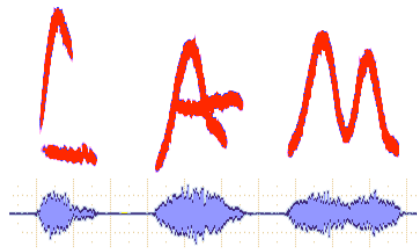




Lutherie, Acoustique et Musique

11, rue Lourmel 75015 Paris



stage de Master M2 ATIAM

Domaine de l'acoustique musicale appliquée à la voix chantée

Transitions de 2 mécanismes laryngés:

Etude des sauts de fréquence en fonction de la note et de l'amplitude d'émission, ainsi que de la voyelle

Date de soutenance de stage: 25 Juin 2008

Etudiant: Sophie ALBERT

Encadrants: Boris DOVAL

Sylvain LAMESCH

TABLE DES MATIERES:

Remerciements	5
Introduction	6
Chapitre 1: la voix chantée et les mécanismes laryngés	7
I.1: Physiologie de l'appareil vocal	
I.2: Les mécanismes laryngés	9
I.2.a: Mécanismes et registres	
I.2.b: Les configurations vibratoires des cordes vocales en M1 et M2	10
I.2.c: Electroglottographie	12
I.2.d: Les phonétogrammes et la zone de recouvrement	15
I.3: Etudes précédentes	17
Chapitre 2: Construction de la base de données	20
II.1: Matériel d'enregistrement	
II.1.1) Le matériel	
II.1.2) les enregistrements	
II.2: Protocole	
II.3: Les chanteurs	21

Chapitre 3: Analyse des données	22
III.1: Découpage des sessions et estimation des paramètres	
III.2: Détection des instants de fermeture glottique (gci)	
III.3: Estimation de la fréquence fondamentale	25
III.4: Calcul de l'intensité	27
III.5: Etiquetage des sauts	
III.6: Base de données	29
 Chapitre 4: Résultats	 30
IV.1: Etude des variations de fréquence au cours des transitions de mécanismes laryngés	
IV.1: Influence de l'intensité	
1°) Etude de l'influence du SPL	32
2°) Etude de l'influence de la nuance	35
3°) Analyse et interprétation	37
IV.1.2: Influence de la hauteur	38
IV.1.3: Influence de la voyelle choisie	39
IV.2: Etude de la variation d'intensité dans les moments de transition	43
IV.3: Influence du sexe du chanteur	46
 Conclusion	 47
 Bibliographie	 48
 Annexe	 49

Remerciements

Je remercie profondément toute l'équipe du LAM (Lutherie, Acoustique et Musique) pour m'avoir donné la chance de travailler sur un thème aussi intéressant et original que celui de l'étude de la voix chantée et de ses mécanismes.

Merci à Boris Doval pour ses idées toujours originales et instructives, ainsi que sa rigueur de raisonnement et de pensée, et à Sylvain Lamesch pour son aide et son encadrement, ainsi que pour sa disponibilité.

Je souhaite également remercier chaleureusement Michèle Castellengo pour l'apport d'une partie de ses connaissances et sa passion communicative pour tous les phénomènes acoustiques touchant à la voix chantée (en autres...)

J'adresse enfin mes remerciements à l'ensemble des chanteurs qui ont accepté de se soumettre au protocole de cette étude.

Introduction:

Les transitions de mécanisme laryngé sont caractérisées par des changements brusque de configurations vibratoires de la glotte (cf I.2.b). De nombreuses études sur ces transitions ont été réalisées durant ces dernières années.

En effet, ce sujet est au coeur de l'art du chant. D'un côté, les chanteurs lyriques occidentaux tentent d'annihiler ce phénomène, en pratiquant des exercices de passages d'un mécanisme à l'autre, alors que de nombreuses autres cultures (japonaise, iranienne ou , l'intègrent dans leur art et tentent de l'exploiter en utilisant les caractéristiques de ces changements d'état (cf chapitre 1).

Le changement d'une configuration vibratoire à une autre entraîne une instabilité de l'instrument durant la période de transition qui modifient brusquement l'esthétique et la puissance de la voix. Certaines autres cultures jouent avec les effets perceptifs que provoquent ces sauts. Il existe notamment en Iran des ornements mélodiques basés sur les sauts (style Tahrir ou Yakout). De brefs et continuels enchaînements de sauts sont pratiqués. On observe l'ouverture de ces cultures dans le développement de la voix .

Le développement non restrictif de la voix dans ces cultures témoigne de leur ouverture

Enfin, le Yodel (ou Jodel) soulève une hypothèse intéressante: cette technique de chant demande aussi une pratique des sauts, mais il semble que le changement de voyelle joue un rôle pour favoriser les transitions. En effet, le Yodel préconise les voyelles ouvertes, telle que / a/ et /è/, dans le grave alors que les voyelles les plus couramment utilisées dans l'aigu sont fermées. L'alternance grave-aigu, accompagnée d'un changement de voyelle implique souvent une modification du timbre, de l'intensité et de la configuration vibratoire.

Le but de ce stage est d'approfondir l'étude des caractéristiques des sauts en faisant varier les paramètres intensité et hauteur précédant le saut, ainsi que la voyelle.

Chapitre I: La voix chantée et les mécanismes laryngés

I.1 : Physiologie de l'appareil vocal

La voix est restée longtemps un instrument mal connu et mal compris à cause de la difficulté d'accès à l'instrument. Le son émis par l'appareil vocal est en effet une conséquence de la mise en vibration des cordes vocales. L'appareil vocal comprend l'appareil respiratoire, le larynx ainsi que les résonateurs qui sont principalement la cavité buccale, les cavités nasales et le pharynx. Cet ensemble de résonateurs est appelé le conduit vocal (voir figure 1)

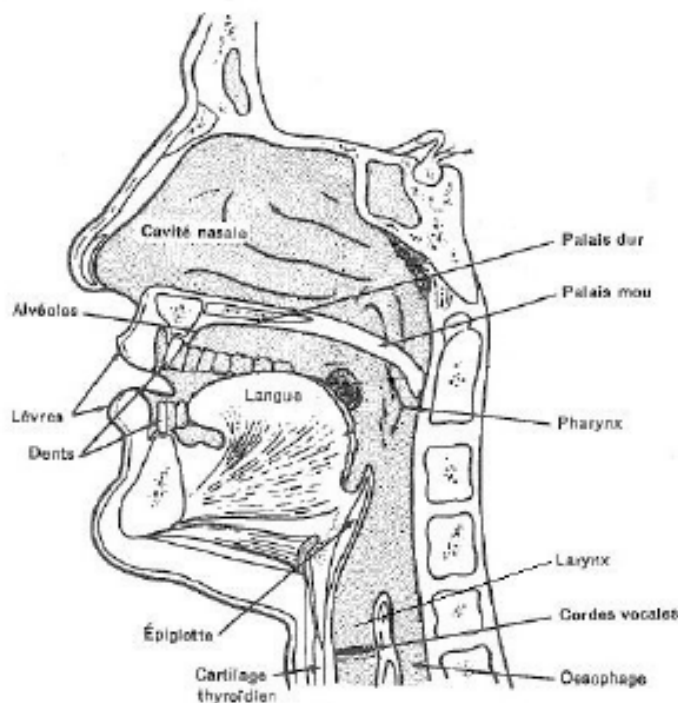


Fig. 1 Schématisation du conduit vocal et du larynx. D'après Denes et Pinson. [4]

Le larynx est un ensemble de muscles dont les principaux sont les cordes vocales. Celles-ci sont mises en vibration par la soufflerie (air fourni par les poumons). Lorsque la pression sous-glottique augmente, brusquement les cordes vocales s'écartent. L'air s'échappe et la pression sous glottique baisse, laissant les cordes vocales s'accoler, provoquant à nouveau une augmentation de la pression.

C'est la répétition cyclique de ce phénomène qui crée le son perçu. Le larynx est la source du son obtenu.

Comme on peut le voir sur la figure 2 qui suit, les cordes vocales comportent les muscles thyro-aryténoïdiens. Cependant, ces muscles ne participent pas toujours à la vibration des cordes vocales. Nous verrons par la suite l'importance de l'action de ces muscles pour caractériser les différents mécanismes laryngés et la transition de l'un à l'autre.

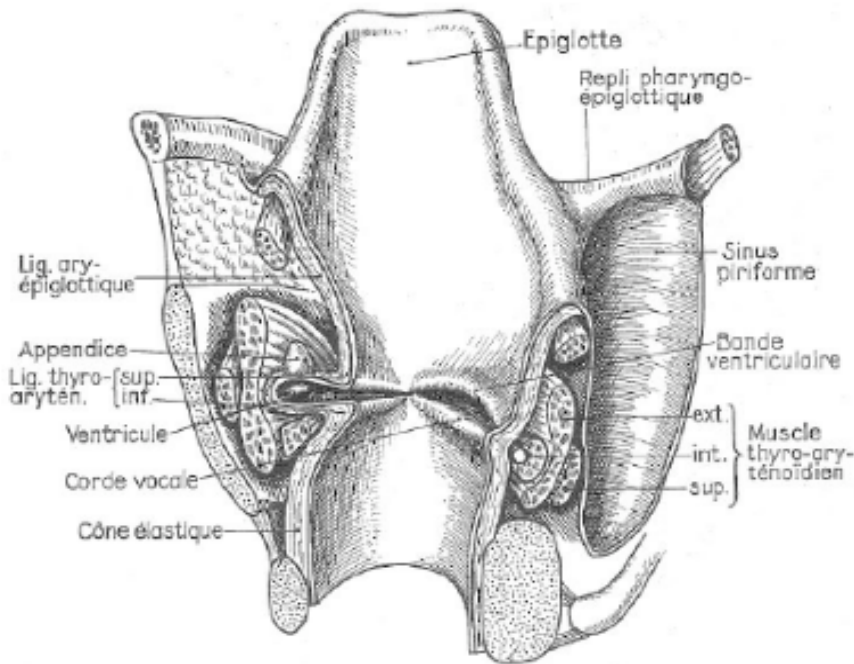


Fig.2 Coupe transversale d'un larynx. D'après Legent et al. [9]

Le conduit vocal amplifie et transforme ensuite le son émis par le larynx. Différentes configurations du conduit vocal avec le même son à la source produiront des timbres et couleurs variées. Les différentes voyelles résultent notamment de différents ajustements du conduit vocal (voir figure 3)

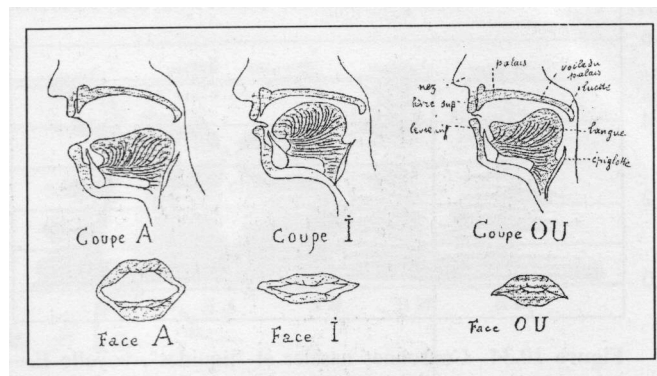


Fig.3: Profil de la cavité buccale et ouverture des lèvres pour les trois voyelles /a/, /i/, /ou/. (D'après le Dr Marage) [3]

I.2 : Les mécanismes laryngés

I.2.a : Mécanismes et registres:

L'ambitus d'une voix varie selon les personnes mais est exceptionnellement large pour un instrument à deux cordes uniquement (la fréquence fondamentale peut varier entre quelques Hz et 2000Hz). Cependant, on remarque qu'une voix (particulièrement une voix non travaillée au sens lyrique) n'est pas homogène entre les sons les plus graves et les plus aigus. La qualité vocale du son, que l'on peut définir ici comme la qualité du timbre et la dynamique possible du son produit, évolue de manière discontinue avec la fréquence. L'observation des cordes vocales a montré que sur un glissando ascendant (ou descendant) recouvrant l'ensemble de la tessiture, par trois fois la configuration vibratoire des cordes vocales peut varier. On parle alors de changement de mécanisme laryngé. Les quatre mécanismes sont appelés M0, M1, M2 et M3 par ordre d'apparition lors d'un glissando ascendant.

Cependant, il est possible de percevoir des modifications de qualités vocales (principalement le timbre) sans changement de mécanisme. Il s'agit alors d'un ajustement du conduit vocal (résonateurs) et on parle alors de changement de registre résonantiels.

Cette distinction sépare la catégorie des modifications à la glotte (la source) et de celle des modifications des résonateurs (le filtre). Il est à noter qu'un changement de mécanisme implique des modifications résonantielles. (cf cours au CNSMDP de M Castellengo).

On distingue donc simplement les transitions:

- avec changement de configurations vibratoires: les **changements de mécanisme**.
- sans changement de configurations vibratoires: les **changements de registre**.

Dans le monde de l'art lyrique occidental, tout un chacun a son propre lexique de registres, avec ses propres définitions, basées sur ses sensations propres. Certains vocabulaires se recoupent mais la confusion règne bien souvent. D'autant que différentes personnes utilisent le même lexique de registres en ayant différentes définitions. Et pour finir, certains registres sont distingués selon le sexe du chanteur (l'exemple le plus courant étant la voix de tête qui pour une femme correspond au mécanisme (M2) et l'aigu du mécanisme (M1) pour l'homme).

Afin de ne pas se perdre dans la confusion des mots, nous ne tiendrons pas compte des changements de registre, lesquels font uniquement appel aux sensations propres du chanteur et à sa technique personnelle, pour nous restreindre aux transitions de mécanisme.

I.2.b : Les configurations vibratoires des cordes vocales en M1 et M2:

La fréquence fondamentale d'un chanteur pouvant atteindre les 2000 Hz, il est nécessaire pour filmer l'évolution de la glotte d'utiliser une cinématographie ultra-rapide d'environ 4000 images par seconde, afin d'éviter les phénomènes d'aliasing. Lors d'un glissando ascendant couvrant l'ambitus de la voix d'un chanteur, on observe donc les changements de configurations vibratoires énoncés auparavant:

-Le mécanisme M0 (appelé voix de fry): Il est caractérisé par une très faible fréquence (en-dessous de 50 Hz, une grande instabilité. Les cordes vocales sont très courtes et épaisses et l'ouverture de la glotte est très brève.

-Le mécanisme M1 (principalement utilisé en registre de poitrine): La fréquence peut varier selon les chanteurs entre 80 et 500 Hz. Les cordes vocales sont épaisses et vibrent sur toute leur longueur. La masse vibrante est importante et la durée d'accolement des cordes est longue par rapport à la durée d'ouverture. (voir figure 5)

-Le mécanisme M2 (principalement utilisé en registre de tête ou falsetto): La fréquence peut varier entre 160 et 800 Hz. Les cordes vocales sont fines et ne vibrent plus que sur 2/3 de leur longueur. La durée d'ouverture est très longue par rapport à la période. (voir figure 5)

-Le mécanisme M3 (appelé voix de sifflet): la fréquence est particulièrement aigüe (jusqu'à 1800 Hz!!!). Les cordes vocales sont encore plus fines et tendues et l'accolement est très court.

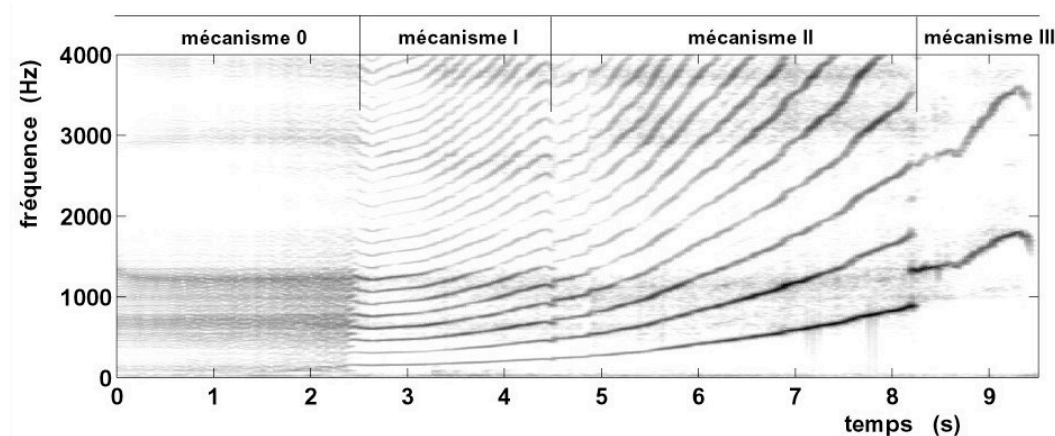


Fig.4: Visualisation des 3 changements de mécanismes sur le sonagramme d'un crescendo ascendant chanté par une soprano (d'après Henrich) [6]

Les mécanismes fry et sifflet étant peu utilisés dans le chant (ou même en voix parlée), nous focaliserons l'étude sur les mécanismes plus courants que sont le M1 et le M2. (schéma de l'évolution de la glotte dans ces deux mécanismes représenté dans la figure 5).

En effet, Les hommes chantent principalement en M1 (bien que cela ne soit pas une vérité absolue, certains ténors chantant en M2). De plus le M1 est utilisé en voix parlée par les hommes sur l'ensemble de leurs tessiture et par les femmes dans le grave.

Pour ce qui est du M2, les soprani et mezzo-soprani chantent quasi-exclusivement en M2 et font des emprunts de plus ou moins courtes durées en M1.

Les contraltos et contre-ténors peuvent utiliser les deux mécanismes et passent fréquemment de l'un à l'autre. L'apprentissage des changements de mécanismes en "douceur" est une des principales clés de la technique de ces chanteurs.

