un ordre aléatoire. Le but était notamment d'éviter un ordre prédéfini, dont le chanteur aurait pu se servir pour comparer les données entre elles. Nous avons donc demandé au chanteur de caractériser chaque donnée, en terme de mécanisme laryngé, et en terme de registre (est-ce du mixte ou non?). Cette séance a également permis au chanteur de nous expliquer sa propre conception de la voix mixte, ainsi que les sensations et les gestes laryngés auxquels il la reliait. Qu'il soit ici à nouveau remercié pour sa très grande disponibilité.

Chapitre 4

Résultats et discussion

Dans cette partie nous développons les résultats des traitements de la base de donnée enregistrée. Une étude préalable sera menée sur chacun des chanteurs pour établir les caractéristiques des paramètres étudiés pour les mécanismes M1 et M2. Ensuite, une première étude du quotient ouvert en voix mixte nous permettra de confirmer le fait que la voix mixte est émise dans l'un ou l'autre des mécanismes. Nous placerons ensuite la zone de voix mixte sur le phonétogramme, puis nous chercherons à caractériser les voix mixtes par rapport aux mécanismes laryngés, pour déterminer si la voix mixte est le résultat d'une modification de la configuration vibratoire laryngée ou si elle correspond plutôt à un ensemble d'ajustements résonantiels.

Dans un premier temps, nous nous sommes restreint à l'étude des données enregistrés sur la voyelle [a]. Lorsque la voyelle n'est pas précisée, c'est donc cette voyelle qui a été utilisée.

4.1 Caractéristiques des mécanismes laryngés M1 et M2 chez les deux sujets

Nous cherchons donc ici à déterminer comment varie le quotient ouvert en fonction de l'intensité et de la fréquence fondamentale.

Avant tout étude, il est nécessaire de noter que, chez tous les chanteurs, l'intensité est fortement corrélée à la fréquence fondamentale. En effet, plus un son est aigu, plus il est facile de le chanter fortissimo; et plus il est grave, il est facile de le chanter pianissimo. La forme du phonétogramme présenté figure 2.6 confirme tout à fait cette hypothèse.

Par ailleurs, il faut également prendre en considération que les données ont été enregistrées dans le but d'étudier la voix mixte, elles ne couvrent donc pas la totalité de l'étendue vocale. En conséquence, les relations entre fréquence et quotient ouvert ne sont valables que dans le domaine étudié, et ne sont pas nécessairement généralisables à la totalité de la tessiture du chanteur.

4.1.1 Etude des productions de CT

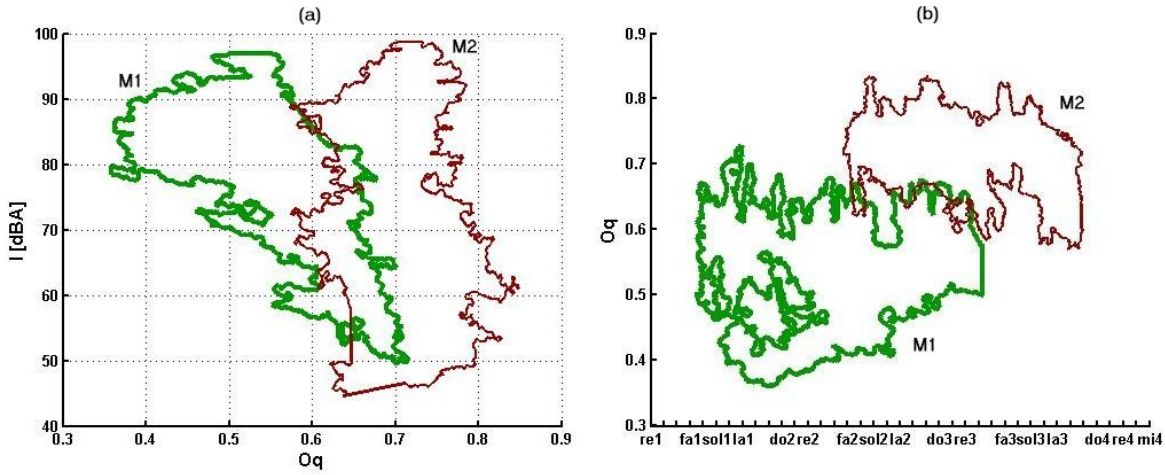

FIG. 4.1 – *Diagrammes de variations de l'intensité en fonction du quotient ouvert (a), et du quotient ouvert en fonction de la hauteur (b). Le mécanisme M1 correspond à la zone délimitée par le trait gras vert, et le M2 par le trait fin rouge. Chanteur: CT.*

La figure 4.1 représente les domaines de variations de l'intensité en fonction du quotient ouvert, et du quotient ouvert en fonction de la hauteur. Le diagramme (a) montre clairement que pour CT, le quotient ouvert semble fortement corrélé à l'intensité en mécanisme M1. Le quotient ouvert varie en effet de 0.7 à 50 dBA à moins de 0.4 pour 85 dBA. Les variations du quotient ouvert sont donc conformes à la tendance générale notée en 2.5.2. Nous pouvons constater des valeurs de quotient ouvert particulièrement faibles entre 80 et 90 dBA. Ce domaine correspond à un certain nombres de données, de fréquence grave (sol1 - do2), fortissimo. Nous les retrouvons le diagramme (b).

Il semblerait donc y avoir également une influence de la hauteur de la note chantée, ce qui expliquerait la très grande plage de quotient ouvert disponible entre 80 et 90 dBA. Cependant, cette influence ne concerne que les notes graves et fortissimo, donc ne concerne pas le domaine dans lequel le chanteur est susceptible de chanter le voix mixte (comme nous le verrons dans la partie suivante). Dans le domaine de mixte, nous pouvons donc considérer que le quotient ouvert est inversement corrélé à l'intensité et est indépendant de la hauteur.

En mécanisme M2, cette fois ci, le quotient ouvert ne semble pas dépendre de l'intensité, puisque il reste compris entre 0.6 et 0.8 (environ) sur tout le domaine d'intensité étudié. L'étude du quotient ouvert en fonction de la fréquence montre également une très faible interdépendance de ces deux paramètres sur la tessiture étudiée.

Les coefficients de corrélation totale et partielle ont été déterminés pour l'ensemble des productions de CT. Ils sont présentés dans le tableau 4.1. La corrélation partielle permet de tenir

compte d'éventuelles dépendances d'autres paramètres. Par exemple, la fréquence fondamentale est fortement corrélée à l'intensité. Il serait lors imprudent de calculer un coefficient de corrélation entre le quotient ouvert et la fréquence fondamentale sans en tenir compte... Par ailleurs, et compte tenu du nombre de points étudiés, une corrélation forte correspond à une valeur supérieure à 0,7.

	f0 - IdbA	IdbA - Oq	f0 - Oq
M1	0.42 (0.73)	-0.57 (-0.78)	0.26 (0.68)
M2	0.42 (0.39)	-0.17 (-0.06)	-0.28 (-0.23)

TAB. 4.1 – *Coefficients de corrélation totale (partielle) pour CT.*

En mécanisme M1, nous noterons une corrélation forte entre le hauteur et l'intensité d'une part, et entre le quotient ouvert et l'intensité d'autre part. Nous ne retiendrons pas de corrélation forte en mécanisme M2, mais remarquerons cependant que le quotient ouvert semble davantage corrélé à la fréquence qu'à l'intensité.

4.1.2 Etudes des productions de S

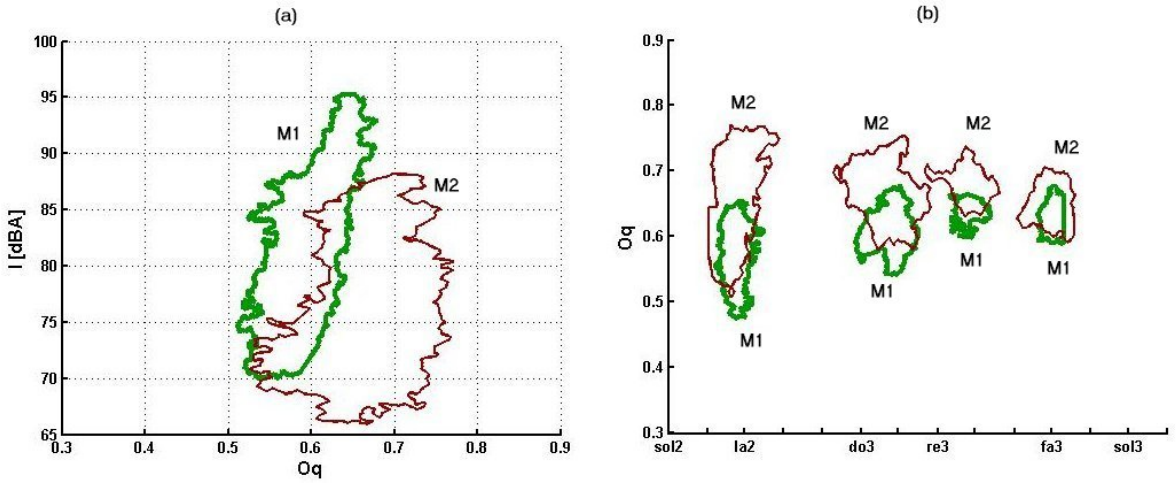

FIG. 4.2 – *Diagrammes de variations de l'intensité en fonction du quotient ouvert (a), et du quotient ouvert en fonction de la hauteur (b). Le mécanisme M1 correspond à la zone délimitée par le trait gras vert, et le M2 par le trait fin rouge. La forme du graphique (b) vient du protocole utilisé: nous n'avons demandé à S de ne chanteur que sur quatre notes, qui correspondent aux quatres zones clairement identifiables. Chanteur: S.*

La soprano a quant à elle révélé des variations de quotient ouvert tout à fait atypiques. En particulier, nous constatons que le quotient ouvert semble corrélé à l'intensité, mais cette

corrélation est positive, contrairement au cas général. Mais l'étude de données au cas par cas montre une dépendance plus étrange encore: la figure 4.3 représente un crescendo effectué par S en mécanisme M1. Elle montre clairement que en dessous de 70 dBA, le quotient ouvert serait inversement corrélé à l'intensité, puis normalement corrélé de 70 à 80 dBA, puis constant pour des intensité supérieures à 80 dBA.

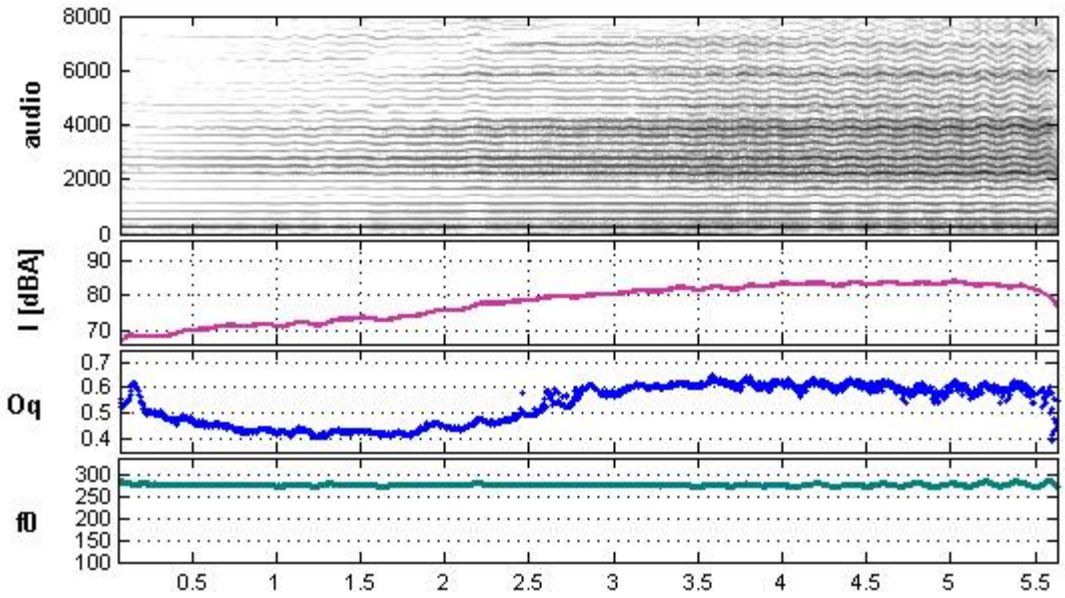

FIG. 4.3 – *Crescendo sur la note do#3, voyelle: [i], effectuée par S, en mécanisme M1.*

	f0 - IdbA	IdbA - Oq	f0 - Oq
M1	0.65 (0.40)	0.71 (0.54)	0.58 (0.22)
M2	0.59 (0.66)	0.18 (0.41)	-0.22 (-0.42)

TAB. 4.2 – *Coefficients de corrélation totale (partielle) pour S.*

Les calculs des coefficients de corrélation partielle ne révèlent pas de corrélation forte. Nous retiendrons que l'influence la plus forte exercée est le quotient ouvert vient de l'intensité en mécanisme M1, comme nous l'avons constaté ci-dessus. Aucune tendance notable ne se dégage en mécanisme M2.

4.2 Un mixte, des mixtes... Etude du quotient ouvert et de l'intensité.

Nous cherchons dans cette section à confirmer que la voix mixte n'est pas un mélange de mécanismes, mais qu'elle est émise soit en mécanisme M1, soit en mécanisme M2.

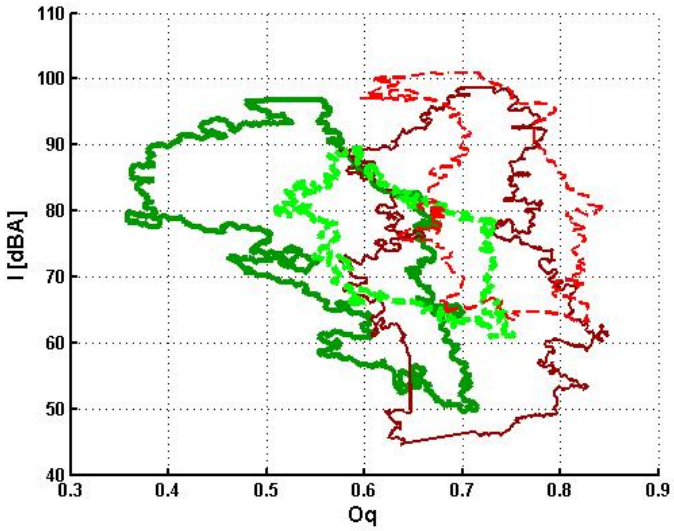

FIG. 4.4 – *Graphique représentant l'intensité en fonction du quotient ouvert, et en distinguant les mécanismes et la voix mixte. En gros trait vert : le mécanisme M1, et petit trait rouge, le mécanisme M2. En pointillées, la voix mixte, qui est séparable en deux zones: l'une située dans le domaine du mécanisme M1, l'autre dans celui du mécanisme M2. Chanteur: CT.*

Le graphique 4.4 correspond à celui présenté en 4.1 (figure (a)), auquel nous avons rajouté les émissions de voix mixte. Nous constatons que la voix mixte peut se diviser en deux zones distinguables, l'une se trouvant essentiellement dans le domaine du mécanisme M1, l'autre dans celui du mécanisme M2. Cette constatation confirme que la voix mixte ne serait pas un cinquième mécanisme laryngé.

Nous pouvons également constater que les deux zones de mixte se rejoignent, et que la zone correspondant au mixte de mécanisme M1 déborde largement sur celle de mécanisme M2. Il s'agit effectivement de quotients ouverts très élevés pour du mécanisme M1, qui correspondent à des phases d'attaques "très prolongées" (jusqu'à 500 ms), marquées par un haut quotient ouvert au départ, qui décroît pour atteindre une valeur de 0.6 environ (qui varie légèrement d'une donnée à l'autre), et qui se situe nettement dans la zone de mécanisme M1. Il semblerait donc que ce débordement soit plutôt une caractéristique du mixte émis en mécanisme M1, ce qui sera développé dans la partie 4.4.

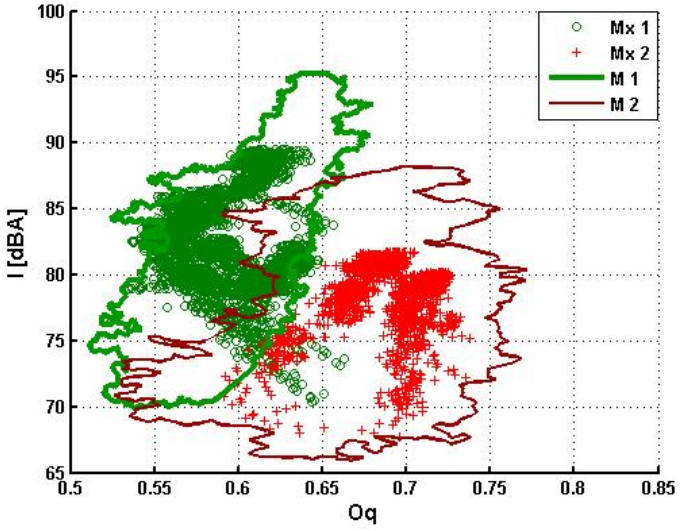

FIG. 4.5 – *Graphique représentant l'intensité en fonction du quotient ouvert, et en distinguant les mécanismes et la voix mixte. En gros trait (vert) : le mécanisme M1, et trait fin (rouge), le mécanisme M2. Les points correspondent à la voix mixte. Chanteur: S.*

Une étude similaire peut être effectuée à partir des données de S. Sur la figure 4.5 nous avons choisi de faire figurer la voix mixte sous forme de points et non sous forme de zones (comme sur la figure 4.4) car des zones risquaient d'être très peu représentatives du fait du faible nombre de points. Nous ne prétendons donc pas ici délimiter une zone correspondant à la voix mixte, mais nous cherchons plutôt à localiser les émissions de voix mixte dans le diagramme.

Nous constatons alors également que les enregistrements de voix mixte peuvent être divisés en deux nuages de points distincts, l'un inscrit dans la zone de mécanisme M1 et l'autre dans celle de mécanisme M2, ce qui, dans ce cas aussi, corrobore l'hypothèse selon laquelle la voix mixte n'est pas un mécanisme supplémentaire, ni un mélange de mécanismes.

La lecture des graphiques 4.4 et 4.5 positionne les productions de voix mixte sur les diagrammes représentant l'intensité en fonction du quotient ouvert et nous permet de confirmer que la voix mixte est émise soit en mécanisme M1, soit en mécanisme M2. Dans la suite de cet exposé, nous parlerons en conséquence de mixte 1 (Mx1) et de mixte 2 (Mx2).

4.3 Nuances d'intensité et voix mixtes

Nous allons à présent chercher à situer plus précisément la voix mixte au niveau du phonétogramme. Les deux enregistrements de CT ont été effectués dans ce but précis, nous nous appuierons donc sur ces résultats.

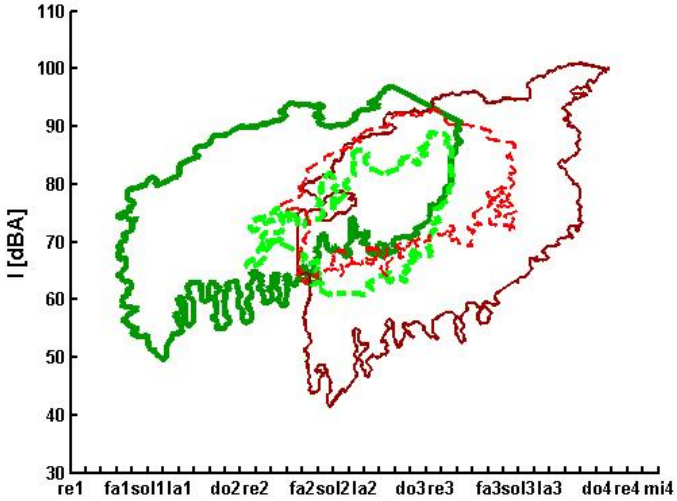

FIG. 4.6 – *Phonétogramme par mécanisme laryngé de CT. mécanisme M1: gros trait vert. mécanisme M2: trait fin rouge. Voix mixte: pointillés.*

Tout d'abord, nous constatons que les deux zones de mixte se superposent presque parfaitement. Cela signifie qu'**un son de voix mixte de même intensité et de même fréquence peut être généré selon deux stratégies différentes, soit en mixte 1, soit en mixte 2**. Cette constatation est vraisemblablement entre autres à l'origine de la confusion portant sur la nature vibratoire de la voix mixte. Qui plus est, **la voix mixte se situe presque exactement à l'intersection des domaines des mécanismes laryngés M1 et M2**. D'un point de vue plus musical, cette constatation est parfaitement cohérente: si la voix mixte vise à obtenir un dégradé de timbre lors du passage de mécanismes, il parait logique que le chanteur le fasse dans une zone où il peut librement choisir le mécanisme qu'il utilise.

Lors de la séance d'écoute, CT nous a expliqué quelle était sa conception de la voix mixte. Pour lui, le mixte 1 a pour but, soit:

- de préparer un passage du mécanisme M1 au M2,
- de rester en mécanisme M1, tout en imitant le M2.

Il en est de même avec le mixte 2 vis à vis du mécanisme M1. L'imitation d'un mécanisme laryngé ne peut être pertinent que dans la mesure où les paramètres directement perceptibles (donc ici, la fréquence fondamentale et l'intensité) correspondent à ceux du mécanisme imité, ce qui est le cas à la vue de la figure 4.6.

Nous pouvons cependant constater que la zone de mixte 2 s'étend notablement au delà de la limite supérieure (d'un point de vue fréquentiel) du mécanisme M1. Ce fait est vraisemblablement à mettre en rapport avec les caractéristiques du chanteur. Etant contre-ténor, il est amené

à beaucoup chanter en mécanisme M2, ce qui l'a vraisemblablement amené à plus travailler son mixte 2 que son mixte 1, ou bien ce qui l'amène à plus utiliser son mixte 2 que son mixte 1.

4.4 Caractérisation du mixte 1 par rapport au mécanisme M1

4.4.1 Résultats établis

Les résultats précédemment cités nous permettent déjà de faire état des remarques suivantes:

- le mixte 1 se situe dans la zone pianissimo du mécanisme M1 pour le domaine fréquentiel concerné (cf. figure 4.6).
- les quotients ouverts des sons de mixte 1 sont globalement plus élevés que ceux de mécanisme M1 (cf. figure 4.4).

Nous commencerons par remarquer que les valeurs élevées de quotient ouvert ne permettent pas de différencier nettement le mixte 1 du mécanisme M1. En effet, comme nous l'avons noté, le mixte 1 correspond à la zone de faible intensité du mécanisme M1, qui, comme nous l'avons vu en 4.1.1, est justement marqué par un quotient ouvert élevé chez ce chanteur. Cependant la relation entre le quotient ouvert et l'intensité doit être précisée et comparée entre le mixte 1 et le mécanisme M1.

4.4.2 Etudes de decrescendos de mécanismes M1

Lors de la première séance d'enregistrement effectuée avec CT, nous avons enregistré des decrescendos de mécanismes M1. Lors de la séance d'écoute, le chanteur nous a indiqué les parties qu'il qualifie de mixte 1. Un exemple est donnée figure 4.7.

Nous constatons que de 0 à 2 s environ, l'intensité reste constante, le chanteur est en mécanisme M1 "franc". Puis, il commence à diminuer d'intensité au moment où il passe en mixte 1, ce qui est perceptible par une fine modification du timbre. On peut donc considérer que sur cette note (sib2), le chanteur a très peu de champ de liberté en mécanisme M1 franc, et qu'il est donc obligé de chanter en voix mixte pour diminuer d'intensité.

Nous pouvons également constater que le passage en mixte 1 s'accompagne de l'apparition d'un dédoublement de pic, qui, d'abord de même amplitude que le premier dédoublement, décroit d'amplitude (en vert sur la figure 4.7). environ 700 ms avant le passage en mécanisme M2, un dédoublement supplémentaire apparaît.

Nous pouvons également noter une légère augmentation de quotient ouvert, à mettre en relation avec la baisse d'intensité (les deux sont fortement corrélés en mécanisme M1 chez CT).