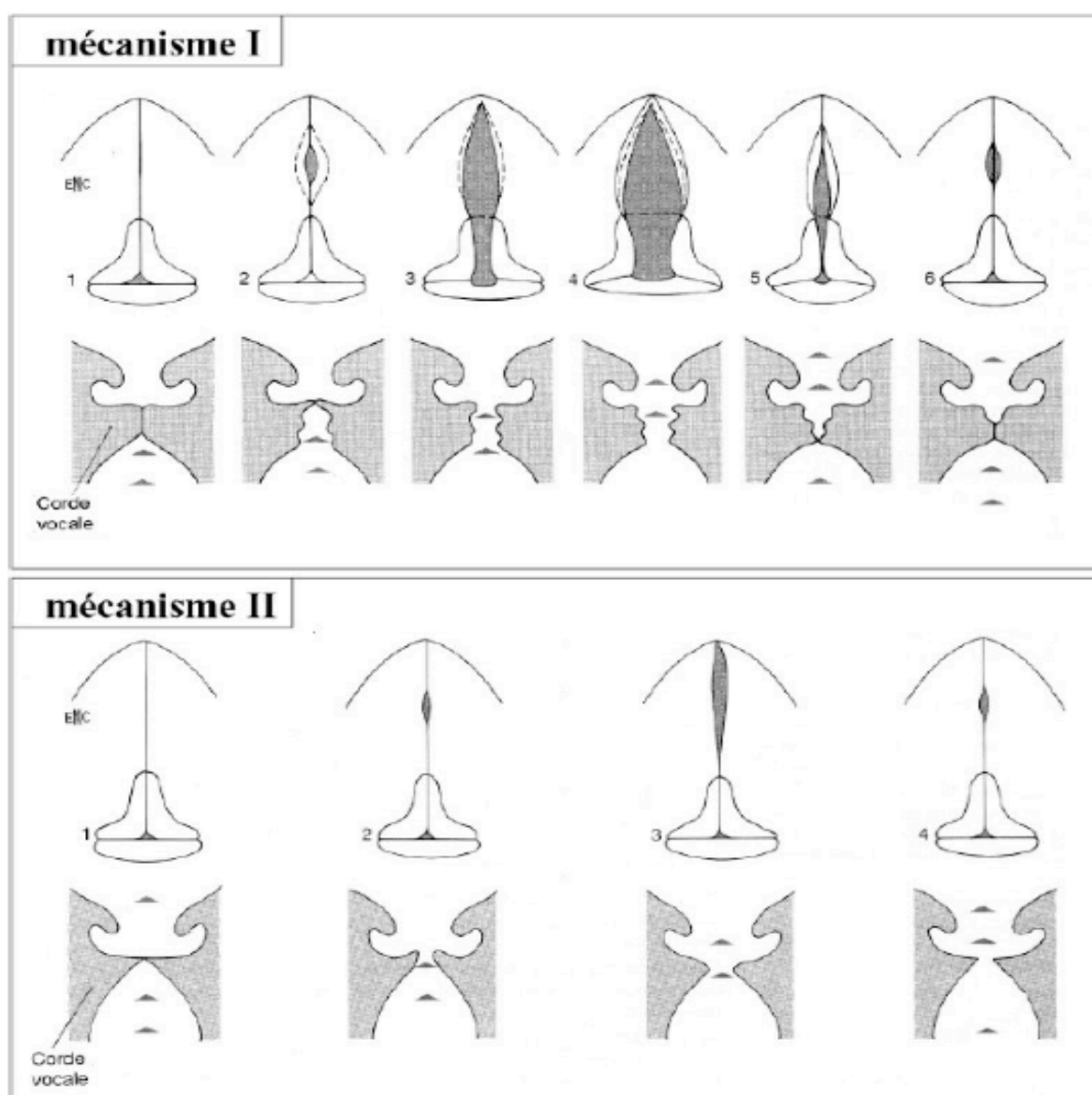


Fig.5: Visualisation de la configuration glottique associée aux mécanismes M1 et M2. (D'après Henrich) [6]

I.2.c : Electroglottographie:

1°) Description

L'étude, que l'on se propose de faire, traite des deux mécanismes M1 et M2. Il est indispensable pour ne pas fausser les résultats de pouvoir à tous moments contrôler le mécanisme des chanteurs (certains n'étant pas toujours capables d'affirmer quel mécanisme est utilisé au moment même). En 1956, Fabre a mis au point l'électroglottographie, qui nous permet de distinguer facilement les mécanismes.

Le signal électroglottographique (EGG) est obtenu à l'aide d'un électroglottographe, muni de deux électrodes que l'on place sur le cou du chanteur, à la hauteur du larynx (et donc des cordes vocales), et qui mesure d'admittance entre ces deux électrodes. L'électroglottographe est muni d'un générateur de courant qui délivre un faible courant alternatif. Le signal est démodulé puis filtré par un filtre de passe-haut (fréquence de coupure à entre 5 et 40 Hz) afin de filtrer les basses fréquences qui sont dues à des fréquences parasites pour l'étude, tel que les battements du cœur, perçus dans les veines.

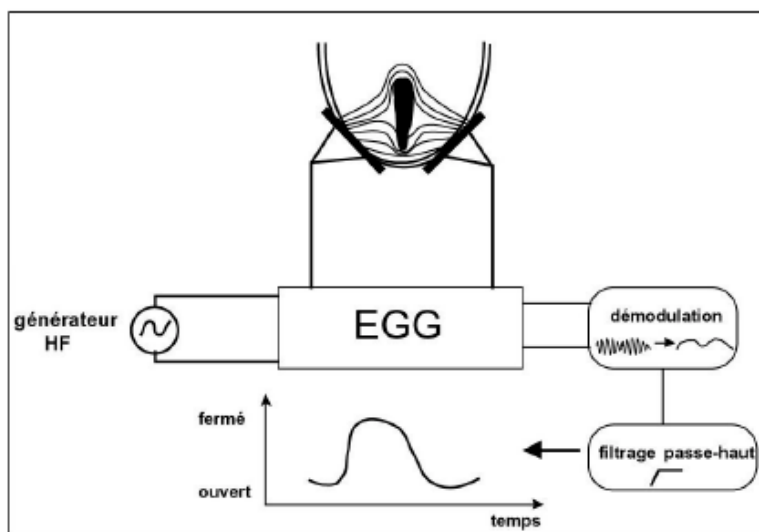


Fig.6: Description du fonctionnement de l'électroglottographie. (D'après Henrich) [6]

L'EGG est proportionnel à la surface d'accolement des cordes vocales. Un cycle de ce signal correspond à un cycle d'ouverture et de fermeture de la glotte et ainsi à une période du son émis (à laquelle on peut associer la fréquence perçue).

On observe 4 phases différentes dans le cycle glottique. Ces phases du signal ont des comportements différents pour les deux mécanismes, en forme et en temps. (voir figure 7)

- a) La phase de fermeture (augmentation très brutale du signal)
- b) La phase fermée (pente légèrement descendante)
- c) La phase d'ouverture (diminution du signal mais de variation moins brutale que la fermeture)
- d) La phase ouverte (pente légèrement descendante)

2°) Caractéristiques du signal électroglottographique (EGG) et de sa dérivée (DEGG)

La donnée de l'EGG permet de connaître avec précision l'état d'accolement des cordes vocales à chaque moment. En phase d'ouverture, ce signal manque toutefois de précision.

Afin d'affiner les caractéristiques de chaque mécanisme, on utilise le signal DEGG, qui n'est autre que la dérivée du signal EGG. Il permet de visualiser les variations de pentes de l'EGG afin de bien mettre en valeur les instants où la glotte se ferme ou s'ouvre brusquement. Les grandes variations de la pente de l'EGG se produisant pendant la phase de fermeture et, à un moindre degré, à celle d'ouverture, on obtient pour le DEGG des pics positifs très marqués de fermeture et d'autres négatifs et moins grands pour les ouvertures. On obtient ainsi avec beaucoup de précision les instants de fermeture de la glotte et, moins précisément, ceux d'ouverture.

a) Forme des signaux EGG et DEGG:

On observe des différences sur les formes des EGG selon les mécanismes : La pente de fermeture est plus abrupte dans le mécanisme M1 et sa forme générale est plus dissymétrique que celle du M2 qui est par ailleurs plus arrondie. (voir figure 7)

On obtient ainsi des pics plus marqués et grands en M1 qu'en M2.

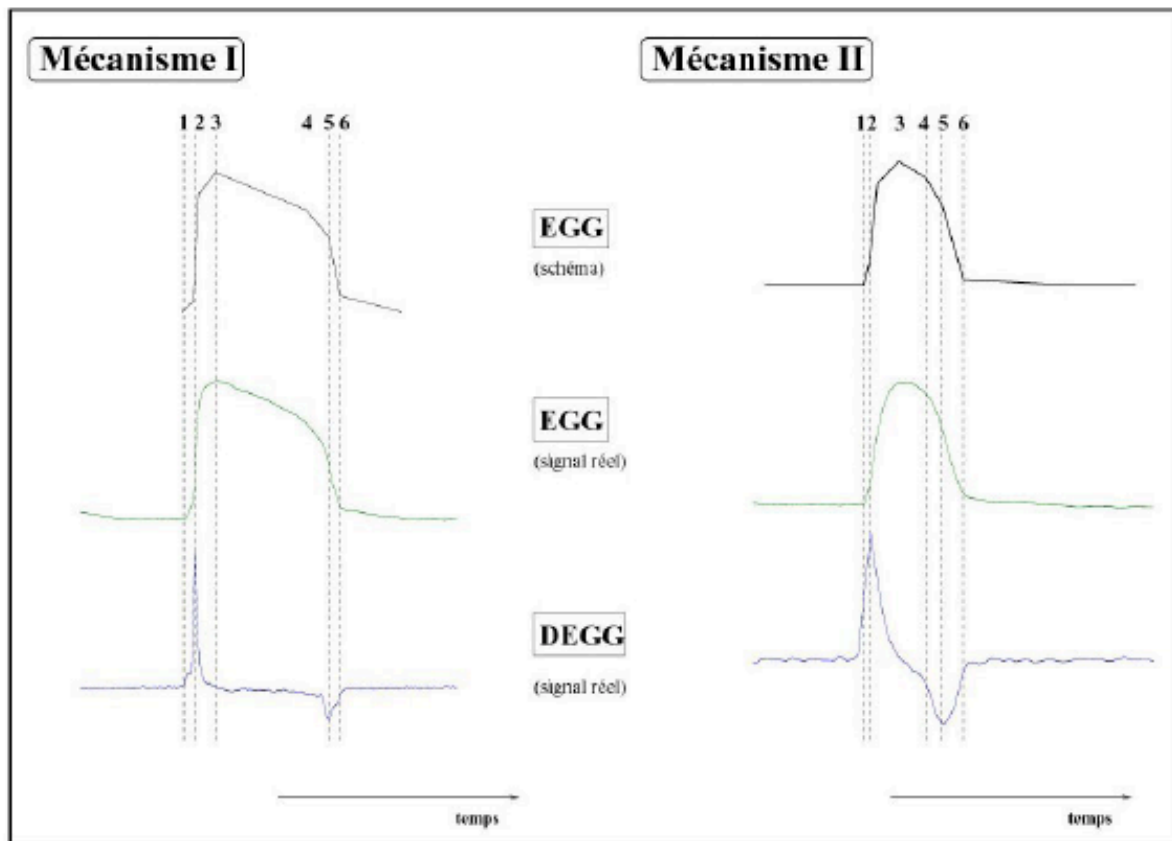


Fig.7: Illustrations du mouvement glottique visualisées sur un signal EGG et sur sa dérivée. (d'après Henrich) [6]

b) Enveloppe des signaux EGG et DEGG:

Lors d'un passage de mécanisme M1 à M2, on observe une diminution rapide de l'enveloppe de l'EGG (ainsi que du DEGG) et le contraire lors d'un passage M2 à M1. Ceci peut être expliqué par le fait que la masse vibrante diminue brusquement dans un passage M1-M2 et au contraire augmente dans le cas M2-M1.

On voit un exemple de chaque saut sur la figure 8

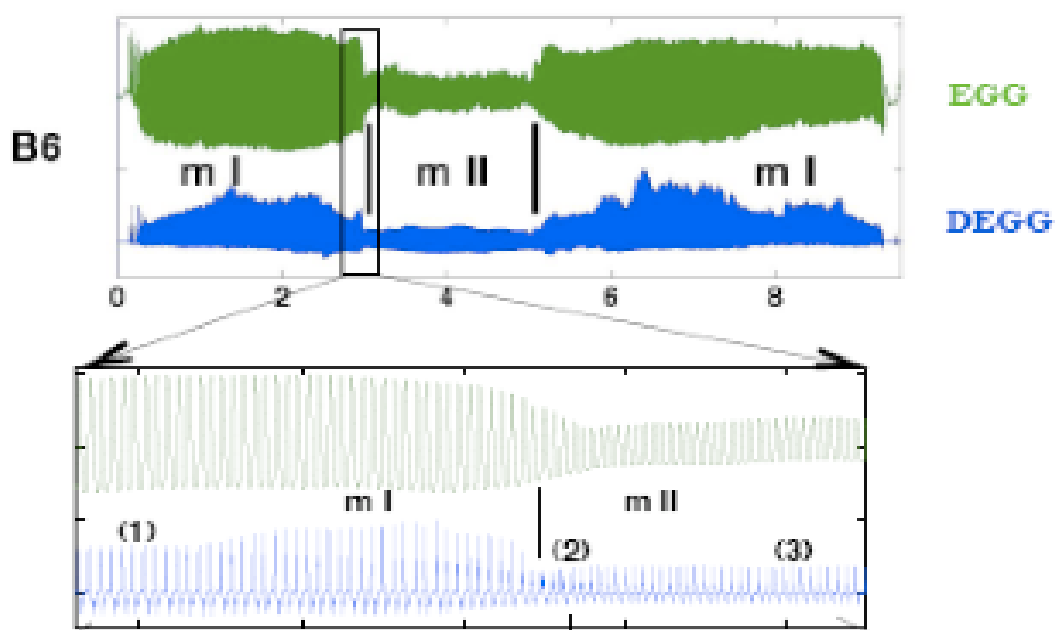


Fig.8: Visualisation de la variation d'enveloppe du signal EGG lors des transitions de mécanismes M1-M2 et M2-M1 (d'après Henrich) [6]

I .2.d : Les phonétogrammes et la zone de recouvrement:

Le but d'un chanteur lyrique est d'obtenir une homogénéité de timbre et d'intensité sur l'ensemble de sa tessiture. Cependant, des études ont montré que pour l'intensité, ce n'est pas atteint (dans le cas des chanteurs étudiés). On observe ces différentes dynamiques sur un phonétogramme (représentation de l'intensité d'un son (ordonnée) en fonction de sa fréquence (abscisse)).

L'élaboration du phonétogramme par mécanisme d'un chanteur se fait en deux temps: on enregistre d'abord, sur chaque note de la tessiture du mécanisme M1, des crescendos et decrescendos, forçant le chanteur à chanter jusqu'à sa limite 'forte' puis sa limite piano (voir figure 9)

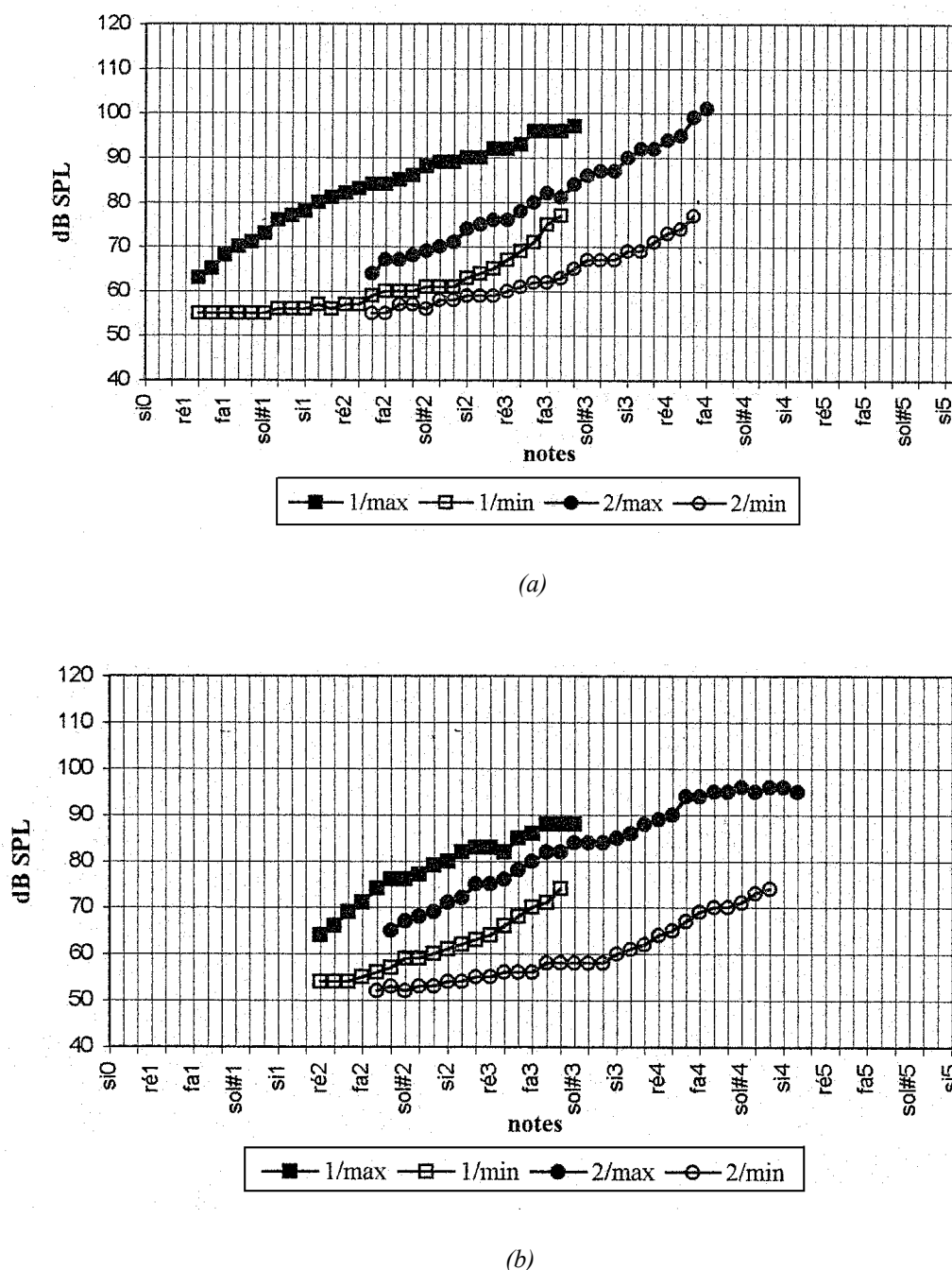


Fig.9: Phonétogrammes moyens sur 21 hommes et 21 femmes par mécanismes pour les hommes (a) et pour les femmes (b). (D'après Roubeau et Castellengo) [12]

On aurait pu penser qu'à une fréquence donnée correspondait un unique mécanisme mais en réalité, une zone de recouvrement, loin d'être négligeable, existe chez les hommes comme chez les femmes. Elle s'étend sur environ une octave, pouvant même aller jusqu'à presque deux octaves pour certains chanteurs. Dans cette zone, le chanteur peut choisir à volonté le mécanisme employé. Cependant, il est à noter que pour une note donnée de la zone de recouvrement des deux mécanismes, la dynamique (donnée de l'intensité minimale et

maximale possible par le chanteur sur une hauteur et dans un mécanisme) n'est pas la même selon le mécanisme choisi. En effet, la zone de recouvrement correspond à l'aigu du M1 et au grave du M2. Ainsi, les tensions sont extrêmement fortes en M1, ce qui impose une intensité plus grande lorsqu'on tire la hauteur vers son maximum. A l'inverse, si on se place dans l'extrême grave du M2, sa dynamique est très faible.