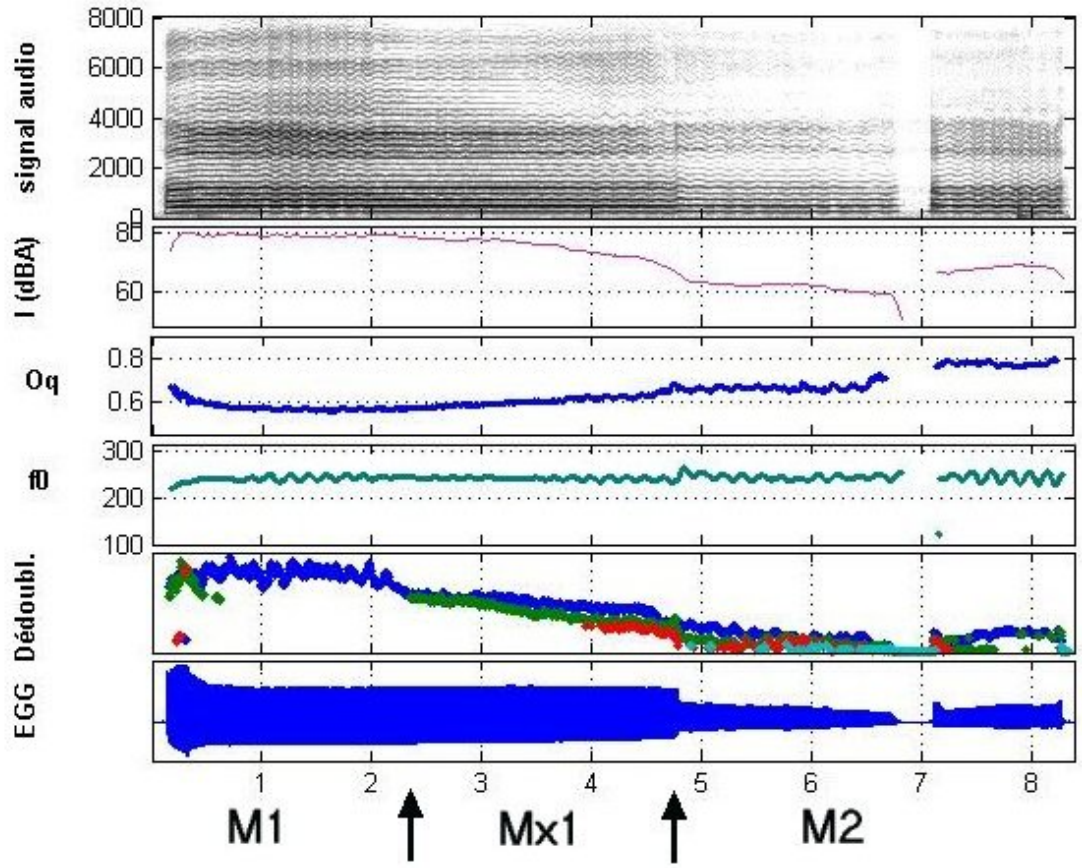

FIG. 4.7 – *Decrescendo effectué en mécanisme M1. La partie située avant le passage en mécanisme M2, correspond à du mixte 1. La hauteur correspond à un sib2.*

Nous avons comparé la configuration de dédoublements de pics observée avec d'autres constatés lors de la séance d'enregistrement de mixte. Pour cela nous avons étudié trois sons tenus sur un do3 (donc un ton plus haut), et la voyelle [a]. Le chanteur a effectué trois essais. Sur ces trois, il nous a spontanément avoué avoir mieux réussi le dernier. Or l'étude du signal DEGG montre que celui-ci n'est marqué par des dédoublements de pics que pour le mixte 1 le plus réussi. Peut être pouvons-nous donc noter un parallèle entre le mixte 1 et les dédoublements, en tout cas pour des sons émis sur la voyelle [a].

4.4.3 Le mixte 1 en contexte musical

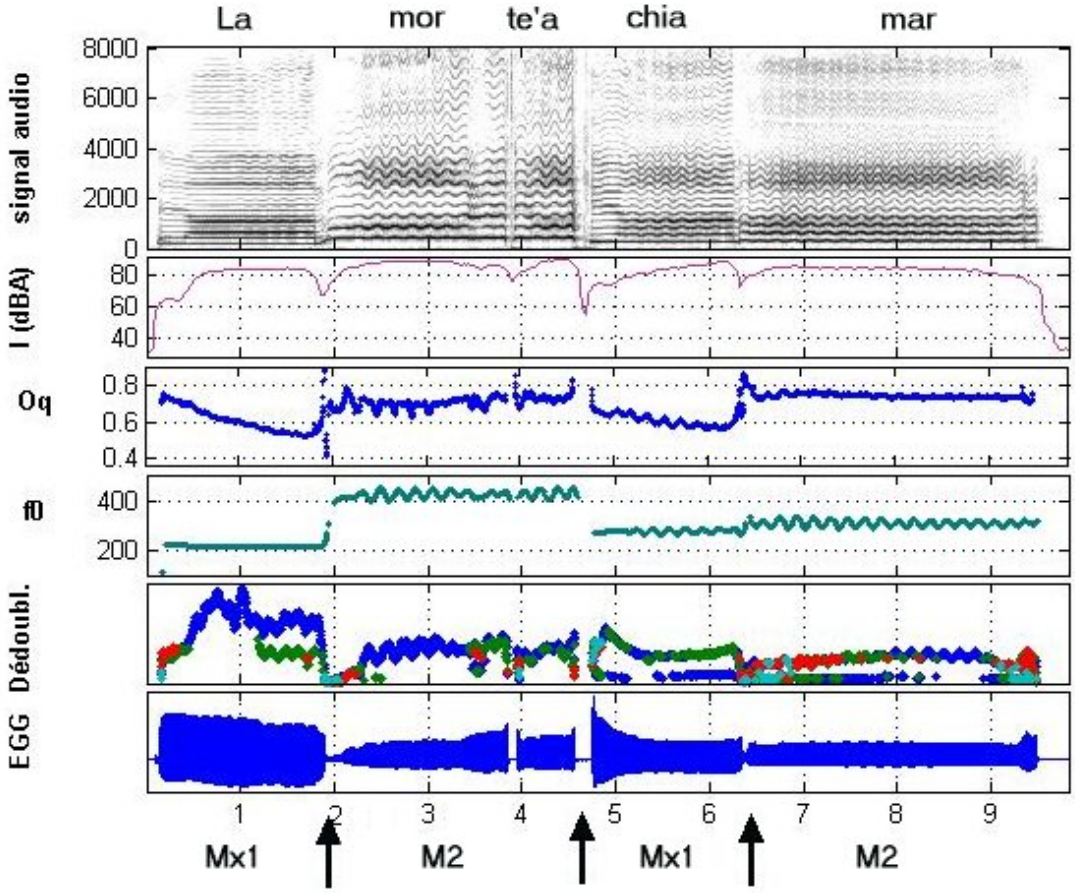

FIG. 4.8 – *Phrase musicale effectuée par CT, en partant du la2. Les deux notes les plus graves ont été effectuées en mixte 1.*

La figure 4.8 correspond à la phrase musicale choisie par CT. Les deux notes les plus graves ont été effectuées en mixte 1, ce que nous confirme l'importante variation de quotient ouvert entre les deux mécanismes étudiés. Nous pouvons remarquer que ces émissions de mixte 1 ne sont pas toujours marquées par des dédoublements de pics comme nous l'avons observé

précédemment sur la seconde note: nous en retrouvons sur la fin de la première note (su le "la" de "la morte", mais il n'y en a aucun sur la troisième note (le "chia" de "chiamar"), qui est pourtant aussi anoncée en mixte 1. Cette absence des dédoublements peut être généralisée à plusieurs enregistrements effectués. Nous considèrerons donc que la présence des doubles pics n'est pas systématique en mixte 1.

Intéressons nous à présent au quotient ouvert. Nous constatons, pour la première note, que la courbe n'est pas stable. Elle décroît de 0,7 à 0,5 environ, ce qui représente une variation très importante. De telles variations ont été observées sur tous les enregistrements effectuées lors de cette session, sur la première note de la phrase musicale, et en mixte 1. Elles expliquent le fait que le domaine de quotient ouvert du mixte 1 s'étend sur celui du mécanisme M2 sur le diagramme représentant l'intensité en fonction du quotient ouvert (figure 4.4). Cette diminution lente de quotient ouvert est vraisemblablement à mettre en relation avec une adaptation progressive du geste vocal pour obtenir la qualité souhaitée. Il est cependant intéressant de constater que le quotient ouvert diminue alors que l'intensité reste constante, c'est le cas sur la première note de $t = 0{,}7$ à $t = 1{,}8s$.

Nous n'avons pas effectué de test perceptif dans le cadre de ce travail. Cependant, la différence entre le mixte 1 et des sons de mécanisme M1 piano (qui ne sont à priori pas considérés comme du mixte 1) semble très faible. Cette donnée avait déjà été étudiée par Castellengo et Roubeau (mais non publiée), et CT nous l'avait également mentionné lors de la séance d'écoute: selon lui, les deux critères principaux permettant de qualifier un son de mixte 1, sont la hauteur et l'intensité (nous avons par exemple pu entendre à propos d'un son piano de mécanisme M1: "si c'était plus aigu, ça serait du mixte 1..."). Nous conclurons donc quant au mixte 1 que les paramètres étudiés ne nous ont pas permis d'établir clairement de différence entre le mixte 1 et le mécanisme M1 piano. Il est cependant possible que le chanteur associe le mixte 1 à certaines sensations et certaines actions laryngées que nous n'avons pas pu objectiver et qui peuvent avoir pour conséquence les doubles pics observés dans certains cas.

4.5 Caractérisation du mixte 2 par rapport au mécanisme M2

4.5.1 Résultats établis

Les figures 4.4 et 4.6 nous permettent d'affirmer que:

- le mixte 2 se situe dans la zone mezzo-forte à forte du mécanisme M2 pour le domaine fréquentiel concerné.
- les quotients ouverts des sons de mixte 2 sont situés dans la zone supérieure du mécanisme M2.

Nous cherchons désormais à déterminer si le mixte 2 est "simplement" un son de mécanisme M2 fortissimo. Pour cela, nous commencerons par comparer deux extraits de la phrase musicale "la morte a chiamar". L'un est en mixte 2, l'autre en mécanisme M2 franc. Les hauteurs sont identiques d'une donnée à l'autre, et les intensités sont également les mêmes. Une représentation

de ces deux sons est donnée figure 4.9. L'écoute de ces deux sons révèle une différence très importante d'un point de vue perceptif, ce qui est nettement visualisable sur le sonagramme: nous pouvons en effet noter un net renforcement des harmoniques aiguës, au niveau du formant du chanteur (entre 2500 et 3500 Hz), ainsi que au dessus de 5000 Hz.

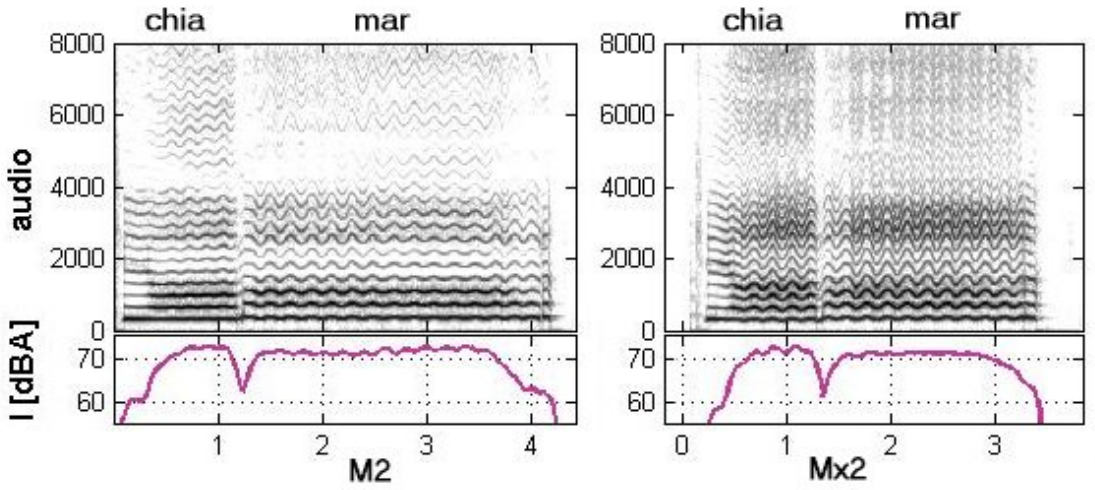

FIG. 4.9 – *Comparaison du mixte 2 et du mécanisme M2, à même hauteur (mi3 - fa#3) et intensité. Chanteur: CT. L'extrait correspond à la fin de la phrase musicale (les deux dernières notes).*

Cette constatation nous indique qu'il y a nécessairement une différence entre le mécanisme M2 fortissimo et le mixte 2. Nous cherchons donc à caractériser cette différence. Pour cela, nous effectuons, comme précédemment pour le mixte 1, une étude sur des glissandos et crescendos/decrescendos, qui sera confrontée à des résultats obtenus à partir d'une étude en contexte musical.

4.5.2 Etude de crescendos et decrescendos

Les données étudiées ici correspondent à des passages de mixte 2 au mécanisme M2 franc, ou l'inverse, par variation de l'intensité du signal. Un exemple est donné figure 4.10.

Le signal acoustique est marqué par une modification de timbre subite, à t = 3,8 s. Elle s'accompagne d'un léger saut de fréquence qui nous fait douter de ce que dit le chanteur car il fait fortement penser à un passage de mécanisme; ainsi que l'une légère diminution de l'enveloppe de l'EGG, qui est cependant assez progressive dans la mesure où elle s'effectue en 350 ms.

Peu d'études ont porté sur l'enveloppe de l'EGG. Nous avons donc cherché à caractériser la dépendance entre l'enveloppe de l'EGG et l'intensité (en mécanisme M2 au moins). Les résultats sont présentés en annexe B. Ils semblent démontrer une dépendance importante de l'enveloppe

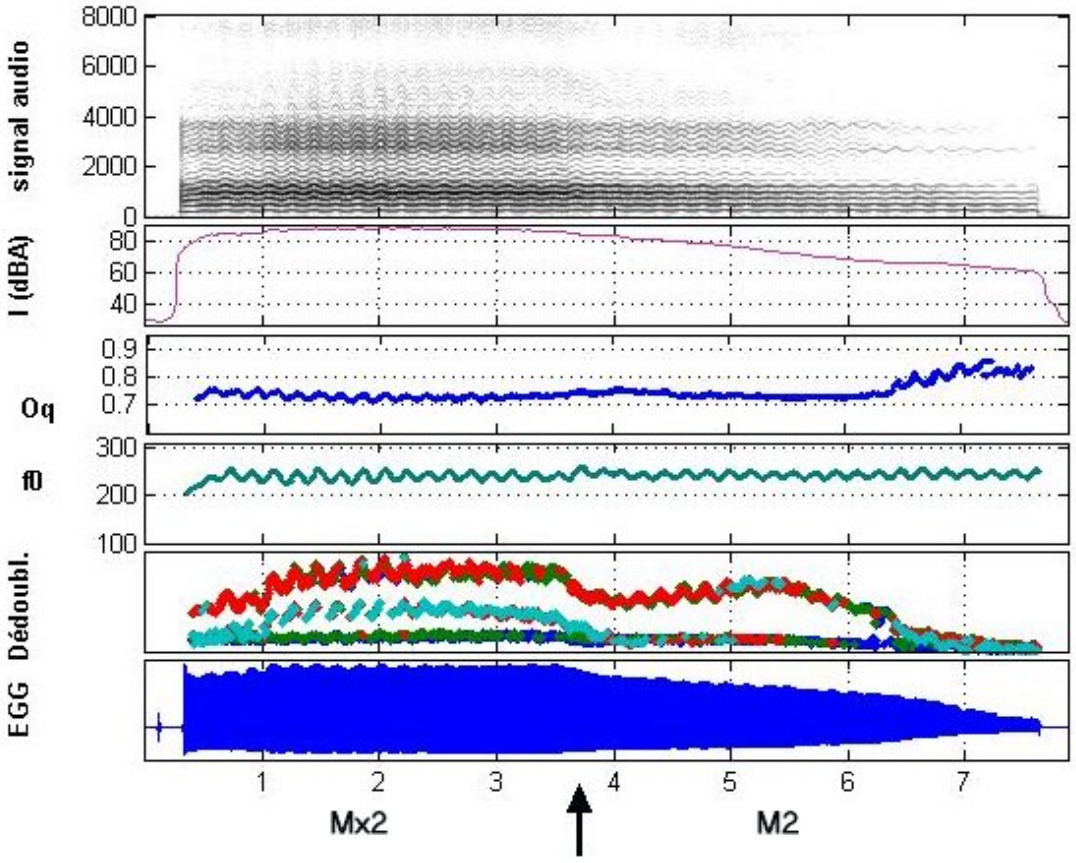

FIG. 4.10 – *Exemple de decrescendo effectué par CT, et marqué par un passage de mixte 2 à M2 franc, sur si2.*

de l'EGG vis à vis de l'intensité, mais surtout, ne nous permettent pas de distinguer le mixte 2 en terme d'amplitude du signal EGG.

4.5.3 Etude des dédoublements de pics

L'étude des dédoublements de pics révèle deux configurations très différentes entre le mixte 2 et le mécanisme M2 franc. Nous notons en effet la présence d'un dédoublement de pic, d'amplitude moitié par rapport à l'enveloppe du DEGG, qui diminue pour atteindre 0 puis disparaître lors du "passage" en mécanisme M2 franc. Ce dédoublement de pics se retrouve dans tous les decrescendos observés. Il est également visible sur les crescendos que nous avons étudiés, ainsi que lorsque les decrescendos ont été effectués sur la voyelle [i]. C'est également le cas pour la plupart des mixtes 2 chantés en contexte musical.

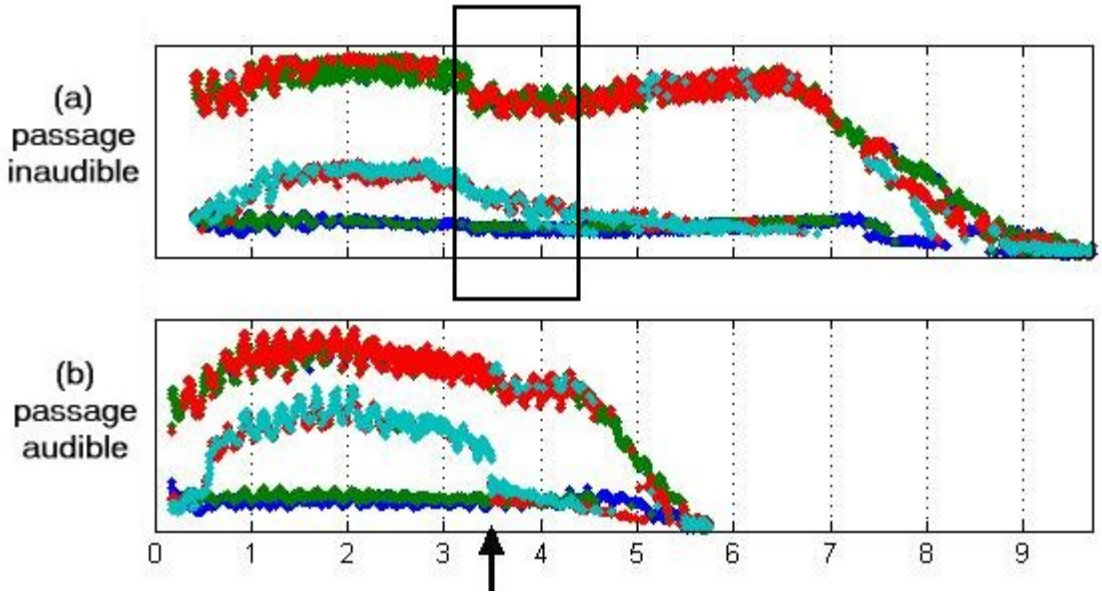

FIG. 4.11 – *Exemples de dédoublements de pics de deux decrescendos. Sur le premier, le pallier est caché. Sur le second il ne l'est pas.*

La variation brusque de timbre entre le mixte 2 et le mécanisme M2 est un phénomène que le chanteur est capable de masquer. La figure 4.11 représente l'évolution de la configuration des doubles pics au cours du temps. Dans un cas, le saut de fréquence associé à un détimbrage subit a été caché, dans l'autre cas, non. Nous pouvons constater que l'évolution du dédoublements de plus faible amplitude semble liée à la perception de cette transition entre le mixte 2 et le mécanisme M2 franc. Lorsque nous la percevons, le dédoublement chute brutalement d'amplitude, ce qui n'est pas le cas pour le second exemple. Nous en conclurons que le passage continu du mécanisme M2 au mixte 2 (et l'inverse) est lié à une modification laryngée, qui se traduit sur le signal DEGG par ce dédoublement. Pour autant, ces modifications ne semblent pas être assez franches pour s'apparenter à un passage de mécanisme.

4.5.4 Etude en contexte musical

La phrase musicale "la morte a chiamar" a été interprétée à la fois en mixte 2 et en mécanisme M2 franc, ce qui nous a permis d'effectuer des comparaisons entre les différents paramètres étudiés.

note		IdbA [dBA]	Oq	f0 [Hz]	
				moyenne	ecart type
si2	m2	78	0,74	238	2,2
	mx2	84	0,75	237	7,8
	mx2	83	0,77	233	12,1
	mx2	83	0,76	230	11,8
	mx2	82	0,76	225	12,8
ré3	m2	80	0,75	291	8,6
	m2	80	0,74	283	7,3
	m2	81	0,73	281	6,8
	mx2	80	0,73	280	12,3
	mx2	82	0,76	278	11,4
	mx2	81	0,76	270	10,7
mi3	m2	86	0,75	329	4,7
	mx2	88	0,77	320	18,2
	mx2	88	0,75	320	16,3
	mx2	88	0,76	316	20,6
	mx2	87	0,75	309	15,9
fa#3	m2	83	0,72	363	9,5
	mx2	83	0,73	361	10,9
	mx2	86	0,71	362	12,6
	mx2	86	0,73	352	21,2
	mx2	86	0,72	351	21,5

TAB. 4.3 – *Calculs effectués à partir de la phrase musicale chantée par CT, en terme d'intensité, de quotient ouvert, et de fréquence*

Ces résultats sont donnés tableau 4.3. Nous pouvons constater que:

- à même intensité et hauteur, les résultats ne nous permettent pas de distinguer le mixte 2 du mécanmise M2 franc en terme de quotient ouvert.
- le mixte 2 semble marqué par un vibrato de forte amplitude, ce qui se manifeste par un écart type de fréquence plus élevé en mixté 2 qu'en mécanisme M2. L'origine de ce vibrato n'a pas été déterminée. Il semble cependant être une caractéristique notable du mixte 2. Une illustration de ce vibrato peut être visualisable figure 4.9.

Rappelons que ces résultats ne sont valables que pour le chanteur CT.

4.5.5 Description des mouvements laryngés en mixte 2

Nous avons eu la possibilité, dans le cadre de ces études sur la voix mixte, de travailler sur un enregistrement de cinématographie ultra-rapide effectuée par Henrich. Le chanteur est également CT, qui effectue un passage du mécanisme M2 au mixte 2. De cet enregistrement nous avons extrait les images de deux périodes, l'une en mécanisme M2 franc, l'autre en mixte 2. Ces deux périodes sont respectivement présentées figures 4.12 et 4.13. Leur observation révèle des différences quant à la vibration des cordes vocales en mixte 2 par rapport à celles en mécanisme M2.

Constatons d'abord que l'épiglotte (situé en bas des photographies) est plus en avant en mixte 2 (il cache l'extrémité des cordes vocales). Cet avancement est nettement visualisable sur l'enregistrement vidéo, et s'effectue lors du passage en mixte 2.

Dans les deux cas, l'ouverture s'effectue de façon postéro-antérieure. En revanche, il semble que nous pouvons noter une légère différence au niveau de la fermeture: alors qu'elle est simultanée sur toute la longueur des cordes vocales en mixte 2 (comme le montre les figures 7 et 8), elle semble plutôt s'effectuer de façon postéro-antérieure en mécanisme M2 (c'est à dire du bas vers le haut sur les photographies).

Nous avons fait une analyse kymographique des données de mécanisme M2 et mixte 2 disponibles. Les résultats sont présentés figure 4.14. Les losanges noirs correspondent à la phase ouverte. Leur largeur maximale définit le temps d'ouverture glottique (au niveau de la corde vocale étudié), et la hauteur l'ouverture glottique, donc la distance entre les deux cordes vocales.

Nous pouvons constater que la hauteur des losanges noirs est plus importante en mixte 2 que en mécanisme M2 franc, ce qui indique donc que les cordes vocales s'éloignent plus en mixte 2 qu'en mécanisme M2.