Il est intéressant de remarquer que l'intensité augmente globalement avec la fréquence (autant dans les piani que dans les 'forte'). Ainsi, l'intensité d'un pianissimo à une certaine hauteur ne correspond pas en décibels à celle d'un pianissimo sur une hauteur plus aigüe. Il en est de même pour les autres nuances. Il convient donc de remarquer que les nuances imposées aux chanteurs auront des intensités qui dépendront fortement de la hauteur de la note chantée.

I.3 Etudes précédentes

L'intérêt de notre étude n'est pas l'analyse des mécanismes M1 et M2, lesquels sont fort bien connus désormais, mais la transition d'un état à l'autre.

Physiologiquement, cela est dû à l'action des muscles thyro-aryténoïdiens (voir figure 2). En effet, on remarque que sur un son produit en mécanisme M1 ces muscles participent à la vibration des cordes alors que ce n'est plus le cas en M2. Il y a découplage du muscle thyro-aryténoïdien avec la vibration ce qui implique, lors d'une transition de mécanisme de M1 à M2, une diminution de la masse vibrante [11]. C'est la raison pour laquelle le mécanisme M2 est souvent associé à une sensation de légèreté (d'où son nom parmi certains chanteurs de "mécanisme léger", en opposition avec le mécanisme M1, fréquemment appelé "mécanisme lourd").

L'instabilité de ces transitions est une conséquence d'un changement d'état de système dynamique non linéaire. Une étude sur larynx excisés, menée par Svec [15] et basée sur le film "Vibrating larynx" [17], réalisé par Van den Berg reprend l'hypothèse développée par Titze et al [16] en 1993 sur les modèles de cordes vocales, qui consiste à assimiler les cordes vocales à un système dynamique non-linéaire. On assiste lors d'un changement d'état à un phénomène de bifurcation. La configuration vibratoire change brusquement. Cette hypothèse a été vérifiée sur des larynx excisés: On procède à la mise en vibration des larynx excisés en mécanisme M1. Une fois le système stabilisé, on augmente continûment la tension des cordes. A une tension T_c , on observe un brusque saut de fréquence vers l'aigu, et l'installation d'une nouvelle configuration vibratoire. Le système est passé en mécanisme M2. Puis, on procède à l'inverse à une détente progressive des cordes, et le système, à une tension T_b ($T_b < T_c$), subira une chute de fréquence et repassera en mécanisme M1. Il est intéressant de remarquer que ($T_b < T_c$) et que les sauts de fréquence ne sont pas de mêmes intervalles. Ce phénomène d'hystérésis est une caractéristique des systèmes dynamiques non linéaires.

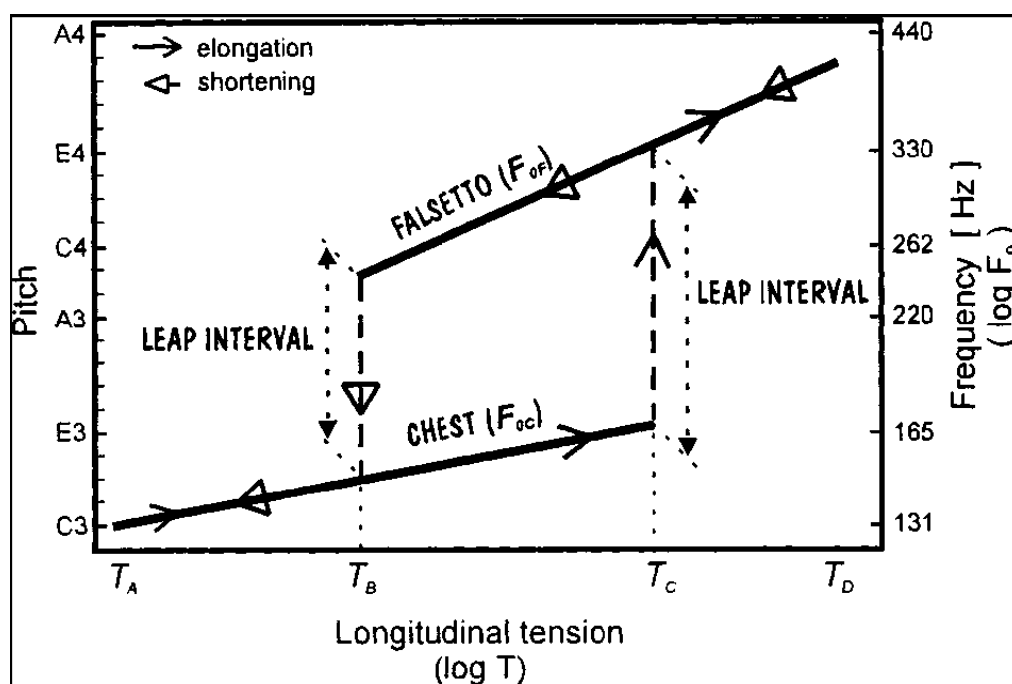


Fig.10: Schéma du phénomène d'hystérésis observé par Svec sur larynx excisés. La tension des cordes vocales est représentée en abscisse (log) et la fréquence du son émis (en Hz) en ordonnée. [15]

Svec avait aussi analysé l'intervalle du saut et surtout les rapports entre les premiers harmoniques lors du saut. Il avait remarqué qu'on obtient, pour la majorité des chanteurs et sur larynx excisés, un rapport rationnel entre le premier harmonique précédant le saut et celui le suivant. Ces analyses des caractéristiques des sauts nous ont donné des pistes à étudier, telles que l'étude de l'intervalle du saut de fréquence et le phénomène d'hystérésis. Cependant, le paramètre intensité n'est pas abordé dans cette étude.

Par la suite, Bloothoofst a mené une étude [1], centrée elle sur l'intensité. Mais les conditions du protocole sont restrictives. En effet, il n'étudie que des hommes, non chanteurs et leur difficulté à pratiquer des sauts M2-M1 a imposé un changement de protocole selon le sens du saut. De plus, les sauts d'un mécanisme à un autre n'ont de conditions que sur la hauteur de départ. On se trouve dans le même cas qu'un saut advenant sur glissando: la fréquence ne subit aucune contrainte et n'importe quel intervalle peut être visé et produit.

Enfin, Roubeau a mené des études très poussées sur les sauts M1-M2 et M2-M1 [14] (avec sujets masculins et féminins) pratiqués sur des glissandos. Mais il a aussi abordé une étude sur sons tenus en 1993 [11], où il critique les études pratiquées sur glissandos. En effet, il remarque que le saut est moins grand lors d'un son tenu puisque le chanteur est forcé de revenir à la note précédant le saut. Cette contrainte empêche les intervalles trop importants qui ne semblent pas naturels mais forcés. Il fit pratiquer à une chanteuse des sons tenus sur différentes intensités de départ et mesura l'intervalle du saut. Il observa une corrélation entre l'intensité de départ et l'intervalle du saut. Cependant, l'étude ne portait que sur les transitions M1-M2 et sur un seul sujet.

Enfin, les deux études portant sur les sauts ont négligé l'effet de la voyelle et cela sans explications connues. Cependant, l'étude des phonétogrammes par mécanismes et voyelles , menée par Sylvain Lamesch [8], montre que la dynamique du mécanisme 1 (principalement) dépend de la voyelle. Si l'intensité est corrélée à l'intervalle du saut, on peut se demander si la voyelle peut avoir une quelconque influence. L'utilisation des différentes voyelles dans le chant Yodel semble confirmer cette hypothèse. C'est pour cette raison que nous n'avons pas négligé ce paramètre.

Le but de ce stage est ainsi d'analyser les caractéristiques d'une transition d'un mécanisme laryngé à un autre, en se restreignant aux deux mécanismes principalement utilisés que sont le M1 et le M2. Les paramètres considérés sont l'intensité, la fréquence, obtenue grâce au signal EGG, et la voyelle.

Chapitre 2: Construction de la base de données

II.1 : Matériel d'enregistrement

II.1.1) Le matériel:

Les enregistrements du protocole ont eu lieu dans le studio son de l'équipe Lutherie, Acoustique et Musique (LAM). Le matériel provient de ce même laboratoire. Le signal sonore est capté par un micro omnidirectionnel B&K. En parallèle, le signal électroglottographique est enregistré. Il est obtenu à l'aide d'un électroglottographe. Ces deux signaux ont été enregistrés sur ordinateur (Macintosh) à l'aide d'une carte son metric halo 2882.

II.1.2) Les enregistrements:

On procède à l'enregistrement d'un son produit par les chanteurs ainsi que du signal l'électroglottographique (EGG). Le son enregistré donne le signal de pression acoustique émis par le chanteur. La fréquence d'échantillonnage de l'enregistrement est 44100 Hz sur 16 bits. Le signal de pression enregistré pendant toute la session est ensuite calibré à l'aide d'un son de référence (son de calibration), enregistré avant l'enregistrement du protocole lui-même. Il est demandé au chanteur de produire un son à une intensité la plus constante possible. Durant ce son, on place un sonomètre conjointement au micro d'enregistrement, (qui est placé à 30cm du chanteur) et on relève l'intensité perçue à cette distance. Il sera alors possible de connaître de manière assez précise l'intensité produite durant l'ensemble de la session.

On procède en parallèle à l'enregistrement de l'EGG, aux mêmes fréquences d'échantillonnage et aux mêmes nombres de bits.

II.2: Protocole

Une fois le matériel en place, le protocole est expliqué en détails au chanteur. Il lui est demandé de pratiquer des sons tenus sur la voyelle /a/ et différentes intensités (3 ou 4 selon les possibilités des chanteurs), en passant en alternance quatre fois d'un mécanisme à l'autre (M1-M2-M1-M2-M1) en maintenant la fréquence constante sur les deux mécanismes. On obtient alors sur chaque note (et pour chaque intensité) deux sauts M1-M2 et deux autres M2-M1. Afin d'obtenir les sauts sur l'ensemble de la zone de recouvrement des deux mécanismes, la session d'enregistrement commence sur une note centrale de cette zone (autour du Do3 habituellement) afin que le chanteur puisse ensuite descendre ton par ton jusqu'à sa limite propre. Une fois cette limite atteinte, le chanteur change de voyelle et recommence cette procédure sur /o/, puis /i/.

Seulement une fois l'enregistrement du grave de sa zone de recouvrement enregistrée, le chanteur repart un ton plus haut que la toute première note produite sur /a/ et monte ton par ton jusqu'à sa limite supérieure. Une fois atteinte, il recommence sur /o/ et /i/.

Le chanteur a ainsi balayé l'ensemble de sa tessiture commune aux deux mécanismes sur 3 voyelles et, pour chaque note, sur plusieurs intensités différentes.

Chaque chanteur enregistré avait une zone de recouvrement s'étendant entre 5 tons et 12 tons. Le protocole enregistre donc entre 35 et 120 sons tenus, lesquels contiennent chacun plusieurs sauts M1-M2 et M2-M1 (dans les meilleurs des cas).

II .3 : Les chanteurs

Nous avons décidé de mener cette étude en prenant des chanteurs des deux sexes. Nous en avons enregistré 7 (3 hommes et 4 femmes), mais au final, seulement 5 ont donné une base de donnée exploitable (3 hommes et 2 femmes). A cause de la difficulté d'exécution du protocole, la connaissance et la maîtrise des deux mécanismes étaient indispensables. En effet, les bases de données de certains chanteurs moins à l'aise se sont révélées insuffisantes pour l'exploitation et l'analyse, le nombre d'intensités différentes produites ainsi que l'ambitus de la zone de recouvrement se trouvant considérablement réduits. Un premier tri des chanteurs est donc pratiqué à l'issue de la séance d'enregistrement, si le chanteur a des difficultés de passage entre les deux mécanismes sur commande.

On aura auparavant procédé à l'enregistrement des phonétogrammes des deux mécanismes du chanteur (M1 et M2) sur 3 voyelles différentes (/a/, /o/, /i/). Nous avons ainsi une idée précise de la zone de recouvrement du chanteur ainsi que de sa dynamique avant l'enregistrement du protocole.

Il est très important de souligner que de soumettre des chanteurs à un protocole aussi peu musical a dérangé certains chanteurs, notamment les moins familiarisés avec leurs deux mécanismes et ceux qui n'avaient pas l'habitude de passer de l'un à l'autre ni de les distinguer.

La durée des sessions d'enregistrement fut variable selon les chanteurs, mais globalement plus longue pour les femmes que pour les hommes, celles-ci étant moins (voire pas du tout) confrontées aux problèmes des changements de mécanismes laryngés. Certains chanteurs (de formation lyrique) ont trouvé le protocole dérangeant et difficile car il va à l'encontre de leurs habitudes. En effet, un chanteur lyrique tente de masquer les sauts et certains même évitent de changer de mécanisme dans une phrase musicale en choisissant en début de la phrase le mécanisme le mieux adapté.

Chapitre 3: Analyse des données

III .1 : Découpage des sessions et estimation de paramètres

La base de données finale doit permettre d'obtenir facilement les variations de fréquence et d'intensité durant le saut, et ce pour chaque hauteur, intensité et voyelle enregistrées.

Pour cela, on a procédé à un découpage du fichier son et du fichier EGG de la session totale de chaque chanteur, afin de séparer et ranger les sauts pratiqués sur hauteurs différentes, selon l'intensité et la voyelle. Le découpage des sons et EGG a été effectué sur le logiciel Audacity.

Principalement, l'étude a porté sur l'estimation de la fréquence et de l'intensité. Autant l'intensité n'a posé aucun problème pour son estimation, autant il a fallu choisir une méthode d'estimation de la fréquence qui soit précise et ne moyenne pas. En effet, le but de l'étude étant d'analyser des variations subites de fréquence, toute moyenne aurait faussé les résultats.

L'estimation de la fréquence : Comme précédemment dit dans le chapitre I.2.c, un cycle glottique correspond à une période, laquelle est l'inverse de la fréquence perçue. Les pics de fermeture étant particulièrement marqués (plus que les pics d'ouverture), en les détectant tous, on peut suivre avec précision l'évolution de la fréquence. Il est à noter que le terme de fréquence est un abus de langage puisque les transitions sont fortement abruptes et la fréquence varie autour du saut d'une période à l'autre. Or la fréquence est une notion basée sur la durée et la périodicité d'un signal. C'est en raison de cette instabilité que l'on ne parle pas dans cette étude de période glottique mais de cycle, puisque l'on étudie des instabilités.

III .2 : Détection des instants de fermeture glottique (gci):

Les instants de fermeture glottique sont représentés par un pic très marqué du DEGG. Une méthode a été mise au point par Henrich [6] afin de détecter ces pics de fermeture appelés gci (glottal closed instant). Cette méthode repère les pics situés au-dessus d'un certain seuil, par intercorrélation avec une fonction peigne d'impulsion gaussienne de même largeur que le signal DEGG. Cependant, cette méthode a été développée pour des sons de fréquence assez stable. Or, cette stabilité n'est pas présente lors d'un saut. La fréquence variant très brusquement, il a été indispensable d'étiqueter à la main la majorité des sauts.

De plus, durant la période de transition, le DEGG perdait parfois de précision. On observait:

1°) des pics moins marqués

2°) de fréquents dédoublement de pics de fermeture

Le dédoublement de pics est un phénomène récurrent lors d'une transition de mécanismes, et ce phénomène est visible sur l'ensemble des chanteurs étudiés.