4.5.6 Le mixte 2: un autre mécanisme laryngé?

Nous avons donc constaté plusieurs similarités et des différences entre le mixte 2 et le mécanisme M2: d'abord, les quotients ouverts mesurés sont très semblables, et les analyses d'enveloppes du signal EGG ne permettent pas de les distinguer. Cependant, le passage continu de l'un à l'autre est effectué par CT avec un léger saut de fréquence, caractéristique d'un passage de mécanisme, et les analyses de cinématographies ultra-rapide et kymographiques révèlent quelques différences physiologiques mentionnées ci-dessus.

Soulignons ici que ces différences observées restent mineures par rapport à celles différenciant par exemple les mécanismes M1 et M2. Notamment, le muscle vocal semble bien découplé des couches supérieures en mixte 2, comme en mécanisme M2. Par ailleurs, nous avons basé notre étude sur un très petit nombre d'enregistrements de cinématographie ultra-rapide, donc les différences observées doivent être validées par une étude de plus grande envergure pour affirmer que ces différences permettent de caractériser le mixte 2 par rapport au mécanisme M2. Enfin, le passage continu du mécanisme M2 au mixte 2 est effectué sans changement net de l'enveloppe

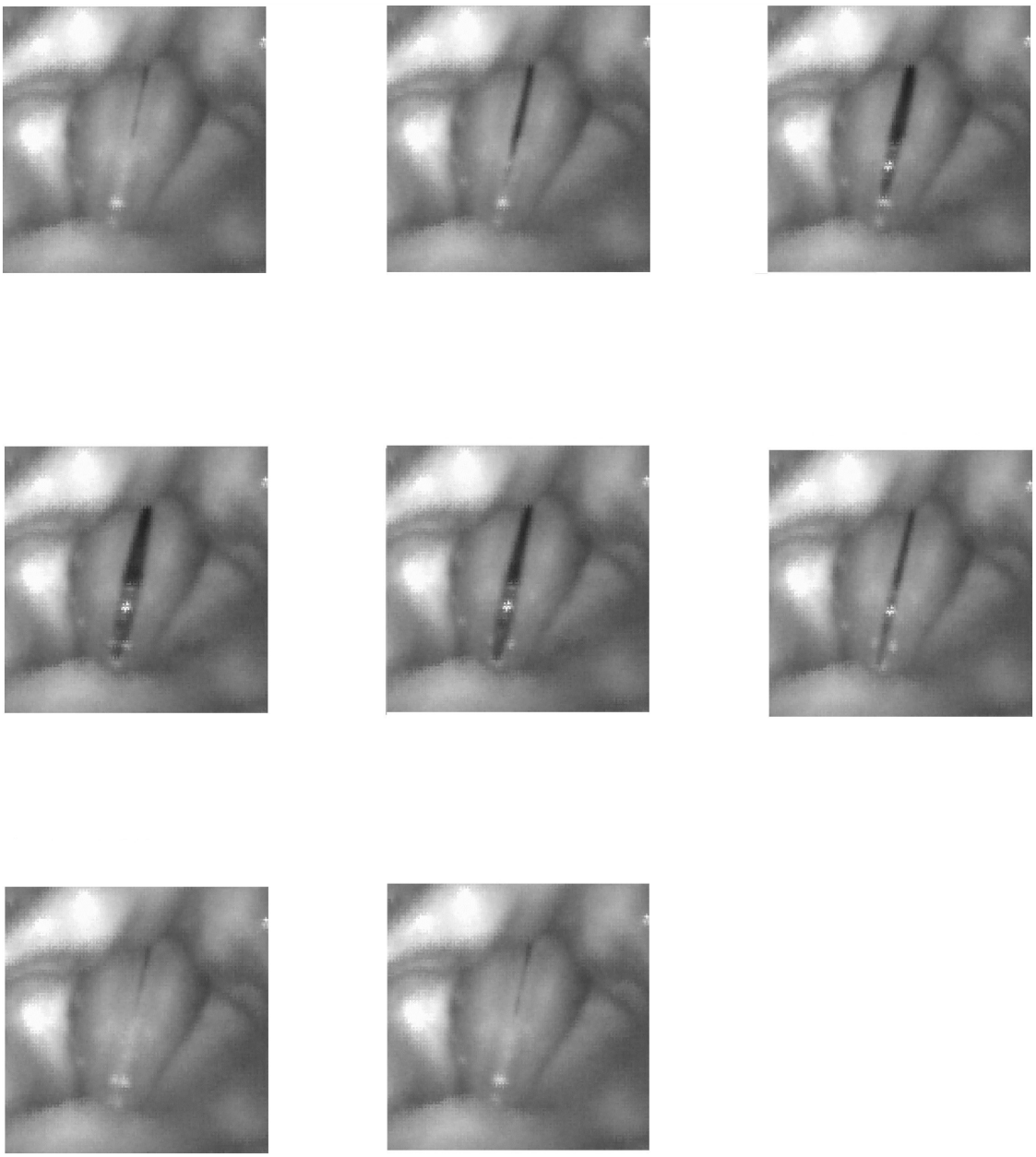

FIG. 4.12 – *Une période observée par cinématographie ultra-rapide. mécanisme M2 (franc).*

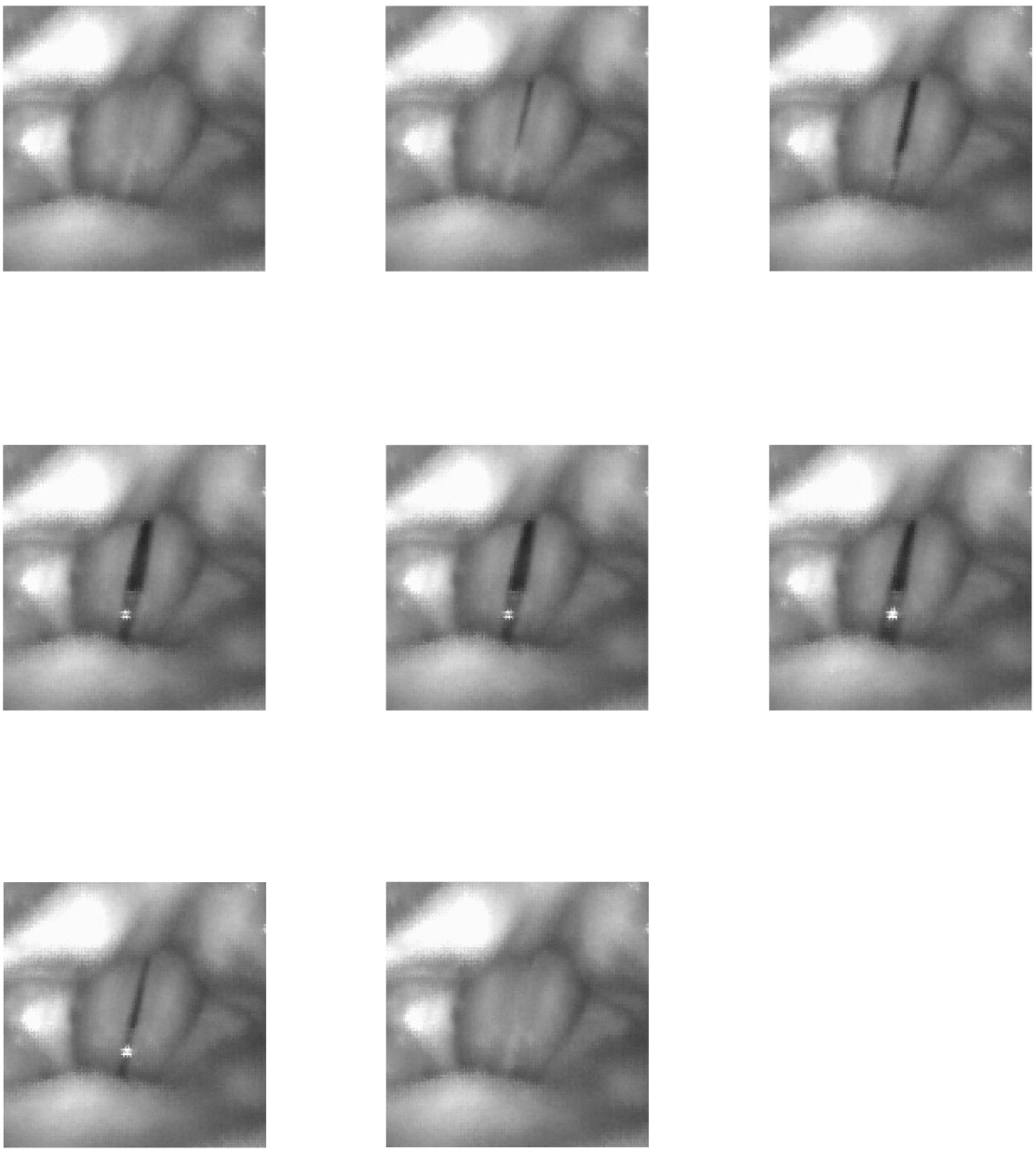

FIG. 4.13 – *Une période observée par cinématographie ultra-rapide. L'émission est en mixte 2.*

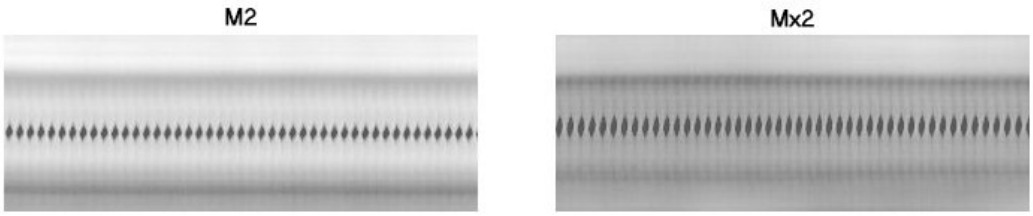

FIG. 4.14 – *Comparaison kymographique du mécanisme M2 avec le mixte 2. En abscisses: le temps. En ordonnées: la visualisation en coupe du larynx.*

du signal EGG. Le mixte 2 fait bien partie du mécanisme 2. Nous n'avons cependant pas d'explication à apporter quant au saut de fréquence dans l'état d'avancement des recherches.

Conclusion

Dans un premier temps, nous avons vérifié que la voix mixte était émise en mécanisme M1 ou en mécanisme M2, ce qui nous a conduit à distinguer le mixte 1 du mixte 2. En considérant les paramètres glottiques étudiés, nous avons constaté que le mixte 1 est émis avec un quotient ouvert correspondant à des valeurs de mécanisme M1 pianissimo, et le mixte 2 à des valeurs de mécanisme M2. En plaçant les données de mixtes sur le phonétogramme par mécanisme laryngé, nous avons constaté que la voix mixte correspondait à un registre situé à l'intersection des mécanismes M1 et M2 en terme de hauteur et d'intensité. Le mixte 1 se situe donc plutôt dans la zone aiguë et pianissimo du mécanisme M1 et le mixte 2 dans la zone grave et fortissimo du mécanisme M2.

Les stratégies de mixte mises en oeuvre par un contre-ténor, CT, ont été étudiées. Nous avons remarqué une très grande similarité entre un son de mécanisme M1 piano et un mixte 1. Nous ne nous permettrons pas de conclure qu'il n'y a aucune différence, mais que si différence il y a, alors elle est très subtile tant d'un point de vue perceptif que de part les études que nous avons efectuées. Des stratégies de préparations de passage de mécanismes, qui prennent la forme de doubles pics sur le signal DEGG, pourraient être utilisées en mixte 1, mais cette hypothèse mérite d'être plus amplement explorée.

En revanche, le mixte 2 étudié diffère plus nettement du mécanisme M2. Nous avons effectivement noté un vibrato particulièrement marqué en mixte 2, et un mouvement vibratoire glottique légèrement différent de celui observé en mécanisme M2. Ces différences notables peuvent nous amener à nous demander si le mixte 2 est bien effectué en mécanisme M2. L'étude menée, notamment en terme d'enveloppe du signal EGG, de quotient ouvert, d'intensité, semble plutôt valider cette hypothèse. On peut alors se demander si la différence de timbre entre le mixte 2 et le mécanisme M2 est purement due à une modification laryngée, à une adaptation des résonances, ou (plus vraissemblablement) à un couplage des deux. A ce titre, il serait très intéressant de chercher à déterminer si la modification de vibration laryngée observée en mixte 2 est d'origine musculaire (donc contôlée par le chanteur), ou s'il s'agit d'un effet de couplage entre les résonateurs et la source, qui apparaîtrait du fait de modifications de configurations des résonateurs lors du passage en mixte 2.

Perspectives

Au cours de notre étude, nous avons constaté que le mixte 1 était très proche, voire identique au mécanisme M1 franc de part les paramètres observés, ainsi que le mixte 2 par rapport au mécanisme M2 franc. Une étude parfaitement complémentaire consiste à chercher à vérifier si, d'un point de vue perceptif, le mixte 1 a des caractéristiques de mécanisme M2 et le mixte 2 des caractéristiques de mécanisme M1, ce qui serait tout à fait en conformité avec les explications du chanteur interviewé, qui nous expliquait utiliser le mixte 1 (resp. 2) pour imiter le mécanisme M2 (resp. M1) ou pour préparer un passage de mécanisme.

Un algorithme de détection de dédoublements de pics a été proposé et utilisé dans le cadre de cette étude. Il reste à résoudre les imperfections mentionnées pour le rendre totalement utilisable. Cet algorithme pourrait nous amener à effectuer des parallèles entre des configurations observées en terme de dédoublements, des données perceptives, et des configurations vibratoires glottiques. De tels progrès pourraient notamment nous permettre de comprendre plus en profondeur comment les chanteurs abordent leurs stratégies de passage de mécanisme, leur registre de voix mixte, leurs pianissimos/fortissimos...

En ce qui concerne plus spécifiquement la voix mixte, des études complémentaires d'observation directe de la glotte (par cinématographie ultra-rapide par exemple) pourraient nous amener à une meilleure compréhension des modifications vibratoires mis en jeu.

Par ailleurs, l'étude menée dans le cadre de ce travail s'est limitée à la voyelle [a]. Or s'il est vrai que la voix mixte est un registre résonantiel, alors elle est vraisemblablement abordée différemment selon la voyelle utilisée. Il y aurait ici aussi une importante exploration à effectuer.

Enfin, il serait très intéressant d'effectuer un travail similaire de caractérisation de la voix mixte sur d'autres sujets, pour chercher à comprendre combien il y a de stratégies pour chanter en mixte. Chaque chanteur a-t-il sa propre approche de ce registre? Ou bien existe-t-il une liste exhaustive de possibilités, dans laquelle chaque chanteur en choisirait une, ou en combinerait un certain nombre? Un tel travail pourrait s'avérer riche en résultats.

Annexe A

Cas litigieux de passage de mécanisme.

Le passage de mécanisme est "habituellement" très marqué comme nous l'avons vu en 2.5.1. Nous nous proposons ici de revenir sur un point qui nous a particulièrement intrigué puisque le mécanisme utilisé n'a pas pu être formellement identifié. La zone (sur le phonétogramme) suspecte correspond au pianissimo du mécanisme M1. Nous avons choisi de ne pas faire figurer cette zone sur le phonétogramme (figure 4.6) dans la mesure où nous n'avons pas formellement identifié le mécanisme utilisé.

La figure A.1 correspond à un cas comportant une indétermination de mécanisme. Le chanteur effectue un décrescendo depuis le mécanisme M1 et jusqu'au mécanisme M2. L'exemple peut être découpé en trois parties: jusqu'à environ 2,8 s, il est en mécanisme M1, et après 5,3 s, il est en mécanisme M2. Les interrogations portent sur la partie intermédiaire. La fin du mécanisme M1 est marquée par un important saut de fréquence, une chute d'intensité, ainsi qu'une diminution brutale de l'enveloppe du signal EGG. Ces trois informations semblent révéler un passage de mécanisme, cependant le chanteur soutient qu'il est resté en mécanisme M1, et la courbe de quotient ouvert vient appuyer son affirmation, puisque elle montre une étonnante continuité . En revanche, le début de la dernière zone, marquée elle par le saut de quotient ouvert, correspond avec certitude au mécanisme M2.

L'étude des dédoublements de pics peut apporter ici un complément quant à ces observations. On peut en effet noter que le mécanisme M1 (identifié) est dans sa généralité marqué par un dé-triplement de pics de fermeture, auxquels il faut ajouter un quatrième dédoublement à partir de t = 2,3 s, soit environ 500 ms avant le possible passage. Ce passage est justement marqué par un changement très brutal (effectué en quelques périodes) de la configuration des dédoublements de pics, puisque après ce passage, il n'y a plus qu'un seul pic de grande amplitude, les dédoublements étant deux fois moins marqués. Cette constatation, qui va de pair avec la chute de l'amplitude du signal EGG, montre bien qu'il y a eu une importante modification laryngée à t = 2,8 s, et peut être un passage de mécanisme. Cependant, à t = 5 s, donc juste avant que le chanteur ne passe (selon lui) en mécanisme M2, nous observons une chute de l'amplitude du pic de fermeture, ce qui signifie que cette autre modification a bien une composante laryngée elle aussi.

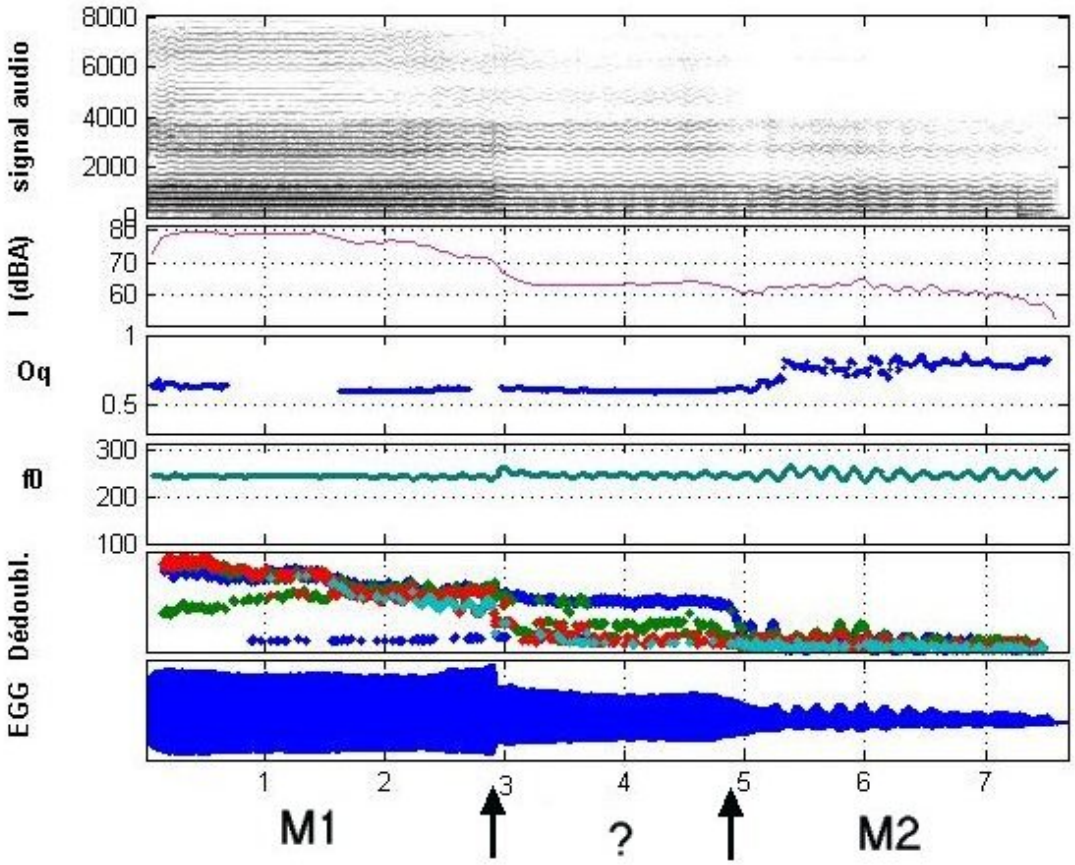

FIG. A.1 – *Exemple litigieux: décrescendo en partant du mécanisme M1, et jusqu'au mécanisme M2, effectué sur sib2, par CT.*

Nous avons proposé l'hypothèse suivante comme explication de ce phénomène: la chute d'amplitude de l'enveloppe du signal EGG à t = 2,8 s semble bien montrer que la surface de contact des cordes vocales diminue brutalement, et le saut de fréquence est un des éléments caractéristiques du passage de mécanisme. Le fait que le chanteur aie l'impression de rester en mécanisme M1 pourrait venir du fait qu'il continue à maintenir une certaine tension musculaire au niveau laryngé, qu'il ne relâcherait que à t = 5,3 s. Cette hypothèse pourrait également expliquer le faible quotient ouvert dans la zone intermédiaire. Un enregistrement de cinématographie ultrarapide pourrait permettre de lever cet ambiguïté.

Nous noterons également avec intérêt que ce phénomène a été observé sur la quasi totalité de sa tessiture de mécanisme M1, mais pas toujours avec les même signes révélateurs. Ainsi sur le fa2 (figure A.2), le saut de fréquence est absent, et la variation de l'enveloppe du signal EGG est très faible. Pourtant, nous entendons bien une modification du timbre, associée à une modification de la configuration des dédoublements de pics, le "passage" étant marqué par une baisse soudaine de tous les dédoublements sauf un (celui d'amplitude maximale).

Cependant, sur un fa2, l'écoute ne nous fait pas penser à un passage de mécanisme, mais à un decrescendo effectué en mécanisme M1, avec éventuellement des variations de timbres qui ne sont pas très régulières. Nous pouvons noter que la dernière partie de cet exemple est marquée par une absence totale de pics du signal DEGG, et une très faible amplitude du signal EGG, ce qui peut être le résultat d'une vibration des cordes vocales sans accolement. Ce phénomène a déjà été observé pour de très faibles amplitudes comme ici. Mais cela demeure surprenant d'observer un tel phénomène en mécanisme M1 (pour lequel le muscle vocal participe à la vibration), mais moins en mécanisme M2.

Lors du test d'écoute, la partie "litigieuse" a été interprétée comme du mécanisme M1 dans le grave (en dessous du fa2), puis plutôt comme du mixte 1, avec de plus en plus d'hésitations quant à le nature du mécanisme en montant dans l'aigu. Puis à partir du réb3, elle est pleinement considérée comme du mécanisme M2 (nous avons eu des réflexions du type: "raisonnablement, il s'agit de mécanisme M2..."). Voilà un point qui mériterait de plus amples études.

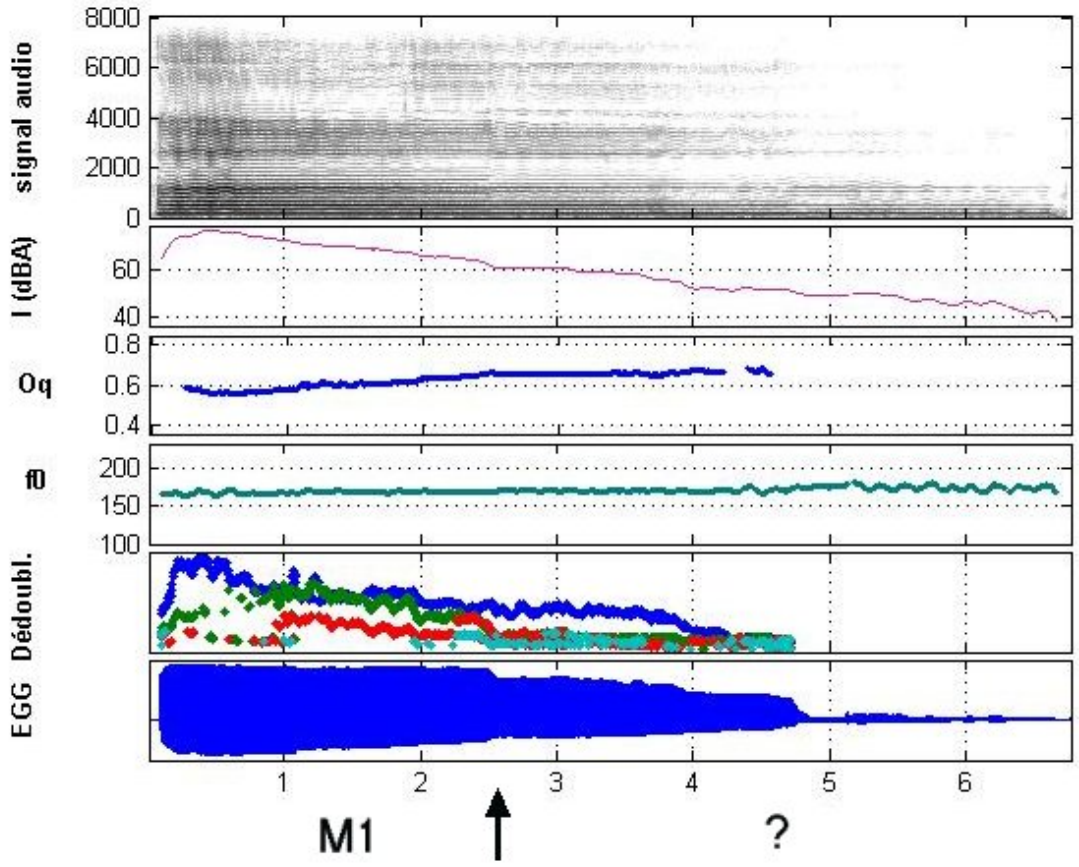

FIG. A.2 – *Decrescendo en partant du mécanisme M1 effectué sur fa2, par CT.*

Annexe B

Etude de la dépendance de l'enveloppe du signal électroglottographique avec l'intensité en mécanisme M2 et voix mixte.