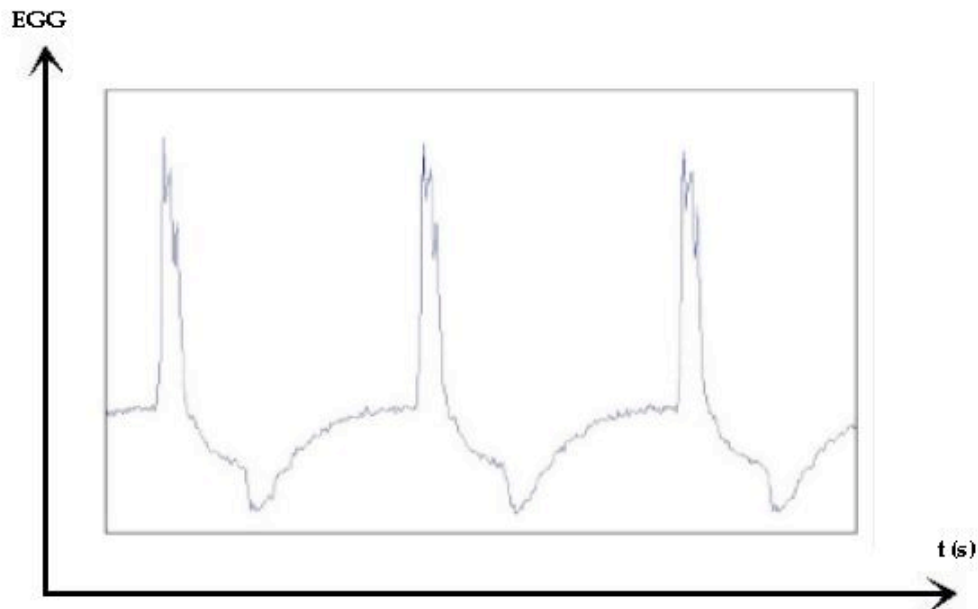


Fig. 11: Exemple de dédoublements de pics de fermeture, chanteur 1

3°) des pertes de détection d'accolements de durée plus ou moins longue

Il faut cependant distinguer deux types de pertes de détection d'accolement:

-Lors de la transition d'un mécanisme à l'autre, le système oscille entre deux états et subit une durée de chaos plus ou moins longue. Dans cette période, les cordes vocales ne s'accrochent plus. Ce type de perte d'accolement est très court (quelques périodes à peine durant lesquelles l'EKG peut perdre sa régularité). Pendant cette période de chaos, pour un instant, il n'y a pas de son. On convient alors de ne rien détecter pendant ces périodes. (voir exemple figure 12)

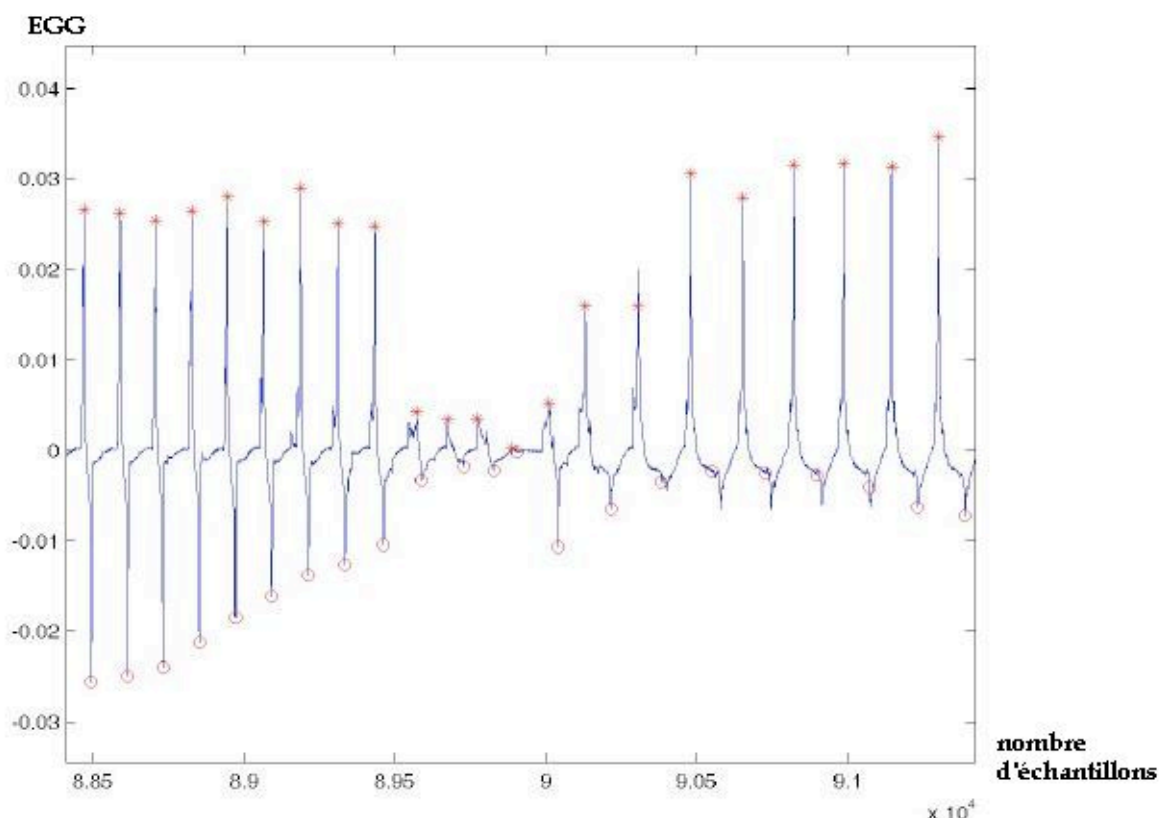


Fig.12: exemple d'un moment de chaos lors d'un transition M2-M1. Les gci détectés par l'algorithme sont représentés par les astérisques. L'algorithme détecte aussi les goi (instants d'ouverture de la glotte), qui sont représentés par des ronds.

On remarque sur cette figure que l'algorithme ne redevient pas précis immédiatement après la fin de la zone de chaos car il se base en chaque instant sur les pics détectés peu avant. Ainsi, il lui faut un certain temps, variable selon les cas, pour détecter de nouveau correctement les pics.

-Il existe en opposition des périodes de chaos où l'on perçoit un son. Elles se situent aussi dans les zones de transition de mécanismes et sont caractérisées par un EGG périodique mais sinusoïdal (il n'y a plus de pics de fermeture). Elles apparaissent le plus souvent dans les piani des chanteurs en M2. En effet, en mécanisme M2, la masse vibrante est réduite ce qui implique une phase de fermeture moins marquée, et d'autant plus si le chanteur réduit encore cette masse en chantant piano. La phase de fermeture n'est alors plus détectée par l'EGG. Ces "pertes d'accolement" peuvent être longues. On considère qu'un saut est raté si la durée de non détection d'accolement est trop longue.

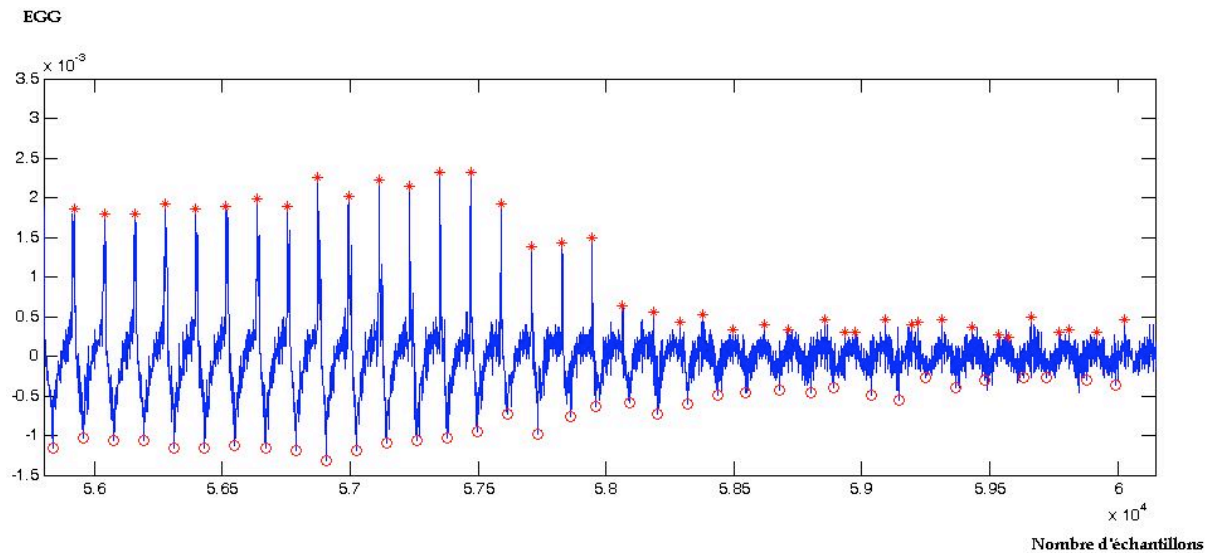


Fig.13: Exemple de non détection d'accolement sur un pianissimo du chanteur 1, sur un fa#3 et la voyelle /a/. On observe que la perte d'accolement dure plus que quelques périodes et que l'algorithme détecte au hasard après la transition.

Nous verrons dans le chapitre suivant une méthode d'estimation de la fréquence qui ne sera pas biaisée par des problèmes de détections d'instant de fermeture.

III .3 : Estimation de la fréquence fondamentale

Pour estimer la fréquence à partir des instants de fermeture glottique, on calcule l'inverse de la différence de temps entre deux instants de fermeture consécutifs, ce qui correspond à l'inverse du temps d'un cycle. On peut voir l'estimation de la fréquence d'un son tenu sur la figure 14.

fréquence (Hz)

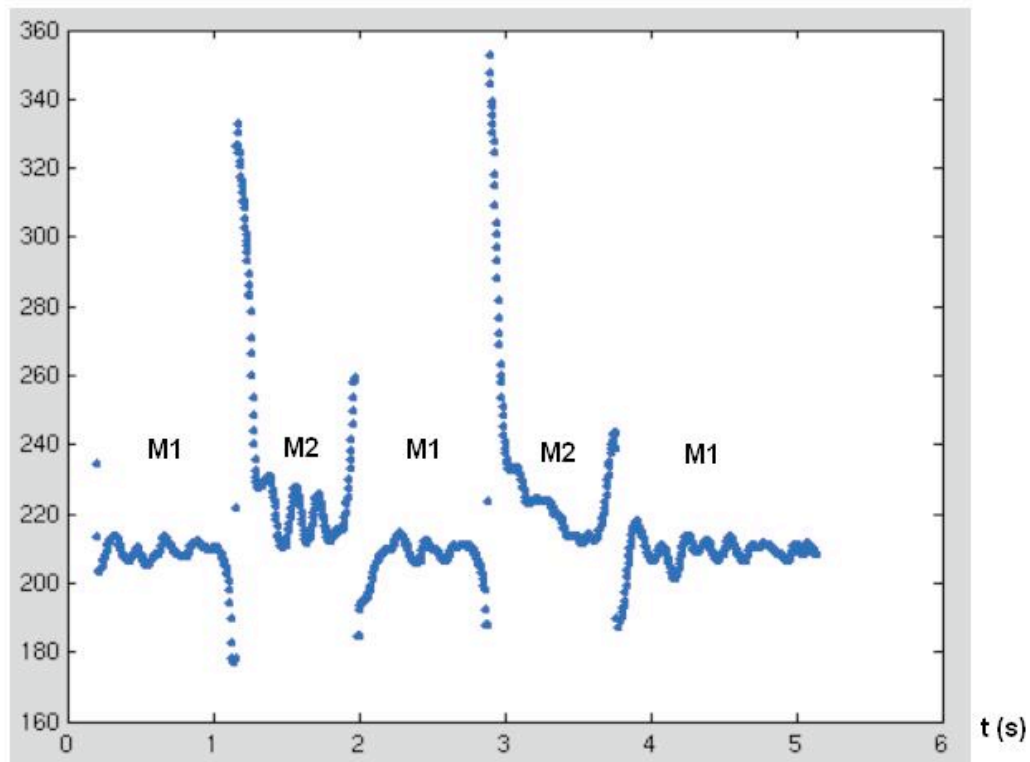


Fig.14: Estimation de la fréquence fondamentale du son tenu par le chanteur 4, sur la hauteur La b, à la nuance 'forte', et sur la voyelle /a/.

Comme nous avons remarqué dans le paragraphe précédent, l'étiquetage des gci peut provoquer d'abruptes variations de fréquences. Afin de remédier à cela, nous avons convenu de passer un filtre médian sur la courbe de fréquence. Cela a eu pour conséquence de lisser les courbes de fréquence sur les zones troublées par les dédoublements de pics et les courtes non détections d'accolement (un saut avec une trop longue durée de non détection d'accolement est considéré comme raté). Afin de ne pas risquer de fausser les résultats, l'étiquetage des gci est pratiqué avec un soin particulier dans les zones de transitions. Nous avons vérifié par la suite que le filtre médian n'avait aucune influence sur l'intervalle des sauts.

On remarque, pour tous les chanteurs enregistrés, une forme d'anticipation en fréquence du saut. Par exemple, sur la figure 14, lors du premier passage M1-M2, la fréquence chute avant le passage. On observe par ailleurs que les intervalles des sauts sont alors des rapports entiers, comme l'avait déjà remarqué Svec [15]. Cette anticipation des sauts est aussi présente sur les glissandos, ce qui laisse à penser que ce n'est pas une anticipation motrice du chanteur mais plus un effet mécanique du système dynamique.

III.4 : Calcul de l'intensité:

Le signal sonore était échantillonné à 44100Hz. Le relevé de l'intensité du son de calibration permet de connaître en chaque échantillon l'intensité réelle, perçue à 30 cm du chanteur (à la place du microphone).

L'intensité du signal sonore est déterminé par:

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

avec:

$p_c(t)$ (la pression au niveau du microphone)

$p_0 = 2.10^{-5}$ Pa

Afin de simplifier l'utilisation des données pour la suite, nous avons décidé de relever les intensités dans les instants de fermeture. L'intensité n'étant pas relevée en ces temps lors de l'enregistrement, on procède à une interpolation de l'intensité dans les temps de fermeture de la glotte.

III.5: Etiquetage des sauts:

Afin de pouvoir analyser les sauts, il faut d'abord les détecter. Pour cela, on place des points sur la courbe de fréquence obtenue. L'étiquetage des sauts sur la courbe de fréquence se fait à la main. L'algorithme, établi en fonction de cet étiquetage, prévoit d'éliminer les sauts ratés. On considère qu'un saut est raté si:

- lors de la transition on observe une longue durée sans détection d'accolement.
- le saut est trop lent (ce qui sous-entend un saut non mécanique et souvent un non changement de mécanisme)
- le chanteur repasse dans le mécanisme qu'il vient de quitter immédiatement, avant d'avoir stabilisé le nouveau mécanisme.

Pour cela, on place sur la courbe de fréquence un premier point servant de seuil en ordonnée. Puis, on place des points qui discriminent les zones stables des zones de transition de mécanisme (voir figure 15) On considère que le saut commence lorsque la fréquence varie sensiblement selon l'anticipation énoncée précédemment et qu'il se termine lorsque la fréquence redevient stable. On peut ainsi calculer la fréquence avant et après le saut (en moyennant sur les zones stables).

Pour n sauts, on place $2n+3$ points.

Pour ce qui est du calcul de l'intervalle d'un saut p , on procède à la dérivée de la fréquence et on cherche, dans la zone du saut p , délimité entre le point $2p+1$ et $2p+2$, l'instant n_0 de maximum de variation de fréquence.

Dans le cas d'un saut M1-M2, le saut est positif et l'on calcule alors la fréquence maximale après n_0 moins la fréquence minimale avant n_0 .

Dans le cas d'un saut M2-M1, le saut est négatif et l'on calcule la fréquence minimale après n_0 moins la fréquence maximale avant n_0 .

Dans le cas d'un saut raté, on place les deux points encadrants le saut sous le seuil (ordonnée du premier point placé)



Fig.15:Schématisation de l'étiquetage des sauts sur un son tenu comportant deux sauts de chaque sens (M1-M2 et M2-M1).

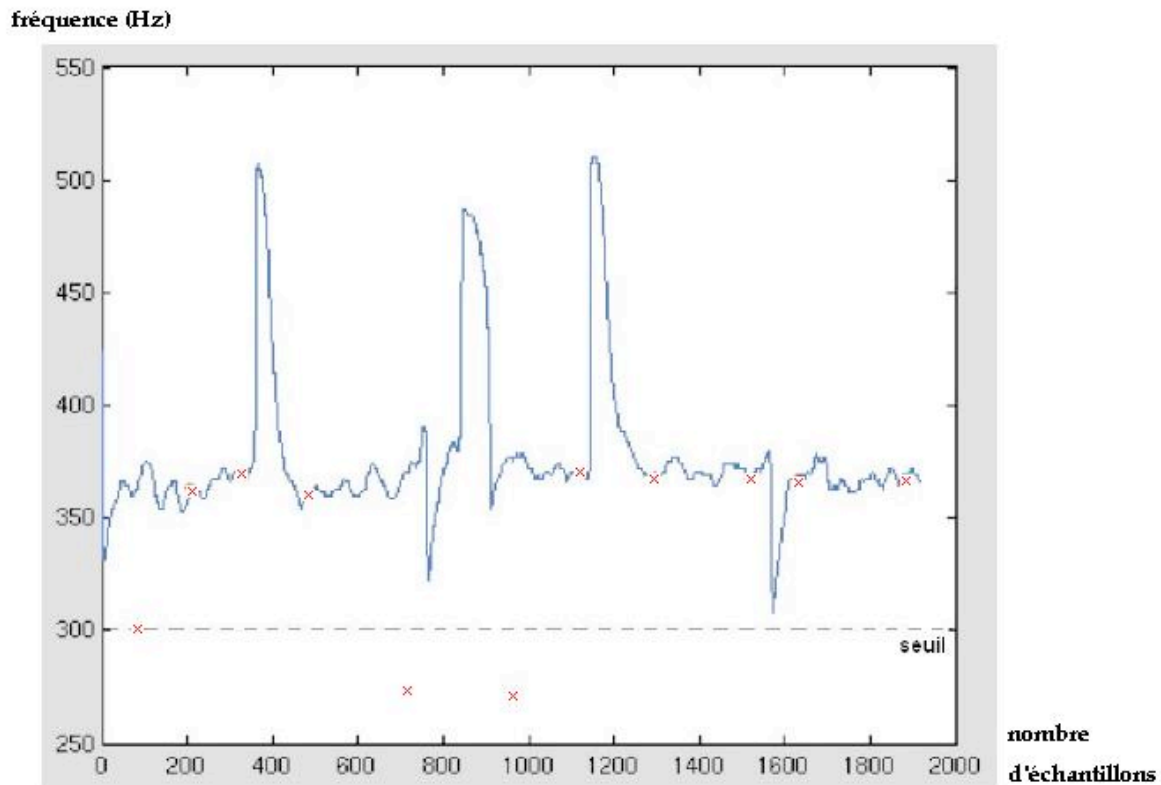


Fig.16: Exemple d'un saut raté (le deuxième) dans la production du chanteur 4 sur la voyelle /a/, à intensité forte, sur un fa#3.

Il faut noter que la diversité des cas de sauts ratés ou de récupération de la fréquence rend l'étiquetage difficile, même à la main. C'est la raison pour laquelle nous n'avons pas développé de méthode pour détecter les sauts et faire ainsi un étiquetage automatique.

III.6: Base de données

Au final, pour chaque son, catalogué selon le chanteur, la nuance, la hauteur et la voyelle choisis, on enregistre sous une structure Matlab, pour chaque chanteur et pour chaque saut:

- la fréquence stable avant et après la saut
- l'intervalle du saut
- l'intensité stable avant et après le saut
- la variation d'intensité
- la voyelle, nuance, hauteur du son tenu

IV: Résultats

IV.1: Etude des variations de fréquence au cours des transitions de mécanismes laryngés:

L'analyse de la base de données construite permet d'étudier les intervalles produits lors des sauts et les influences des paramètres mesurés qui sont donc l'intensité, la hauteur et la voyelle. Nous étudierons aussi les interactions entre certains de ces paramètres.