Dans la mesure où nous avons cherché à utiliser l'amplitude du signal EGG pour caractériser la voix mixte, il semblait nécessaire de comprendre au préalable si celle ci-dépendait d'autres paramètres. Pour cela, nous avons exploité la base de donnée enregistrée par CT et portant sur la voix mixte.

La figure B.1 correspond à la phrase musicale chantée par CT en mixte 2. Nous pouvons constater que l'enveloppe du signal EGG varie fortement de l'avant dernière note à la dernière, alors que les intensités sont comparables (au moins si l'on se restreint à la première moitié de la dernière note), et que la hauteur des deux notes ne diffère que d'un ton. Nous avons retrouvé cette faible amplitude de l'EGG sur la dernière note sur la totalité des exemples étudiés. D'un point de vue perceptif, nous pouvons constater que le chanteur allège la fin de la phrase, ce qui se traduit entre autres par une diminution de l'intensité (à partir de 6,2s environ), mais cette interprétation esthétique semble se retrouver également au niveau de l'enveloppe de l'EGG. En conséquence, nous ne comparerons les enveloppes des signaux à note égale et à "positions identique" au sein de la petite phrase musicale.

Le résultat de cette étude est donné figure B.2. Nous constatons une très forte dépendance de l'enveloppe du signal EGG avec l'intensité. Nous notons également une différence d'enveloppe en fonction du mécanisme utilisé, et notamment le fait que les sons de mixte 1 sont clairement distinguables de ceux de mixte 2 et de mécanisme M2 franc. En revanche, aucun critère ne nous permet de différencier les sons de mixte 2 de ceux de mécanisme M2 franc.

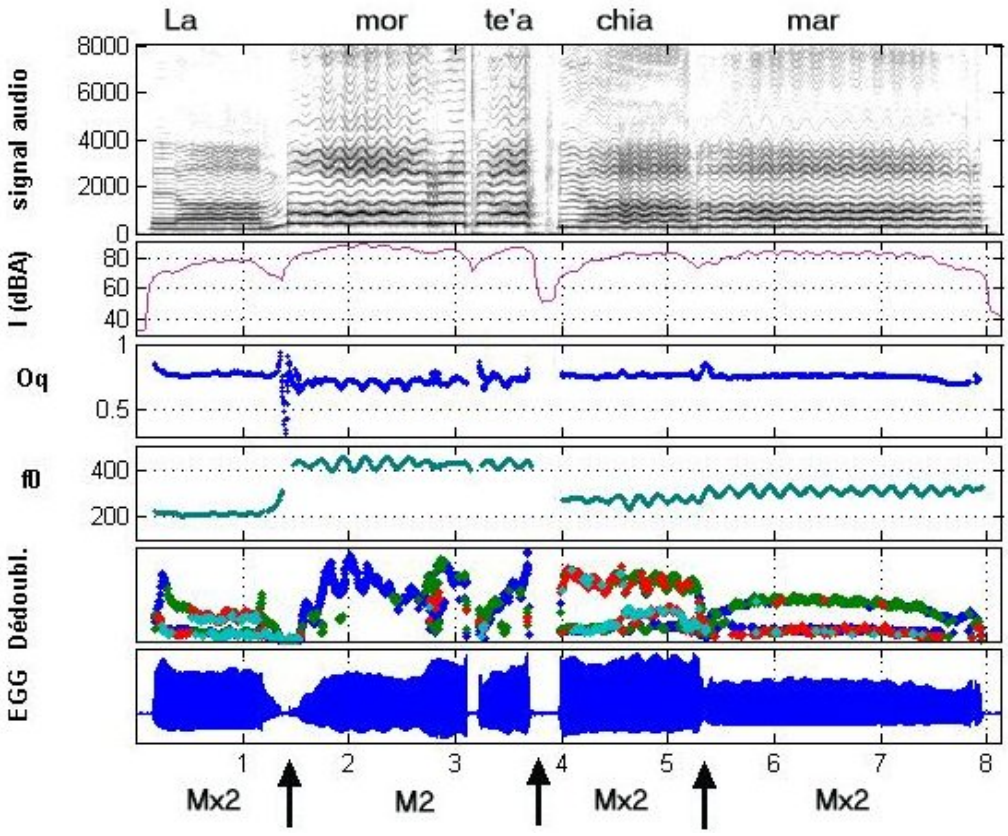

FIG. B.1 – *Exemple de la phrase musicale. Les trois notes graves sont chantées en mixte 2.*

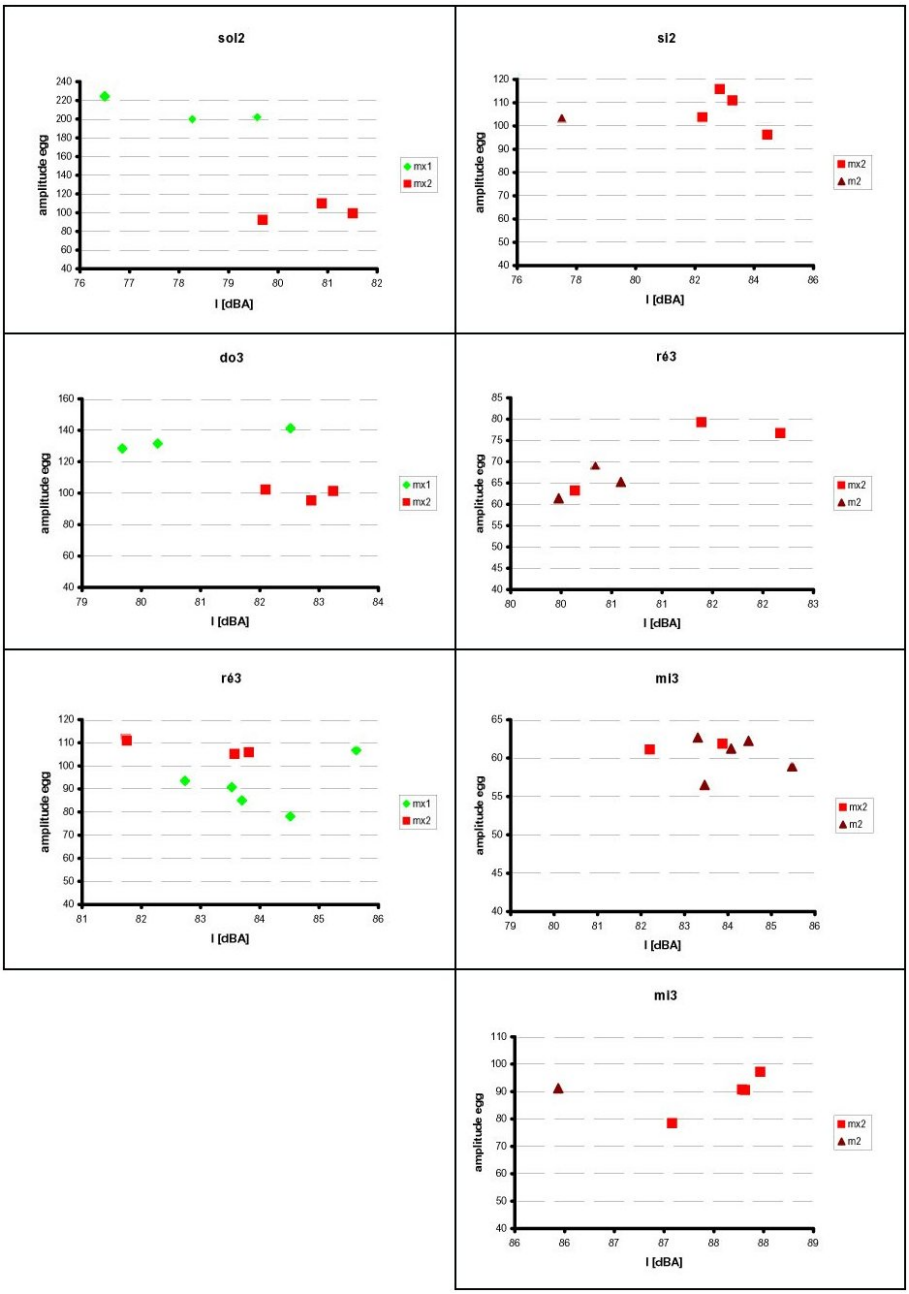

FIG. B.2 – *Résultat de l'étude de la dépendance de l'enveloppe EGG avec l'intensité. L'amplitude de l'EGG est exprimée en valeurs adimentionnées, 100 étant une valeur de référence. Chaque point correspond à une grandeur moyennée sur la totalité de la note étudiée. Certaines notes apparaissent deux fois car elles se sont trouvées parfois en position 3, et parfois en position 4 au sein de la phrase musicale. Chanteur: CT.*

Annexe C

Un signal électroglottographique très atypique

Nous avons vu dans la partie 2.3.3 que les méthodes d'estimations du quotient ouvert par seuillage du signal EGG étaient plutôt robustes (mais approximatives). Nous avons trouvé un exemple d'émission qui était capable de mettre en défaut ces méthodes.

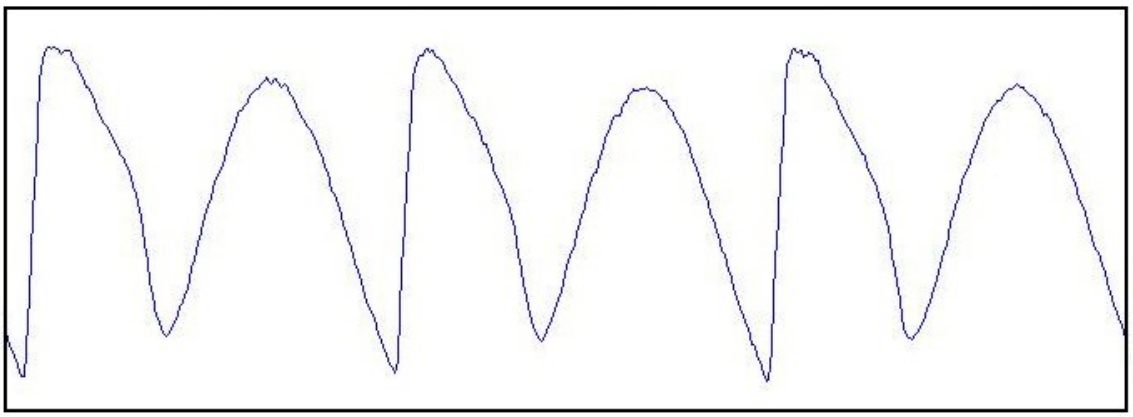

FIG. C.1 – *Exemple de signal EGG très atypique. Trois périodes sont représentées. Voyelle: [i], note: do#3. La chanteuse S était alors en mécanisme M2.*

Sur la figure C.1, seule trois périodes ont été représentées, pourtant, le signal présente bien 6 "bosses". Chaque période est donc composée de deux "bosses" d'EGG. La première est plutôt asymétrique, le signal augmente brutalement, puis diminue plus lentement, en présentant un changement de pente. En revanche, la seconde partie de la période se révèle extrêmement symétrique.