Les précédentes études distinguaient les conditions selon le sens de transition. Dans cette étude, nous confronterons le plus souvent possible les deux sens, afin de pouvoir vérifier l'hypothèse d'une dissymétrie entre les deux, ainsi que le permet l'élaboration du protocole qui ne les distingue pas.

IV.1.1: Influence de l'intensité :

Les précédentes études citées ci-dessus avaient déjà révélé une corrélation certaine entre l'intervalle du saut (Δf) et l'intensité de départ. Notre but est de préciser cette corrélation. Nous étudierons d'abord Δf en fonction de l'intensité puis en fonction de la nuance exprimée par le chanteur.

En effet, l'étude des phonétogrammes démontre que les limites inférieures et supérieures du phonétogramme peuvent être assimilées par régression linéaire à des droites de pentes positives. L'intensité SPL étant directement corrélée à la fréquence, la représentation de l'intensité par les nuances permettrait une décorrélation intensité/fréquence. L'étude selon la nuance permet ainsi de comparer les intervalles des sauts en fonction d'une variation d'intensité qui ne sera pas biaisée par la corrélation avec la fréquence.

Il est nécessaire de remarquer que l'évolution de la nuance avec la fréquence, dans un mécanisme donné, est propre au chanteur. Elle dépend entièrement de ses possibilités dynamiques sur les hauteurs et dans le mécanisme considéré (voir schéma ci-dessous).

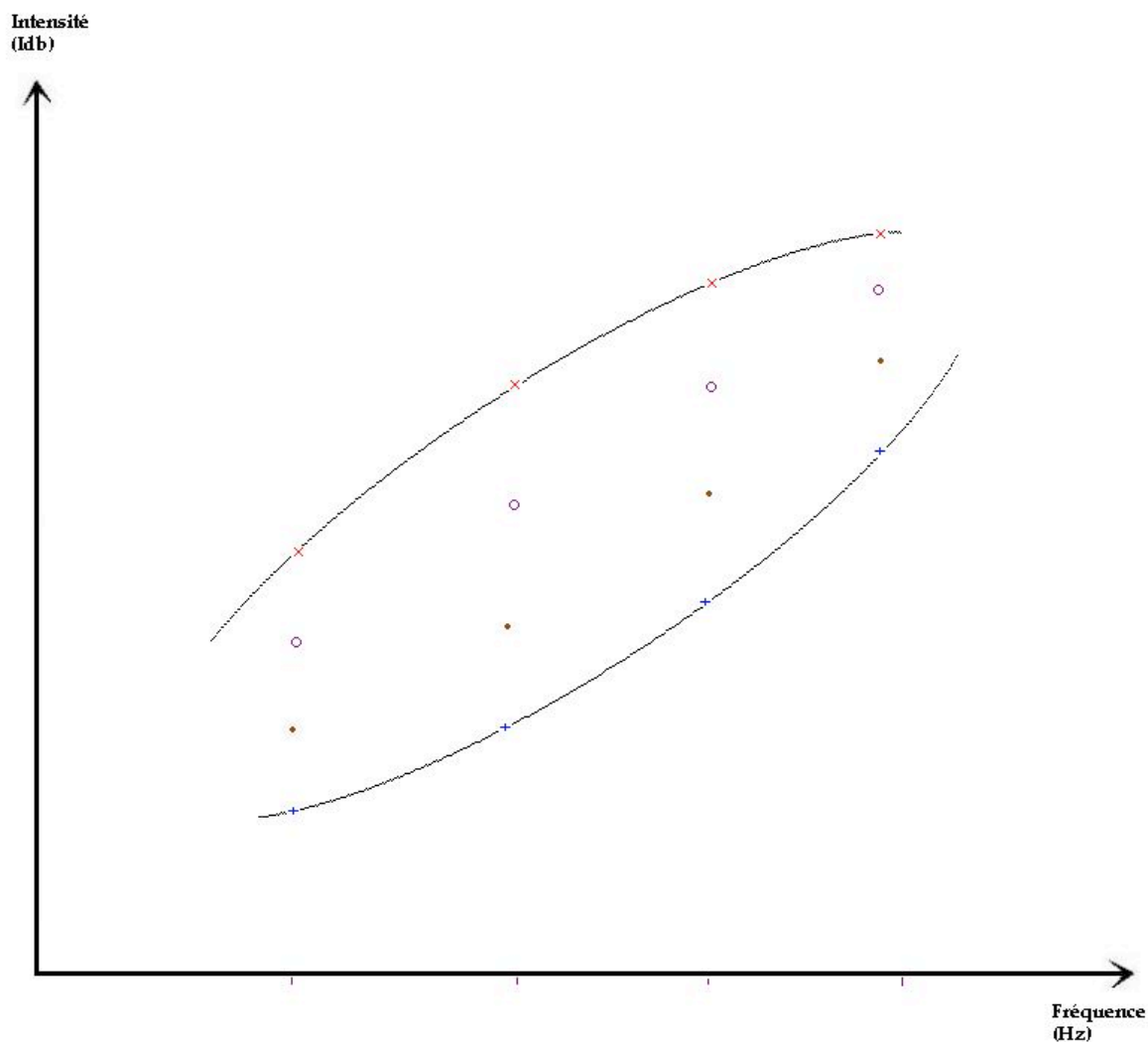


Fig.17: Schéma de l'évolution des nuances en fonction de la fréquence, placées sur un phonétogramme. Chaque symbole correspond à une nuance (les '+' sont les sons 'piani', les points sont les 'mezzo-forte', les ronds sont les 'forte' et les croix sont les 'fortissimi').

Le schéma ci-dessus montre l'évolution de l'intensité de la nuance en fonction de la fréquence: les nuances deviennent plus intenses lorsque la fréquence augmente (un pianissimo sur une note grave sera ainsi moins intense qu'un pianissimo sur une note aigüe, mais on perçoit la nuance pianissimo plutôt que son intensité).

Ainsi, la perte de précision quand à l'évolution de l'intensité nous permet par ailleurs de ne plus tenir en compte la hauteur de départ.

C'est dans l'optique de cette étude que nous avons demandé aux chanteurs de suivre le protocole dans plusieurs nuances (entre 3 et 5 selon les possibilités) plutôt que de leur imposer une gamme d'intensités fixes pour toutes les fréquences et pour tous les chanteurs, sans tenir compte des différentes possibilités de chacun.

1°) Etude de l'influence du SPL

Nous avons tout d'abord étudié les variations de Δf selon l'intensité, et ce pour toutes les hauteurs de départ et pour les 3 voyelles. Le graphique ci-dessous présente les sauts de mécanisme M1-M2 pratiqués par le chanteur 4 sur Sib 2.

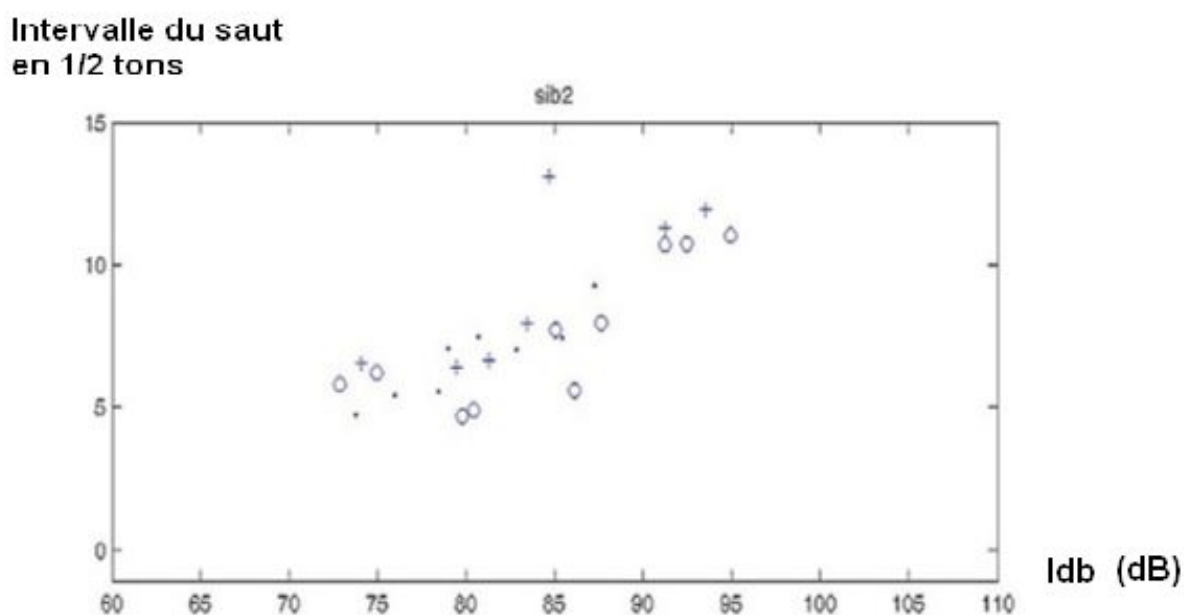


Fig.18: Représentation des sauts de fréquence en demi-tons, dans le sens M1-M2, du chanteur 4 sur la note Sib 2, en fonction de l'intensité précédant le saut. On différencie les voyelles utilisées: les sauts sur /a/ sont représentés par des ronds, ceux sur /i/ par des points et ceux sur /o/ par des croix.

Pour ce qui est des sauts M2-M1, l'analyse du même type que pour M1-M2 n'a pas donné de résultat marquants. Il semble que les résultats soient fort aléatoires et l'on ne puisse distinguer aucune tendance particulière. En effet, la faible dynamique du mécanisme M2 dans la zone de recouvrement n'a pas permis aux chanteurs de pratiquer de véritables différences d'intensité en mécanisme M2 lors des enregistrements. Nous avons ainsi classé les nuances des sons tenus par celles pratiquées en M1, lesquelles étaient plus variées.

Il nous a semblé alors intéressant d'étudier les sauts M2-M1 en fonction de l'intensité suivant le saut (i.e. celle pratiquée en M1).

Le graphe ci-dessous représente ainsi les sauts M2-M1 du chanteur 4, pratiqués sur la note Sib pour toutes les intensités d'arrivée en M1 et sur les 3 voyelles (les symboles des voyelles sont identiques).

saut de fréquence
en 1/2 tons

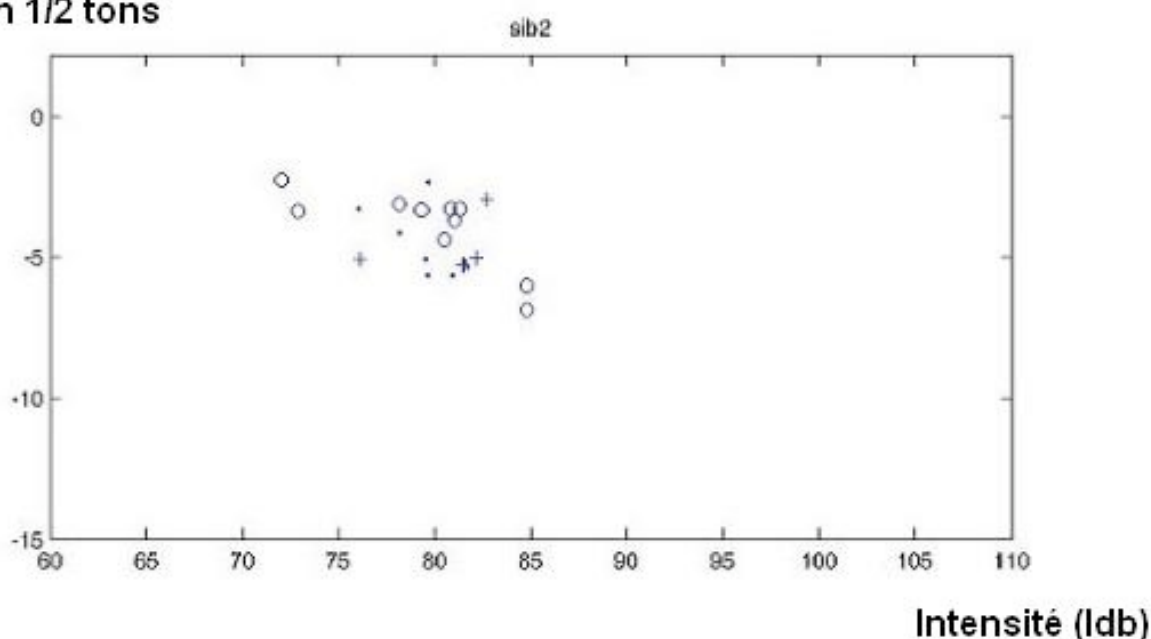


Fig.19: Représentation des sauts de fréquence en demi-tons, dans le sens M2-M1, du chanteur 4 sur la note Sib2, en fonction de l'intensité suivant le saut.

Pour toutes les autres hauteurs enregistrées, on remarque cette tendance d'augmentation du saut avec l'intensité de départ pour les sauts M1-M2 et celle d'arrivée pour les sauts M2-M1. Cela est visible pour l'ensemble des chanteurs analysés.

Cette illustration de l'hypothèse soutenant l'influence de l'intensité fut vérifiée par la suite par le calcul des moyennes de Δf par tranches d'intensités (intensité de départ en M1-M2 et suivant le saut pour M2-M1) croissantes de 10 dB.

Le tableau 1 présente les résultats pour les sauts M1-M2 et le tableau 2 ceux pour les sauts M2-M1. On représente dans la dernière ligne le résultat d'un test statistique d'étude de la variance, ANOVA qui vérifie ici l'influence de l'intensité.

Le test ANOVA calcule la probabilité p de l'hypothèse H_0 (hypothèse que le paramètre étudié n'a pas d'influence, ce qui suppose des moyennes équivalentes lorsque le paramètre varie). Plus p diminue et tend vers 0, plus on peut supposer l'hypothèse H_0 fausse, ce qui implique qu'au moins une moyenne considérée est éloignée des autres.

Les niveaux de significativité du test sont symbolisés: 'ns' lorsque $p > 0.1$, un point pour $p < 0.1$, une astérisque pour $p < 0.05$, deux astérisques pour $p < 0.01$ et trois astérisques pour $p < 0.001$. Le nombre croissant d'astérisques donne une significativité croissante quand à l'influence du paramètre test.

Dans le sens M1-M2:

	chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
ldb < 85	1.79 (1890)	1.56 (1001)	3.03 (620)	4.92 (1784)	2.33
85 <ldb< 95	1.95 (1275)	2.06 (857)	4.16 (443)	5.82 (1498)	3.27
95<ldb<105	1.76 (2183)	2.12 (1499)	4.80 (0)	7.32 (4548)	n
105<ldb	n	2.28 (0)	n	n	n
niveau de significativité	***	*	***	**	*

Tableau 1: moyennes (écarts-types) de Δf en 1/2 tons, dans le sens M1-M2, selon l'intensité croissante, pour les 5 chanteurs. (n signifie que le chanteur n'a pas pratiqué de sauts à la nuance considérée) La dernière ligne fait part des résultats du test ANOVA sur l'influence de l'intensité. Les tableaux précis des résultats obtenus par le test ANOVA sont disponibles en annexe. (n signifie que le chanteur n'a pas pratiqué de sauts à l'intensité considérée)33334

L'augmentation de Δf avec l'intensité semble être validée dans le sens M1-M2.

Dans le sens M2-M1:

chanteurs ldb	chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
ldb < 85	-0.92 (1347)	-1.76 (622)	-2.32 (378)	-3.32 (1213)	-0.81
85 <ldb< 95	-1.14 (1766)	-1.85 (1019)	-2.70 (700)	-4.85 (1805)	-0.50
95<ldb<105	-1.34 (2253)	-2.07 (1124)	-2.43 (530)	-5.05 (293)	n
105<ldb	-1.85 (520)	n	n	n	n
niveau de significativité	ns	ns	ns	**	*

Tableau 2: moyennes (écarts-types) de Δf en 1/2 tons, dans le sens M2-M1, selon l'intensité croissante, pour les 5 chanteurs. (n signifie que le chanteur n'a pas pratiqué de sauts à la nuance considérée) La dernière ligne fait part des résultats du test ANOVA sur l'influence de l'intensité. Les tableaux précis des résultats obtenus par le test ANOVA sont disponibles en annexe. (n signifie que le chanteur n'a pas pratiqué de sauts à l'intensité considérée)

La corrélation semble être présente dans les deux sens des sauts, cependant, les calculs des moyennes et écarts-types et les résultats du test ANOVA semblent démontrer que la corrélation est moins importante dans le sens M2-M1 et l'influence moins significative. En effet, on observe que pour tous (à divers degrés) le test de variance a un niveau significatif pour le sens M1-M2, alors que dans le sens M2-M1, ce n'est le cas que pour les chanteurs 4 et 5. Une base de données plus importante semble nécessaire afin d'étudier la tendance générale des sauts M2-M1 et, ainsi, de la déterminer.

2°) Etude de l'influence de la nuance :

Comme nous l'avons expliqué plus haut, l'étude de l'influence de la nuance au lieu de l'intensité a pour effet de décorrélérer l'intensité de la fréquence du son. Cette étude peut ainsi nous permettre de constater si l'augmentation de l'intensité a des conséquences sur Δf sans pour autant avoir à distinguer les fréquences précédant les sauts. Ce qui n'est pas le cas de l'intensité.

Nous pourrions par la suite confronter les deux résultats et déterminer si la corrélation intensité/hauteur a de l'importance.

Pour cela, nous avons calculé pour chaque chanteur et chaque nuance la moyenne des sauts et les écarts-types, sur l'ensemble des voyelles et des hauteurs (résultats disponibles en annexe).

Intervalle du saut
en 1/2 tons

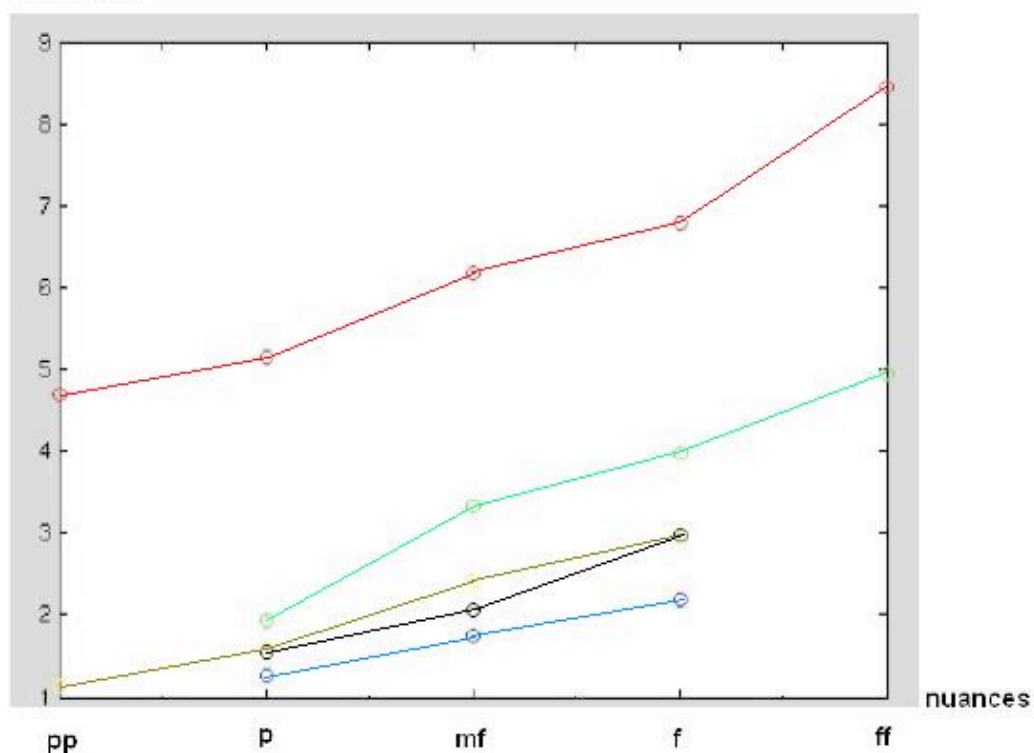
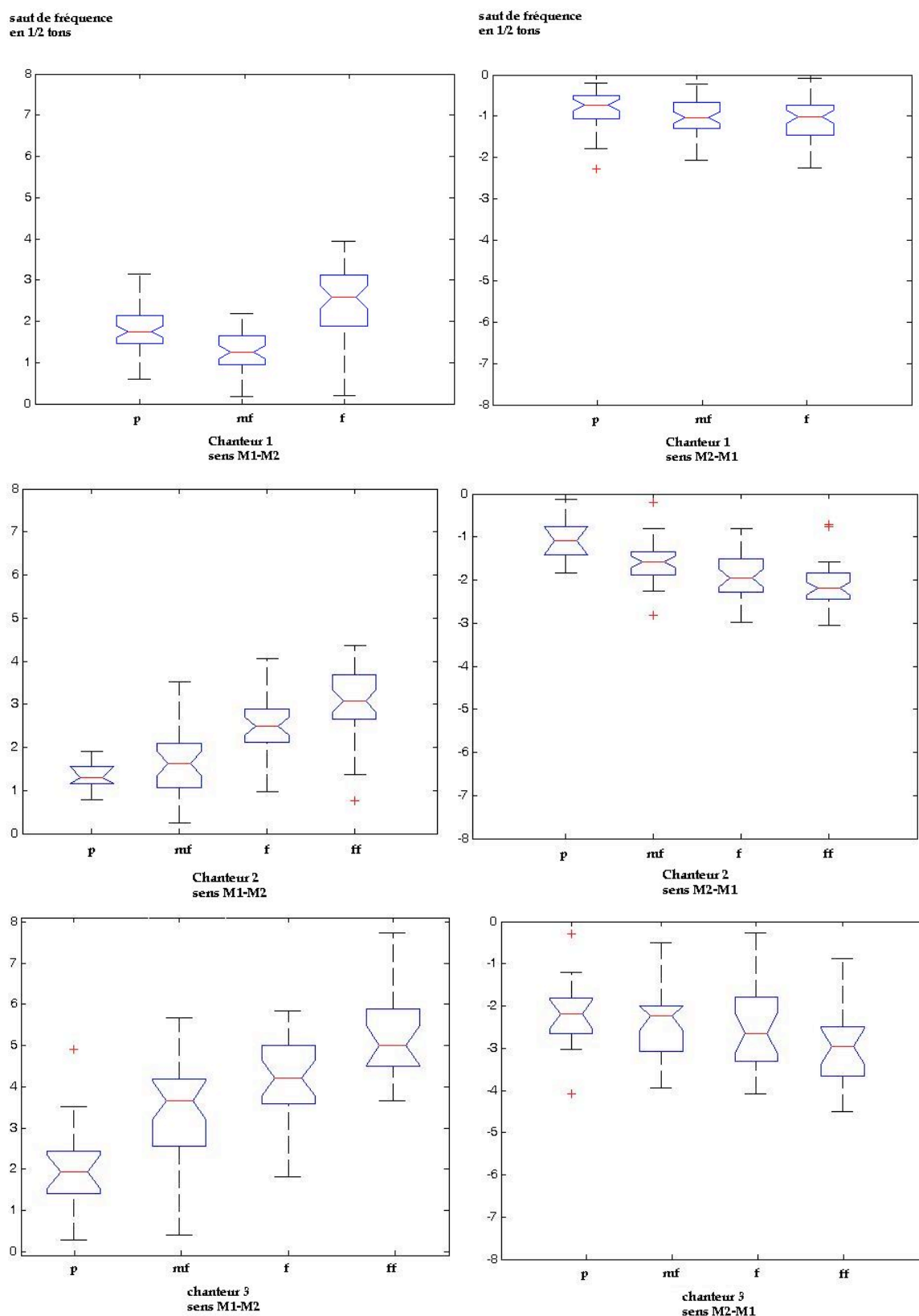


Fig.20: Représentation graphique de l'évolution des moyennes de Δf en fonction de la nuance choisie. Superposition pour les différents chanteurs (chaque couleur correspond à un chanteur)

La figure suivante représente les schémas des valeurs médianes, de l'intervalle interquartile et des valeurs supérieures et inférieures adjacentes de l'intervalle des sauts en demi-tons en fonction de la nuance.



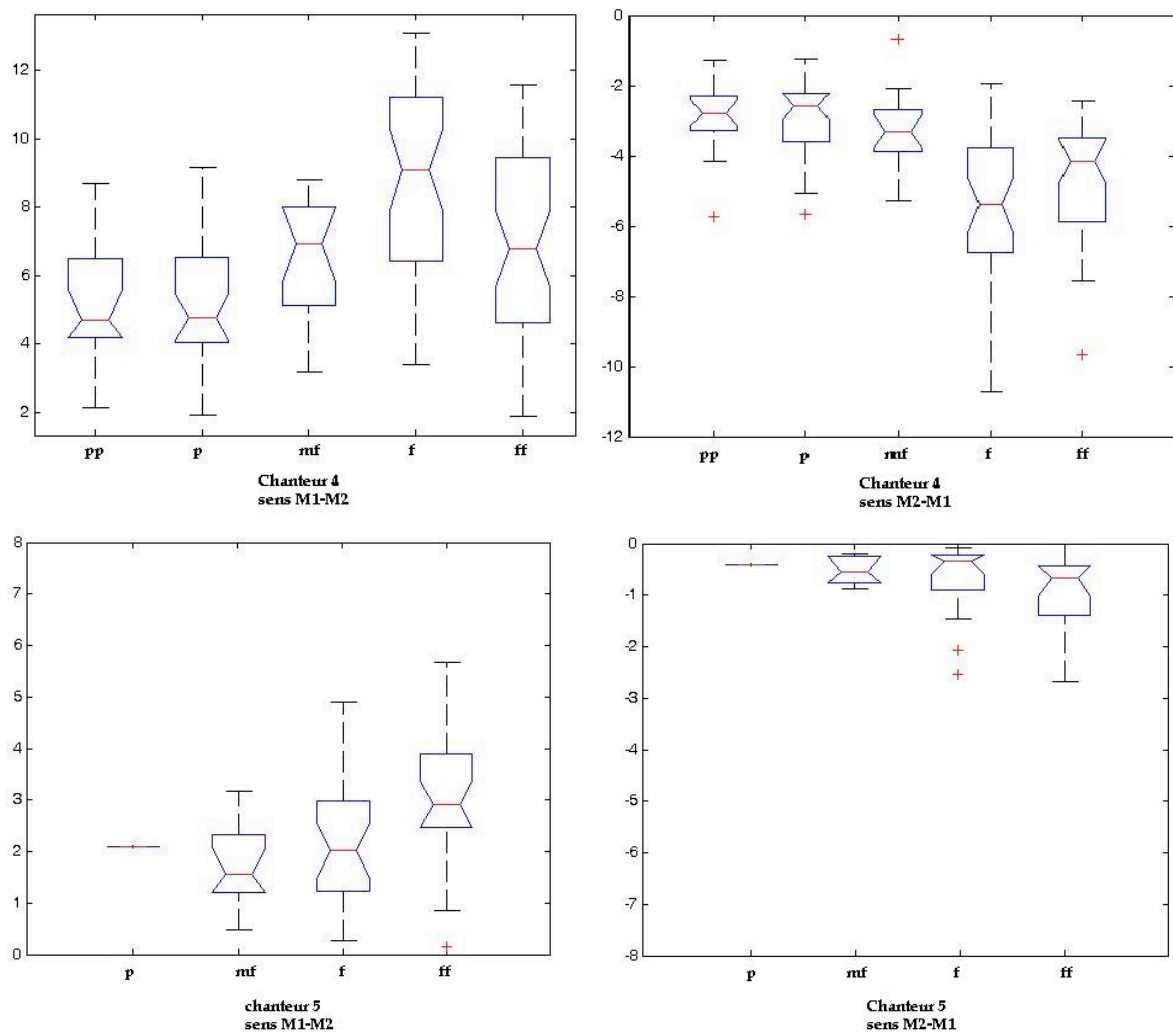


Fig.21: Représentation pour chaque chanteur de la médiane de l'intervalle interquartile et des valeurs supérieures et inférieures adjacentes de l'intervalle des sauts en demi-tons en fonction de la nuance.

	chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
M1-M2	***	***	***	***	*
M2-M1	*	***	*	***	ns

Tableau 3: significativité de l'influence de la nuance pour les 5 chanteurs.

3°) Analyse et interprétation:

On remarque que le chanteur 4 a des sauts particulièrement grands par rapport aux autres. Afin de pouvoir comparer les autres chanteurs, nous avons normalisé les axes des ordonnées entre 0 et 8 demi-tons pour les sauts M1-M2 et -8 et 0 pour les sauts M2-M1. Par un soucis de clarté, nous n'avons donc pas normalisé ceux du chanteurs 4 avec les autres. Les tendances sont très nettes: malgré quelques cas isolés, l'intensité croissante a pour effet d'augmenter le

saut de fréquence Δf . Le test ANOVA valide cette tendance, remarquée par le calcul des moyennes.

On remarque que non seulement la progression est plus prononcée dans avec le paramètre nuance qu'avec le paramètre intensité. De plus les p-valeurs sont elles aussi plus petites dans le cas de la nuance. Tout semble montrer que la décorrélation avec la fréquence donne à la nuance plus d'influence que l'intensité sur Δf .

Tout cela nous amène à penser que la hauteur doit être un paramètre actif sur Δf , car sinon, les deux études devraient donner les mêmes résultats.

C'est pour cela que nous allons par la suite analyser l'influence de la fréquence sur Δf .

Enfin, on vérifie que notre hypothèse de dissymétrie est juste. Δf est plus grand dans le sens M1-M2 que dans le sens M2-M1 et l'influence de l'intensité (ou de la nuance) est plus significative dans le sens M1-M2 que dans l'autre.

Au vue de cette étude, nous pouvons être amenés à penser que la perte de contrôle de la fréquence sera plus facile à masquer sur une nuance piano que sur un forte. Les habitudes et attentes du public imposent au chanteur un travail continu d'homogénéisation sur l'ensemble de son ambitus. Il doit ainsi apprendre à masquer les instabilités de son instrument dans sa zone de recouvrement. Or dans la pratique, les chanteurs lyriques gèrent les transitions en douceur et sans saut en pratiquant un decrescendo, afin de changer de mécanisme sur une nuance pianissimo. Cela lui permet de contrôler les variations des paramètres timbre et hauteur autant que possible.

Ainsi, nos résultats rejoignent les connaissances des chanteurs et leur technique pour masquer les sauts.

IV.1.2: Influence de la hauteur :

Nous venons de montrer que Δf augmente avec l'intensité.

La corrélation directe entre l'intensité et la hauteur, énoncée précédemment, implique une étude de l'influence de la hauteur afin de compléter les précédentes.

Nous désirons en effet savoir si la hauteur a une influence elle aussi sur Δf et dans quelle proportion. Nous avons mené le même type d'étude pour la hauteur de départ que précédemment sur l'intensité.

Pour les sauts M1-M2, on observe que tous les chanteurs n'ont pas les mêmes tendances. On peut cependant distinguer deux principales catégories: les chanteurs pour qui la hauteur n'a aucune influence sur Δf et ceux pour qui l'intervalle du saut diminue lorsque la hauteur augmente.

saut de fréquence
en 1/2 tons

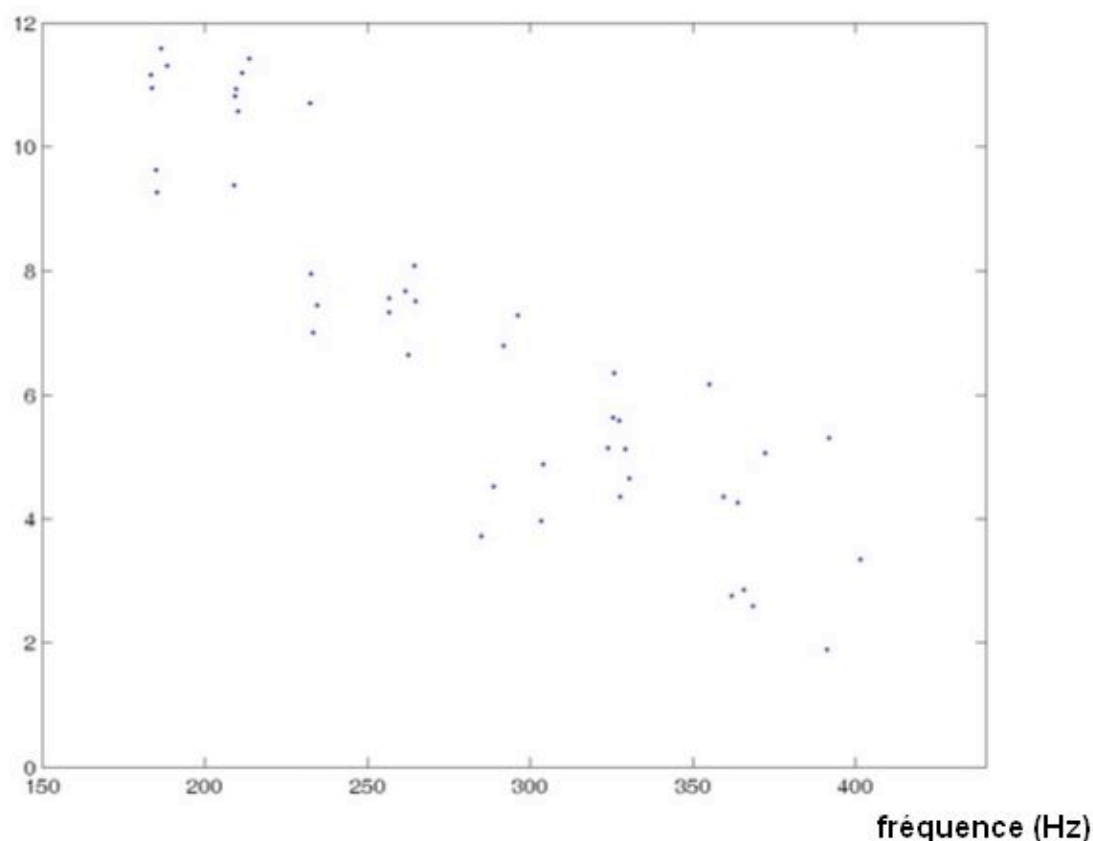


Fig.22: Graphe représentant l'intervalle des sauts de fréquence M1-M2, en 1/2 tons, du chanteur 4 sur la nuance 'forte' en fonction de la hauteur de départ. Les hauteurs considérées recouvrent l'ensemble de la zone de recouvrement. On ne distingue pas les 3 voyelles.

Il semble que pour les chanteurs 3 et 4, cette tendance soit présente sur l'ensemble des nuances. Nous avons, au vu de ces graphes, voulu vérifier la dépendance de Δf avec la fréquence de départ à l'aide du test ANOVA.

	chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
M1-M2	***	ns	*	**	*
M2-M1	ns	*	ns	***	.

Tableau 4: significativité de l'influence de la hauteur pour les 5 chanteurs (voir en annexe les détails des résultats du test ANOVA)

Le test confirme qu'il y a une dépendance pour la plupart des chanteurs dans le sens M1-M2. Cependant, mis à part les chanteurs 3 et 4, aucune tendance particulière n'a été remarquée. Dans le sens M2-M1, les résultats semblent dépendre des chanteurs et on n'observe sur les figures représentant les sauts en fréquence en fonction de la hauteur aucune corrélation. Cependant, il ne faut pas en conclure que la hauteur est un paramètre négligeable. En effet, on a vu dans l'étude précédente qui confrontait l'influence de la nuance et celle de l'intensité que

les résultats pour la nuance sont plus marqués que pour l'intensité. Comme nous l'avons dit, la variation de la nuance correspond à une variation d'intensité décorrélée de la fréquence. Puisque les résultats ne sont pas les mêmes, on peut en conclure que la hauteur a une influence.