Un tel phénomène est observé chez S sur toutes les notes étudiées, mais uniquement sur la voyelle [i]. La deuxième partie très atypique du signal pourrait donc être la conséquence

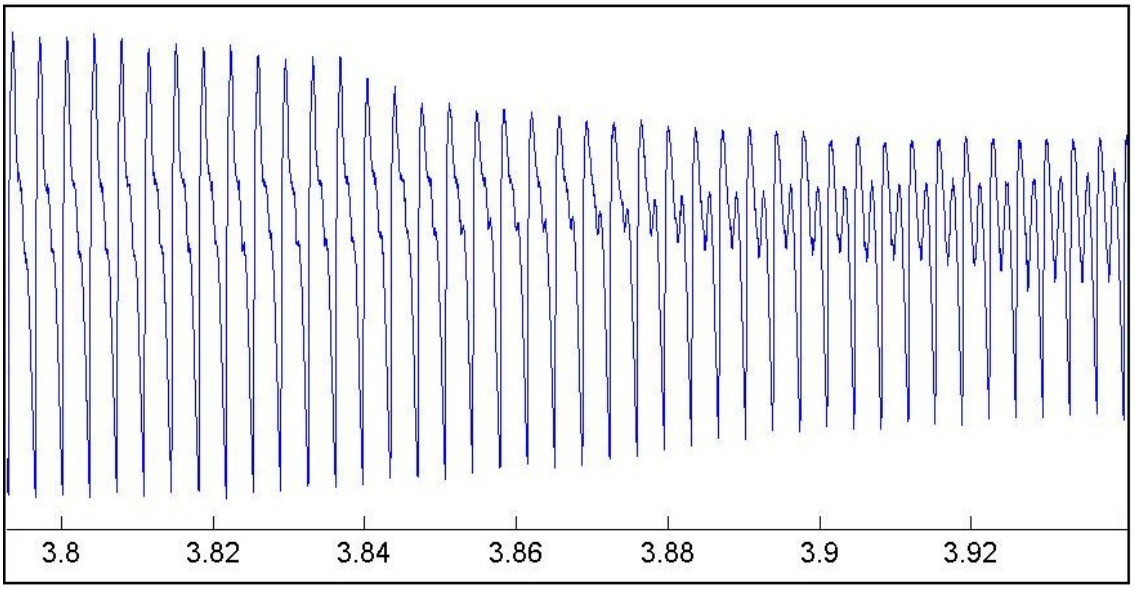

FIG. C.2 – *Exemple d'un signal EGG lors du passage du mécanisme M1 au M2. La voyelle est un [i], la note un do#3, et le chanteur: S.*

d'un effet de rétroaction des résonateurs, ce qui est d'autant plus plausible que la fréquence fondamentale du signal est proche de la fréquence du premier formant.

Nous avons également constaté que ce phénomène était très peu marqué en mécanisme M1. La figure C.2 représente un passage de mécanisme. Nous constatons nettement que la seconde montée du signal EGG par période apparaît lors du passage, ce qui renforce l'hypothèse de l'effet de rétroaction des résonateurs. En effet, en mécanisme M1, la masse vibrante est importante, et le chanteur peut directement contrôler son larynx puisqu'il exerce une action musculaire. En mécanisme M2, en revanche, le muscle vocal ne participe plus à la masse vibrante en action, donc la vibration est plus soumise à l'effet des résonateurs.

Cependant, cette hypothèse mériterait d'être explorée plus en détails afin d'être confirmée ou infirmée.

Table des figures

1.1 Schématisation du conduit vocal et du larynx. D'après Denes et Pinson [8]. . . 9
1.2 Coupe transversale d'un larynx. D'après Legent et al. [16]. 10
1.3 (a): Schéma d'une laryngoscopique du larynx. (b) et (c): Schématisation des muscles intrinsèques du larynx et de leur actions. D'après Legent et al. [16]. . . 11
1.4 Images laryngoscopiques d'un larynx en position de respiration et phonatoire. D'après Henrich [11]. 11
1.5 Glissando ascendant chanté par une soprano, utilisant les quatre mécanismes laryngés. D'après Henrich [11]. 12
1.6 Visualisation de la configuration glottique associée aux mécanismes M1 et M2. D'après Henrich [11]. 14

2.1 Description du fonctionnement de l'électroglottographe. D'après Henrich [11]. . 18
2.2 Illustrations du mouvement glottique visualisées sur un signal EGG et sur sa dérivée. D'après Henrich [11]. 19
2.3 Exemple de dédoublements (voir même dé-triplement ici) de pics de fermeture. Note: sib2, mécanisme M1. 21
2.4 Schéma explicatif du fonctionnement de la kymographie. 22
2.5 Schématisation du filtre de pondération A. 23
2.6 Exemple de phonétogramme par mécanisme laryngé d'un sujet féminin chanteur confirmé. D'après Roubeau, Castellengo et Bodin [20]. 24
2.7 Exemple de signal DEGG d'un des sujets observé, en mécanisme M1, sur do#3. 26
2.8 Exemple de signal DEGG d'un des sujets observé, en mécanisme M1, sur do#3. 26
2.9 Illustration du fonctionnement de l'algorithme. En abscisses sur la seconde figure: le temps (en secondes). 28
2.10 Exemple de courbes obtenus grâce à l'algorithme. Le son étudié est un decrescendo du mécanisme M1 au mécanisme M2, sur un sib2. 29
2.11 Illustration d'un dysfonctionnement de l'algorithme de détection des dédoublements de pics. 29
2.12 Exemple de glissando ascendant puis descendant, effectué par un contre-ténor. L'exemple est marqué par deux passages de mécanismes. Le quotient ouvert a été calculé par la méthode "decom" (trait gras) et la méthode de seuillage du signal EGG à 35% de son amplitude (traits fins). 30
2.13 crescendo effectué par un contre-ténor (sujet CT), en mécanisme M1, sur la voyelle [a] et la note do#3. D'après Henrich [12]. 32

3.1 Phrase musicale chantée par S. 35
3.2 Phrase musicale choisie par CT lors de la séance d'enregistrement. 36

4.1 Diagrammes de variations de l'intensité en fonction du quotient ouvert (a), et du quotient ouvert en fonction de la hauteur (b). Le mécanisme M1 correspond à la zone délimitée par le trait gras vert, et le M2 par le trait fin rouge. Chanteur: CT. 39
4.2 Diagrammes de variations de l'intensité en fonction du quotient ouvert (a), et du quotient ouvert en fonction de la hauteur (b). Le mécanisme M1 correspond à la zone délimitée par le trait gras vert, et le M2 par le trait fin rouge. La forme du graphique (b) vient du protocole utilisé: nous n'avons demandé à S de ne chanteur que sur quatre notes, qui correspondent aux quatres zones clairement identifiables. Chanteur: S. 40
4.3 Crescendo sur la note do#3, voyelle: [i], effectuée par S, en mécanisme M1. . . . 41
4.4 Graphique représentant l'intensité en fonction du quotient ouvert, et en distinguant les mécanismes et la voix mixte. En gros trait vert : le mécanisme M1, et petit trait rouge, le mécanisme M2. En pointillées, la voix mixte, qui est séparable en deux zones: l'une située dans le domaine du mécanisme M1, l'autre dans celui du mécanisme M2. Chanteur: CT. 42
4.5 Graphique représentant l'intensité en fonction du quotient ouvert, et en distinguant les mécanismes et la voix mixte. En gros trait (vert) : le mécanisme M1, et trait fin (rouge), le mécanisme M2. Les points correspondent à la voix mixte. Chanteur: S. 43
4.6 Phonétogramme par mécanisme laryngé de CT. mécanisme M1: gros trait vert. mécanisme M2: trait fin rouge. Voix mixte: pointillés. 44
4.7 Decrescendo effectué en mécanisme M1. La partie située avant le passage en mécanisme M2, correspond à du mixte 1. La hauteur correspond à un sib2. . . 46
4.8 Phrase musicale effectuée par CT, en partant du la2. Les deux notes les plus graves ont été effectuées en mixte 1. 47
4.9 Comparaison du mixte 2 et du mécanisme M2, à même hauteur (mi3 - fa#3) et intensité. Chanteur: CT. L'extrait correspond à la fin de la phrase musicale (les deux dernières notes). 49
4.10 Exemple de decrescendo effectué par CT, et marqué par un passage de mixte 2 à M2 franc, sur si2. 50
4.11 Exemples de dédoublements de pics de deux decrescendos. Sur le premier, le pallier est caché. Sur le second il ne l'est pas. 51
4.12 Une période observée par cinématographie ultra-rapide. mécanisme M2 (franc). 54
4.13 Une période observée par cinématographie ultra-rapide. L'émission est en mixte 2. 55
4.14 Comparaison kymographique du mécanisme M2 avec le mixte 2. En abscisses: le temps. En ordonnées: la visualisation en coupe du larynx. 56

A.1 Exemple litigieux: décrescendo en partant du mécanisme M1, et jusqu'au mécanisme M2, effectué sur sib2, par CT. 60
A.2 Decrescendo en partant du mécanisme M1 effectué sur fa2, par CT. 62

B.1 Exemple de la phrase musicale. Les trois notes graves sont chantées en mixte 2. 64
B.2 Résultat de l'étude de la dépendance de l'enveloppe EGG avec l'intensité. L'amplitude de l'EGG est exprimée en valeurs adimentionnées, 100 étant une valeur de référence. Chaque point correspond à une grandeur moyennée sur la totalité de la note étudiée. Certaines notes apparaissent deux fois car elles se sont trouvées parfois en position 3, et parfois en position 4 au sein de la phrase musicale. Chanteur: CT. 65

C.1 Exemple de signal EGG très atypique. Trois périodes sont représentées. Voyelle: [i], note: do#3. La chanteuse S était alors en mécanisme M2. 66
C.2 Exemple d'un signal EGG lors du passage du mécanisme M1 au M2. La voyelle est un [i], la note un do#3, et le chanteur: S. 67

Bibliographie

[1] *NF ISO 226*, Août 1987. Lignes isosoniques normales.

[2] M.F. Castarède. *La voix et ses sortilèges*. Les belles lettres, 1987.

[3] M. Castellengo, B. Chuberre, et N. Henrich. Is *voix mixte*, the vocal technique used to smoothe the transition across the two main laryngeal mechanisms, an independent mechanism? Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics, March 2004.

[4] B. Chuberre. Les registres et passages dans la voix chantée, 2000. Mémoire de phoniatrie. Université de Nantes.

[5] G. Cornut. *La voix*. PUF, première edition, 1983.

[6] G. Cornut. *La voix*. PUF, septième edition, 2005.

[7] A. De Cheveigné et H. Kawahara. Yin, a fundamental frequency estimator for speech and music. *J. Acous. Soc. Am*, 111(4):1917–1930, Avril 2002.

[8] P.B. Denes et E.N. Pinson. *La chaîne de communication verbale. Physique et biologie du langage*. Les laboratoires du téléphone Bell, 1963.

[9] R. Expert. Les voix d'alto, 2003. Mémoire de recherche de la classe d'Acoustique Musicale du CNSMP.

[10] J. Faure. *La voix et le chant*. Heugel, 1886.

[11] N. Henrich. *Etude de la source gottique en voix parlée et chantée. Modélisation et estimation, mesures acoustiques et électroglottographiques, perception*. PhD thesis, Université Paris 6, 2001.

[12] N. Henrich. Mirroring the voice from Garcia to the present day: Some insights into singing voice registers. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 31:3–14, 2006.

[13] N. Henrich, C. d'Alessandro, et B. Doval. On the use of the derivate of electroglottographic signals for the caracterisation of nonpathological phonation. *J. Acous. Soc. Am*, 115(3):1321–1332, March 2004.

[14] N. Henrich, B. Roubeau, et M. Castellengo. On the use of electroglottography for characterisation of the laryngeal mechanisms. Proceedings of the Stockholm Acoustics Conference, August 2003.

[15] R. Husson. *Physiologie de la phonation*. Masson, 1962.

[16] F. Legent, L. Perlemutier, et Cl. Vanderbrouck. *Cahiers d'anatomie O.R.L.* Masson, deuxième edition, 1975.

[17] D.G. Miller et H.K. Schutte. *Mixing* the registers: Glottal source or vocal tract? *Folia Phoniatr Logop*, 57:278–291, 2005.

[18] R. Miller. *La structure du chant*. IPMC, 1990.

[19] M. Ragot. Phonétogrammes de mécanismes vibratoires laryngés et champ de liberté de la voix chantée chez l'enfant et l'adulte, 1998. Mémoire pour le certificat de capacité d'orthophoniste.

[20] B. Roubeau, M. Castellengo, et P. Bodin. Phonétogramme par registre laryngé. *Folia Phoniatr Logop*, 56:321–333, 2004.