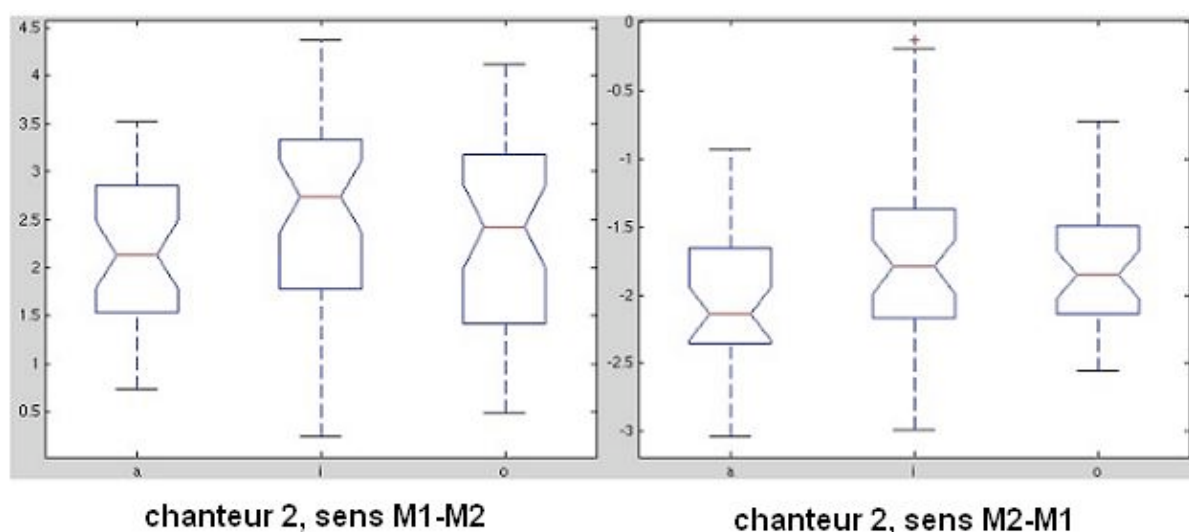
Les deux études se recoupent pour montrer une influence de la hauteur, cependant, nous ne connaissons pas précisément la tendance suivie.

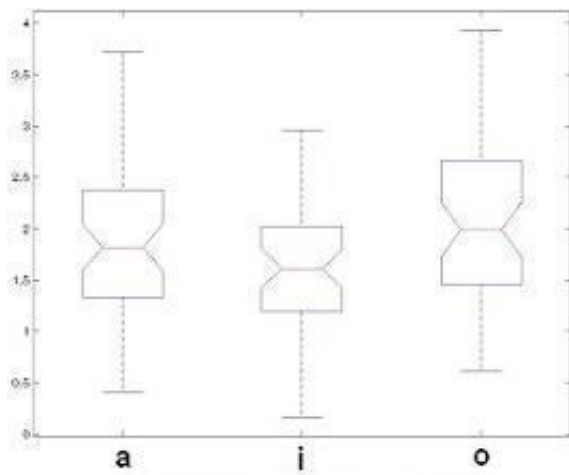
IV.1.3: Influence de la voyelle choisie :

Comme dit précédemment dans le chapitre I.3, les précédentes études avaient négligé l'effet de la voyelle choisie. Les études des phonétogrammes par mécanismes et par voyelles ont cependant révélé des différences non négligeables quand à la dynamique des voyelles. Nous avons ainsi analysé plus précisément l'influence de ce paramètre afin de confirmer ou non son indépendance.

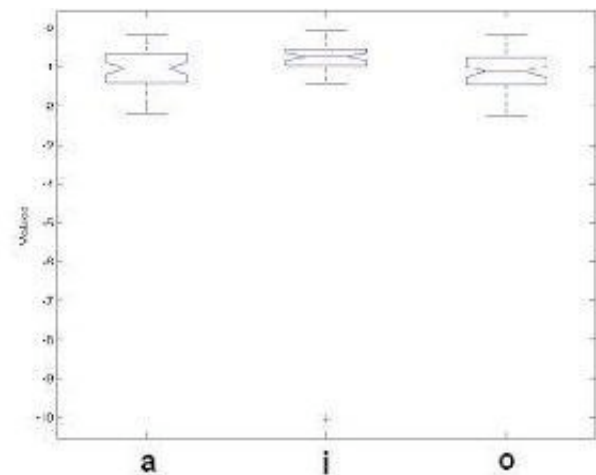
		chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
/a/	M1-M2	1.88 (0.6)	0.70 (0.6)	3.41 (1.5)	7.17 (7.4)	2.41 (1.9)
	M2-M1	-1.06 (0.3)	-2 (0.27)	-2.28 (1)	-4 (3)	-0.54 (0.3)
/o/	M1-M2	2.9 (0.8)	0.66 (0.5)	3.76 (2.9)	7.2 (7.7)	3.2 (2)
	M2-M1	-1.14 (0.3)	-1.76 (0.3)	-2.7 (0.8)	-4.6 (4.6)	-1.4 (0.8)
/i/	M1-M2	1.38 (3.2)	0.38 (0.2)	4.28 (1.7)	5.9 (7)	1.84 (0.7)
	M2-M1	-0.95 (2)	-1.74 (0.4)	-2.66 (0.8)	-3.9 (3)	-0.5 (0.1)

Tableau 5: Calculs des moyennes et écarts-types des sauts M1-M2 par voyelles, confondant toutes les hauteurs différentes et les intensités

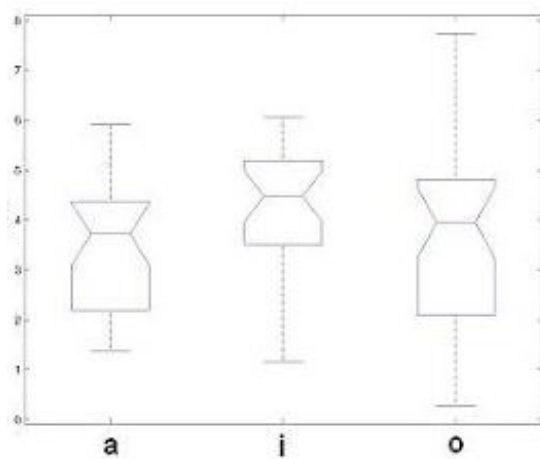




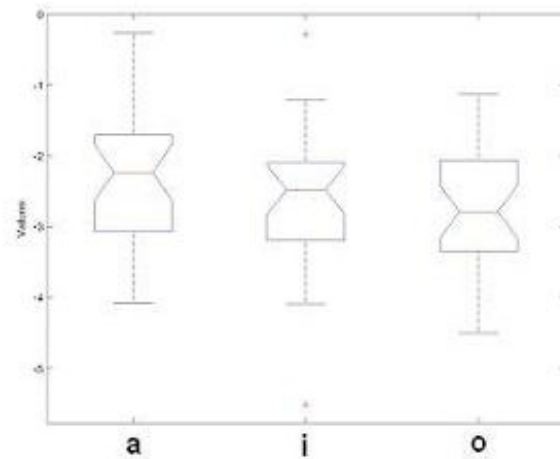
chanteur 1, sens M1-M2



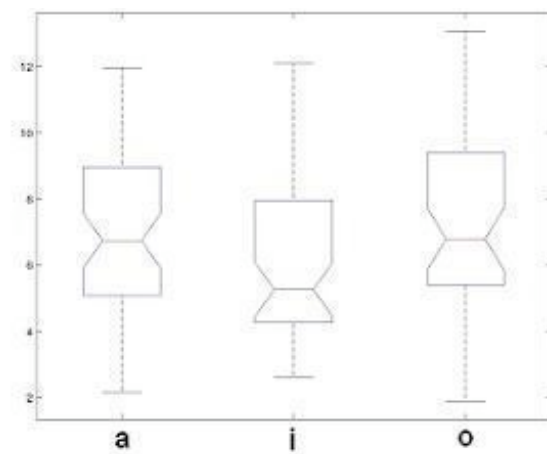
chanteur 1, sens M2-M1



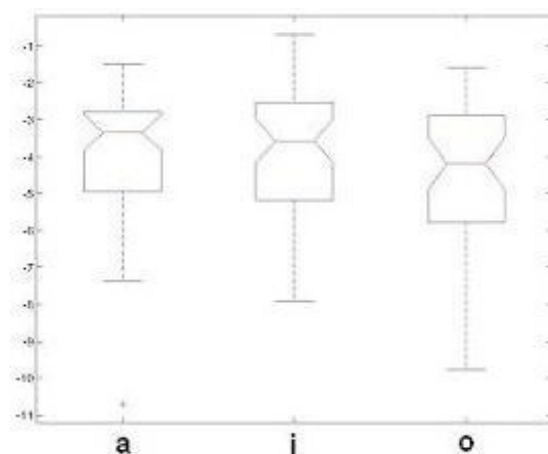
chanteur 3, sens M1-M2



chanteur 3, sens M2-M1



chanteur 4, sens M1-M2



chanteur 4, sens M2-M1

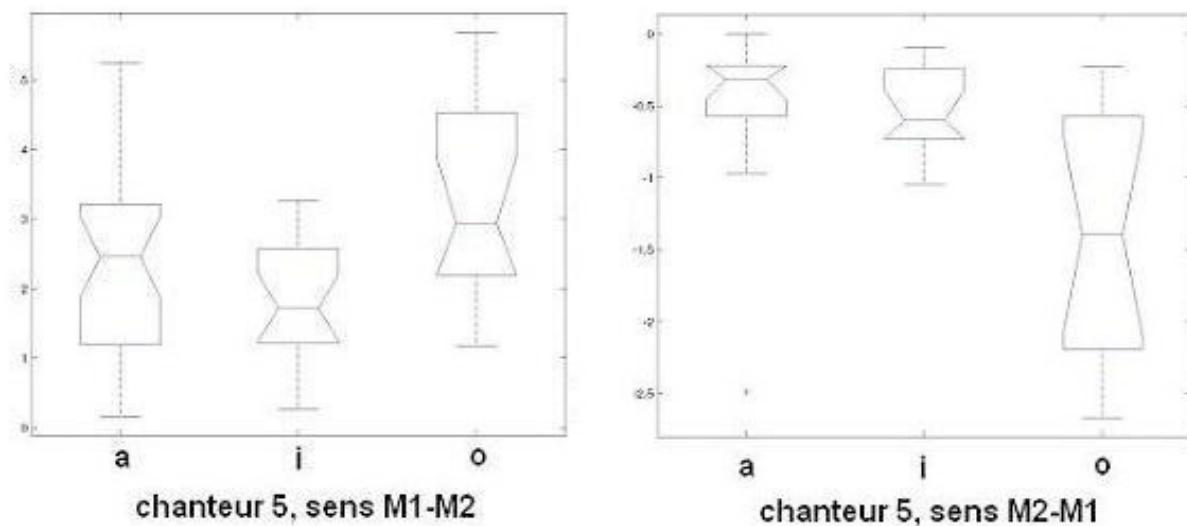


Fig 23: Représentation pour chaque chanteur de la médiane de l'intervalle interquartile et des valeurs supérieures et inférieures adjacentes de l'intervalle des sauts en demi-tons en fonction de la voyelle.

Après le calcul des moyennes des variations de Δf en fonction de la voyelle choisie, il semble qu'une tendance se dégage: en effet, pour la majorité des chanteurs, sur la voyelle /i/, la moyenne des Δf prend des valeurs différentes (et plus petites sauf pour le chanteur 3) que sur les autres voyelles. Il faut cependant remarquer que pour certains la variation est minime quand à l'ampleur que peut prendre l'intervalle du saut. On peut aussi expliquer le rapprochement des deux autres voyelles par le fait qu'elles sont moins fermées que la voyelle /i/. On observe aussi que dans le cas du chanteur 3, la voyelle qui fait les plus petits sauts est /o/, qui est semi-fermée. Chaque chanteur gérant les voyelles avec sa propre technique, il est possible que celui-ci ferme beaucoup le /o/. En tout cas, on n'observe jamais une moyenne minimum sur /a/. Nous pouvons donc faire une première hypothèse de différenciation de l'influence entre les voyelles ouvertes et semi-ouvertes /a/ et la voyelle /i/ qui est très fermée. Quand au /o/, cela dépend de l'ouverture que le chanteur impose au conduit vocal.

Nous avons vérifié par le test ANOVA l'influence de la voyelle sur Δf .

	chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
M1-M2	*	ns	.	*	*
M2-M1	ns	ns	ns	ns	**

Tableau 6: significativité de l'influence de la voyelle pour les 5 chanteurs.

Les résultats du test semblent confirmer que l'influence de la voyelle, si elle existe, est très faible pour la majorité des chanteurs. Encore une fois, une base de données plus complète permettrait d'y voir plus clair pour une tendance générale.
(voir en annexe les résultats d'ANOVA)

IV.2: Etude de la variation d'intensité dans les moments de transitions

Comme on l'a montré auparavant, l'intensité fluctue lors des changements de mécanismes. Dans le cas d'un saut M1-M2, elle diminue sensiblement et remonte lors d'un saut M2-M1. L'écoute des enregistrements de certains chanteurs amenait à penser que la diminution d'intensité pouvait être une cause du saut et non pas une conséquence. C'est pourquoi nous avons voulu connaître avec plus de précision l'instant où l'intensité varie, par rapport à l'instant où la fréquence varie.

Nous avons pour cela tracé sur un phonétogramme les points correspondant aux sauts (figure 24)

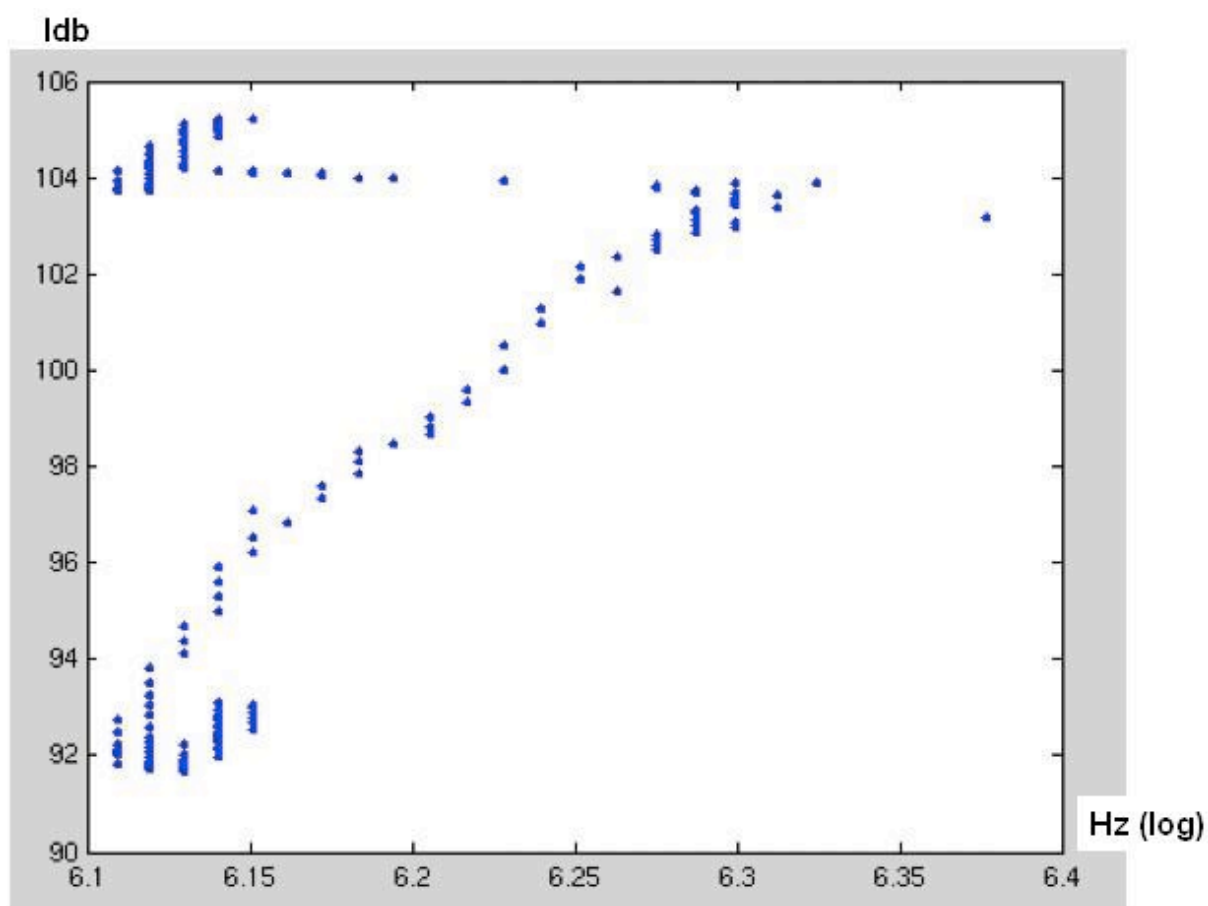


figure 24: Représentation dans un phonétogramme (fréquence/intensité) des variations de fréquence et d'intensité lors d'un saut M1-M2.

Voyelle: /a/, hauteur: la#3, intensité: fortissimo, chanteur 1

On peut représenter les variations de fréquence et d'intensité sur un phonétogramme. La figure précédente montre l'évolution de ces deux paramètres lors d'un passage M1-M2 pour le chanteur 1. Le saut commence sur la hauteur la# 3, d'intensité 106 dB. On considère que le saut se termine sur un la# 3 d'intensité 93 dB.

On observe que les deux paramètres ne varient pas en même temps. Tout d'abord, la fréquence chute puis le saut se produit et la fréquence monte brusquement. C'est lors du réajustement de la fréquence que l'intensité baisse progressivement. Ce phénomène dure moins de 150 ms, et l'oreille ne parvient pas à dissocier les variations des deux paramètres. Il est cependant possible que le calcul de l'intensité manque de précision dans le temps puisqu'il est calculé et moyenné sur une fenêtre glissante, alors que la fréquence est calculée avec beaucoup plus de soin.

On peut représenter (par un schéma) les variations de la hauteur avec celles de l'intensité en parallèle: (figure 25)

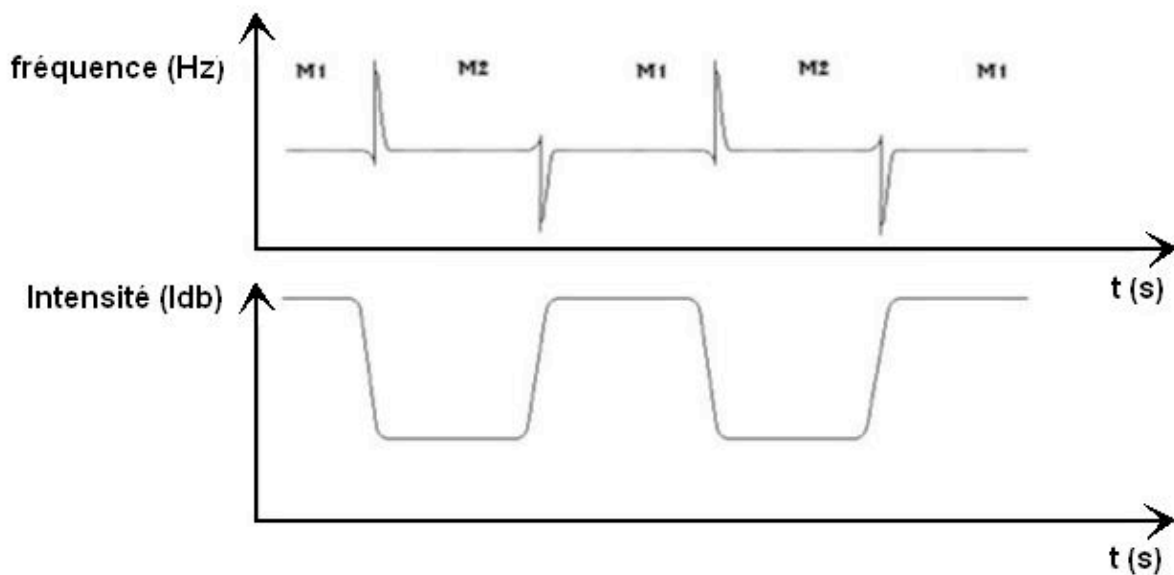


figure 25: Schéma des évolutions de la fréquence et de l'intensité mises en parallèle

On peut alors se demander si la nuance choisie est corrélée au saut en intensité. En effet, les deux mécanismes n'ayant pas forcément la même dynamique dans la zone de recouvrement, on peut s'attendre à ce que le saut en intensité augmente avec l'intensité du son tenu.

Les moyennes et écarts-types de ces sauts en intensité pour tous les chanteurs et classées par nuances sont disponibles dans les tableaux suivants:

	chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
pp	n	0.35 (0.25)	n	-0.89 (3.95)	-2.24 (14.53)
p	-5.03 (12.93)	-0.40 (3.01)	-3.03 (7.30)	-2.80 (10.57)	-2.04 (5.14)
mf	-4.24 (20.83)	-2.60 (9.05)	-4.26 (12.17)	-3.53 (16.27)	-1.84 (5.80)
f	-5.53 (13.64)	-4.90 (11.44)	-4.44 (12.63)	-5.74 (25.44)	-0.21 (0.09)
ff	n	n	-7.31 (15.84)	-8.08 (39.77)	n

(a)

	chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
pp	n	-1.17 (0.45)	n	0.06 (3.54)	0.28 (7.63)
p	4.80 (16.32)	-0.24 (2.83)	2.91 (7.83)	1.61 (7.36)	1.17 (4.04)
mf	3.91 (17.19)	2.15 (10.57)	4.13 (8.78)	2.64 (13.02)	1.37 (5.81)
f	4.61 (13.97)	4.28 (9.76)	3.61 (15)	4.65 (23)	-0.45 (0.41)
ff	n	n	6.88 (13.32)	6.73 (41.14)	n

(b)

Tableau 7: Les moyennes (écarts-types) de ces sauts en intensité pour tous les chanteurs et classées par nuance pour les sauts M1-M2 (a) et pour les sauts M2-M1 (b) (n signifie que le chanteur n'a pas pratiqué de sauts à la nuance considérée)

On observe effectivement le phénomène attendu. Ceci est dû à la différence de dynamique des deux mécanismes sur une hauteur donnée. Dans la zone de recouvrement, le mécanisme M2 a une dynamique plus faible, et nous avons observé que lors des sauts, il était difficile pour les chanteurs de pratiquer un mécanisme M2 au maximum de son intensité possible. Il est fort probable que les contraintes sont dues aux limites des phonétogrammes par mécanisme.

IV.3: Influence du sexe du chanteur

Il est coutume de considérer que les femmes chantent presque exclusivement en M2 et les hommes en M1. On aurait pu s'attendre alors à de grandes différences entre les caractéristiques des sauts pour les hommes et pour les femmes. Après l'enregistrement de 3 hommes de formation lyrique (2 ténors et un baryton) nous avons enregistré 3 femmes de formation lyrique aussi (2 sopranos et une mezzo-soprano). Nous avons constaté lors des enregistrements des 3 filles que les sauts M2-M1 était très difficilement perceptibles alors qu'ils l'étaient parfaitement pour les hommes. Le protocole alternant saut M1-M2 et M2-M1, il n'était pourtant pas possible pour les femmes de faire deux sauts M1-M2 d'affilé sans repasser en M1 entre les deux sauts. L'analyse spectrale a montré une modification du timbre continue dans la "zone de transition". Mais là encore, il était très difficile de parvenir à détecter les instants de début et de fin de saut, même après plusieurs écoutes et analyses. Il apparaissait ainsi que certaines femmes pouvaient parvenir à maîtriser la fréquence lors des sauts.

Nous avons finalement enregistré une dernière femme, pratiquant le chant gospel, donc chantant fondamentalement en M1 (chanteur 1). Ses sauts M2-M1 n'avaient pas les mêmes caractéristiques que ceux des autres femmes, mais ressemblaient plus à ceux pratiqués par les hommes.

Etant donné encore le nombre insuffisant de chanteurs (d'autant que deux des femmes enregistrées au début ont fourni chacune une base de données insuffisante), nous ne tirerons pas de conclusions hâtives, mais supposerons que l'utilisation privilégiée d'un mécanisme par rapport à l'autre, bien plus que le sexe du chanteur, peut avoir des conséquences quand au saut en fréquence.

On observe par contre une différence au niveau de l'ampleur de l'intervalle des sauts due au sexe du chanteur. Globalement les sauts sont plus importants pour les hommes que pour les femmes, quel que soit le sens du saut choisi.

Conclusion:

Un changement de mécanisme laryngé a pour conséquence une perte de contrôle des paramètres caractérisant la qualité vocale, notamment la hauteur et l'intensité. Le but de cette étude était d'abord d'analyser avec précision les corrélations de intensité, puis de la hauteur, avec l'intervalle en fréquence Δf des sauts produits.

Pour cela, nous avons choisi un protocole particulier pour l'étude des sauts, qui se fait habituellement sur des glissandi. Le besoin de contrôler et mesurer précisément la fréquence et l'intensité a préconisé le choix d'analyse de sons tenus sur une note, avec alternance de mécanismes. Nous avons demandé plusieurs nuances et enregistré les sons tenus sur l'ensemble des notes de la zone de recouvrement des deux mécanismes.

On observe par l'étude de l'influence de l'intensité sur l'intervalle de ces sauts enregistrés que l'augmentation du niveau sonore implique un saut de fréquence plus important.

Nous avons aussi mené l'étude en fonction de la nuance et non plus de l'intensité afin de vérifier que la corrélation hauteur-intensité (qui est un résultat connu) n'a pas d'influence sur les résultats de l'étude précédente. On remarque en effet que la corrélation entre le saut en fréquence et la nuance est plus forte. Ainsi, la hauteur semble biaiser l'étude sur l'intensité.

Cependant, après une étude de l'influence de la hauteur sur Δf , on n'obtient pas de tendances marquantes, même si une dépendance à la hauteur est vérifiée dans la plupart des cas. Une étude menée sur une base de données plus conséquente pourrait nous permettre de conclure véritablement sur l'importance de cette influence.

Entre ces deux paramètres (hauteur et intensité) qui sont corrélés, les trois études menées nous permettent de considérer la nuance comme le paramètre fondamental pour les variations de Δf , d'autant que lors des enregistrements, certains chanteurs provoquaient les sauts M1-M2 en diminuant l'intensité ou en l'augmentant dans les sauts M2-M1. Ceci peut s'expliquer par les différentes dynamiques des deux mécanismes que l'on peut voir sur un phonétogramme.

Par ailleurs, l'étude de la voyelle n'a pas donné d'autre tendance que la distinction entre les voyelles ouvertes et fermées, mais elle semble quand même tenir une place non négligeable, notamment dans le sens M1-M2. De plus lors des enregistrements, certains chanteurs se sentaient plus à l'aise pour la pratique des sauts sur certaines voyelles que sur d'autres. Mais cela dépendait du chanteur et de la hauteur.

On peut rapprocher notre étude de la pratique du Yodel puisque cette technique utilise des voyelles ouvertes (/a/, /è/) en mécanisme M1 et des voyelles plutôt fermées en mécanisme M2 (/i/, /u/, /ou/). Il faut remarquer cependant que notre protocole ne permet pas un changement de voyelle au cours du saut, à l'opposé du Yodel.

L'influence de la voyelle pourrait être étudiée afin d'expliquer la technique du Yodel. Elle devra prendre en compte les variations cumulées de la hauteur et la voyelle afin de constater quelles combinaisons des deux paramètres permettent de favoriser le saut.

Bibliographie

- [1] Bloothoof G, Van Wijck M, Pabon P. *Relations between vocal registers in voice breaks*. Proceedings Eurospeech ; (2001)
- [2] Castellengo M. *continuité, rupture, ornementation, ou les bons usages de la transition entre deux modes d'émission vocale*. In : Georg, editor. Cahiers de musiques traditionnelles: La voix et les techniques vocales. Ateliers d'ethnomusicologies, Geneva, Switzerland ; (1991)
- [3] Castellengo M. *La phonation: voix parlée*. cours d'Acoustique Musicale au CNSMDP; (2002)
- [4] Denes P.B et Pinson E.N , *La chaîne de communication verbale. Physique et biologie du langage. Les laboratoires du téléphone Bell*. (1963)
- [5] Expert R, *Voix de poitrine et voix de tête: Quelle pédagogie aujourd'hui?* ; Mémoire de recherche d'Acoustique Musicale au CNSMDP; (2007)
- [6] Henrich N. *Etude de la source glottique en voix parlée et chantée*. Université Paris 6 ; (2001)
- [7] Lamesch S, *Caractérisation de la voix mixte en termes de mécanismes laryngés*; (2006)
- [8] Lamesch S, Doval B, Castellengo M. *Phonetograms of laryngeal source parameters for different vowels and laryngeal mechanisms*. Acoustics'08 ; (2008)
- [9] Legent F, Perlemutier L, Vanderbrouck Cl, *Cahiers d'anatomie O.R.L* Masson, deuxième édition; (1975)
- [10] Miller D, Svec J, Schutte H.K. *Measurement of characteristic Leap Interval Between Chest and Falsetto Registers* J.Voice 16:1, 8-19 ; (2002)
- [11] Roubeau B. *Mécanisme vibratoires laryngés et contrôle neuro-musculaire de la fréquence fondamentale*. Université Paris-Orsay ; (1993)
- [12] Roubeau B, Castellengo M. *Revision of the notion of voice register*. In: XIXth International CoMet Congress; 1993. Utrecht; (1993)
- [13] Roubeau B, Castellengo M, Bodin P, Ragot M, *Phonétogramme par registre laryngé*; Folia Phoniatr Logop, 56:312-333; (2004)
- [14] Roubeau B, Chevrie-Muller C, Arabia C. *Control of laryngeal vibration in register change* Vocal Fold Physiology Conference, Stochlohm; (1989)
- [15] Svec J, Miller D, Schutte H.K *On pitch jumps between chest and falsetto registers in voice : Data from living and excised human larynges*. J. Acous. Soc. Am 106:3 (1999)
- [16] Titze IP. *Principles of Voice Production*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall; (1994)
- [17] Van den Berg, Vennard WD, Burger D, Shervanian CC. *Voice Production : The Vibrating Larynx [instructional film]*. Stichting Film en Wetenschap ; (1960)

Annexe:

tests ANOVA

1°) test ANOVA pour l'étude de l'influence de l'intensité sur l'intervalle du saut de fréquence:

		Sum Sq		d.f.		Mean Sq		F	Prob > F
		X1	Err	X1	Err	X1	Err	X1	X1
1	M1M2	18.4	77.5	1	148	18.4	0.5	35.2	2.03 . e-8
	M2M1	1.5	114	1	143	1.5	0.8	1.87	0.174
2	M1M2	5.1	102	1	113	5.1	0.9	5.7	0.0186
	M2M1	0.1	34.1	1	104	0.05	0.33	0.16	0.6908
3	M1M2	49.2	158	1	91	49.2	1.73	28.41	7.01 . e-7
	M2M1	0.73	74.8	1	80	0.73	0.94	0.78	0.3802
4	M1M2	56.4	1062	1	149	56.4	7.13	7.91	0.0056
	M2M1	42.6	442	1	138	42.6	3.2	13.28	0.004
5	M1M2	9.12	104	1	62	9.12	1.68	5.42	0.0232
	M2M1	2.8	19.7	1	40	2.8	0.5	5.68	0.022

Tableau 8: Résultats du test ANOVA pour l'hypothèse de l'influence de l'intensité

X1 est la variable testée (ici l'intensité).

Err correspond à l'erreur des calculs

Sum Sq est la somme quadratique

d.f est le degré de liberté

Mean Sq est la moyenne de l'erreur quadratique

F est la statistique F (rapport des moyennes des erreurs quadratiques)

Prob > F est la probabilité que l'intensité n'a pas d'influence sur l'intervalle du saut.

2°) Test ANOVA pour l'étude de l'influence de la nuance sur l'intervalle du saut de fréquence:

		Sum Sq		d.f.		Mean Sq		F	Prob > F
		X1	Err	X1	Err	X1	Err	X1	X1
1	M1M2	34.1	61.9	2	147	17	0.42	40.42	1.02 e-14
	M2M1	5.2	110.7	2	142	2.61	0.78	3.35	0.0377
2	M1M2	41.9	65	3	111	14	0.59	23.83	5.59 e-12
	M2M1	7.96	26.2	3	102	2.65	0.26	10.33	5.37 e-6
3	M1M2	95.6	111	3	89	31.9	1.24	25.56	5.12 e-12
	M2M1	8.18	67.38	3	78	2.73	0.86	3.16	0.0294
4	M1M2	270	848	4	146	67.6	5.8	11.63	3.157 e-8
	M2M1	171	314	4	135	42.8	2.32	18.38	4.43 e-12
5	M1M2	17.3	96.2	3	60	5.77	1.60	3.6	0.0185
	M2M1	1.9	20.6	3	38	0.63	0.54	1.17	0.33

Tableau 9: Résultats du test ANOVA pour l'hypothèse de l'influence de la nuance

3°) Test ANOVA pour l'étude de l'influence de la hauteur sur l'intervalle du saut de fréquence:

		Sum Sq		d.f.		Mean Sq		F	Prob > F
		X1	Err	X1	Err	X1	Err	X1	X1
1	M1M2	10.2	85.7	1	148	10.2	0.6	17.68	4.497 e-5
	M2M1	0.9	115	1	143	0.9	0.8	1.14	0.2875
2	M1M2	0.01	107	1	112	0.01	0.96	0.01	0.9343
	M2M1	1.73	32.4	1	104	1.73	0.31	5.55	0.02
3	M1M2	8.92	198	1	91	8.9	2.2	4.1	0.0457
	M2M1	2.08	73.5	1	80	2.08	0.92	2.27	0.14
4	M1M2	52.6	1065	1	149	52.6	7.15	7.35	0.0075
	M2M1	95.2	390	1	138	95.2	2.83	33.7	4.225 e-8
5	M1M2	9.21	104.3	1	62	9.21	1.68	5.48	0.0225
	M2M1	1.95	20.57	1	40	1.95	0.51	3.79	0.0587

Tableau 10: Résultats du test ANOVA pour l'hypothèse de l'influence de la hauteur

4°) Test ANOVA pour l'étude de l'influence de la voyelle sur l'intervalle du saut de fréquence:

		Sum Sq		d.f.		Mean Sq		F	Prob > F
		X1	Err	X1	Err	X1	Err	X1	X1
1	M1M2	5.42	90.6	2	147	2.71	0.62	4.4	0.0139
	M2M1	0.82	115	2	142	0.41	0.81	0.51	0.6038
2	M1M2	2.88	104	2	112	1.44	0.93	1.55	0.2166
	M2M1	1.36	32.8	2	103	0.68	0.32	2.14	0.1231
3	M1M2	11.1	195	2	90	5.55	2.17	2.56	0.0832
	M2M1	3.19	72.4	2	79	1.6	0.92	1.74	0.1821
4	M1M2	49.9	1068	2	148	25	7.22	3.46	0.0341
	M2M1	13.2	472	2	137	6.6	3.45	1.92	0.1512
5	M1M2	15.9	97.6	2	61	7.93	1.6	4.96	0.0101
	M2M1	6.62	15.9	2	39	3.31	0.4	8.12	0.0011

Tableau 11: Résultats du test ANOVA pour l'hypothèse de l'influence de la voyelle

5°) Tableaux des moyennes et écart-types de saut de fréquence Δf dans le cas des sauts M1-M2 en demi-tons, classifiés selon les différentes nuances:

	chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
pp	n	1.15 (0.37)	n	4.69 (7.07)	1.54 (0.77)
p	1.26 (0.28)	1.59 (0.60)	1.95 (1.38)	5.15 (4.36)	2.04 (1.75)
mf	1.76 (0.36)	2.42 (0.69)	3.34 (1.43)	6.18 (5.43)	2.98 (2.03)
f	2.20 (3.85)	2.95 (0.96)	3.97 (1.88)	6.8 (9)	n
ff	n	n	4.95 (2.25)	8.46 (8.30)	n

Tableau 12: Moyennes et écarts-types des sauts de fréquence en fonction de la nuance choisie dans le cas des sauts M1-M2 (n signifie que le chanteur n'a pas pratiqué de sauts à la nuance considérée)

Dans le cas des sauts M2-M1:

	chanteur 1	chanteur 2	chanteur 3	chanteur 4	chanteur 5
pp	n	0.76 (0.52)	n	-2.78 (1.39)	-0.44 (14.54)
p	-0.79 (0.21)	-1.52 (0.33)	-2.05 (1)	-2.82 (1.43)	-0.65 (5.14)
mf	-1 (0.19)	-1.84 (0.36)	-2.14 (1.11)	-3.09 (1.84)	-0.92 (0.75)
f	-1.09 (0.35)	-2.05 (0.35)	-2.42 (1.13)	-4.63 (3.05)	-0.20 (0.09)
ff	n	n	-2.92 (1.53)	-4.88 (13.94)	n

Tableau 13: Moyennes et écarts-types des sauts de fréquence en fonction de la nuance choisie dans le cas des sauts M1-M2 (n signifie que le chanteur n'a pas pratiqué de sauts à la nuance considérée)