



ACOUSTICS 2012

A comparative study of the maximum vocal levels of classical singers for the two main laryngeal mechanisms

S. Lamesch, B. Doval and M. Castellengo

LAM - IJLRDA, 11, rue de Lourmel, 75015 Paris, France
lamesch@lam.jussieu.fr

During vocal performance, two main laryngeal vibratory mechanisms (namely M1 and M2) come into play allowing the singer to reach a complete vocal range. A previous study showed that the maximum SPL is on the average 10 dB stronger for the vowel /a/ than for /i/ in M1, but remains the same for the two vowels in M2. The aim of this article is to find an acoustical explanation for this difference. 21 singers (13 males and 8 females) produced crescendi on /a/ and on /i/, from C3 to C5, in M1 and in M2, since this tessitura includes the overlapping area of both mechanisms. We recorded the sounds and the electroglottographic signals. The results show that the strongest harmonic is the first one for /i/ within the tessitura under examination, for females as well as for males (except a few tenors). For /a/, the number of the strongest harmonic remains close to the first or/and second formant. The difference between the level of the fundamental in M1 and in M2 is the same for /a/ and /i/. The contribution of the different glottal flow parameters and resonantial adjustments for M1 and M2 and for /i/ and /a/, are discussed.

1 Introduction

Le contrôle et la gestion de l'intensité vocale constituent des éléments clé de la technique vocale des chanteurs lyriques. Néanmoins la description scientifique de la sensation d'intensité vocale reste problématique. Aussi, dans un premier temps, c'est le niveau SPL qui sera étudié.

La dynamique vocale peut être représentée, en fonction de la hauteur, par un diagramme appelé phonétogramme. Les phonétogrammes permettent par exemple d'observer que pour la plupart des chanteurs, l'intensité minimale et maximale augmente avec la hauteur [7, 13, 15, 24]. Dans une étude antérieure [10, 11, 12], il a été établi que le niveau SPL maximal était en moyenne de 10 dB plus fort sur la voyelle /a/ que sur la voyelle /i/ dans le mécanisme laryngé M1, alors que ce n'est pas le cas dans le mécanisme laryngé M2. Dans cet article, nous souhaitons expliquer pourquoi, au niveau acoustique, nous observons ces différences de niveau maximal en M1 et pas en M2.

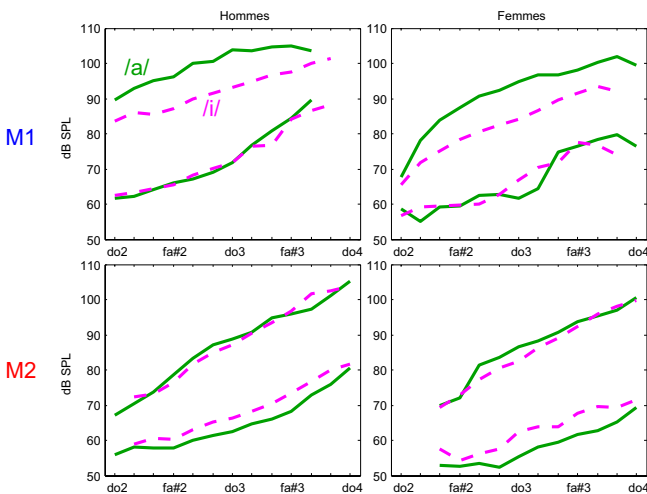


Figure 1: Phonétogrammes moyens pour les hommes et pour les femmes, par mécanisme laryngé et par voyelle. Adapté de [10].

Le SPL varie en fonction de nombreux paramètres. En termes de production vocale, le SPL est corrélé à la pression sous-glottique ou à la pression dans les poumons [1, 8, 9, 21, 22, 24]. Il est aussi corrélé à plusieurs paramètres glottiques : l'excitation maximum (Maximum Flow Declination Rate, MFDR) [4] ou le quotient ouvert (Open Quotient, O_q), notamment en mécanisme M1 [7]. Enfin, le conduit vocal a également une influence sur le SPL : il est connu que la voyelle peut modifier les phonétogrammes [5, 10, 18, 19, 25]. De même, l'ajustement des fréquences formantiques en fonction des fréquences des harmoniques peut permettre de gag-

ner de l'intensité vocale [3, 6, 21], voir même de favoriser la vibration glottique [23].

Au niveau acoustique et spectral, le niveau SPL est lié au niveau de l'harmonique la plus ample, ou au niveau des quelques harmoniques les plus amples. Plus précisément, si une harmonique est beaucoup plus intense que les autres, le niveau SPL global correspondra au niveau de cette harmonique. Si les deux harmoniques les plus intenses ont un niveau proche, le niveau SPL peut se retrouver jusqu'à 3 dB supérieur au niveau de l'harmonique la plus intense [14].

Le but de cet article est d'apporter des éléments de compréhension quant à la relation entre voyelles, mécanismes laryngés et intensité vocale. Plus précisément, nous chercherons à répondre aux questions suivantes : 1. quelle est la zone fréquentielle de plus forte amplitude, et cette zone dépend-elle du mécanisme laryngé ? 2. le niveau du premier harmonique varie-t-il en fonction du mécanisme laryngé sur les limites supérieures des phonétogrammes ? 3. comment interpréter ces résultats par rapport à ce que nous savons du signal de source en M1 et en M2 ?

Dans un premier temps, le protocole ayant permis d'établir la base de données est décrit. Ensuite, chacune de ces questions est abordée.

2 Méthode

La base de données utilisée est identique à celle constituée lors d'une thèse de doctorat [10] et décrite dans des communications antérieures [11, 12]. Nous en rappelons ici les principaux aspects.

2.1 Sujets

21 chanteurs ont participé à l'étude : 8 femmes (4 sopranos et 4 altos) et 13 hommes (2 basses, 5 barytons, 4 ténors et 2 contre-ténors). Tous ces chanteurs ont une pratique vocale régulière. 11 d'entre eux sont des amateurs confirmés, et les 10 autres sont des chanteurs professionnels. L'âge moyen est de 36 ans, les chanteurs étant âgés de 22 à 52 ans.

2.2 Protocole

Les chanteurs ont effectué des crescendi et des decrescendi, sur une tessiture s'étendant entre do2 et do4 (131 à 523 Hz), pour les mécanismes M1 et M2, et sur les voyelles /a/, /i/ et /o/. Seuls les résultats portant sur les voyelles /i/ et /a/ seront présentés dans cette communication. Les notes étaient imposées, en progression par tons. L'organisation de l'enregistrement se déroulait en quatre étapes : le grave et l'aigu des mécanismes laryngés M1 et M2. A chaque étape,

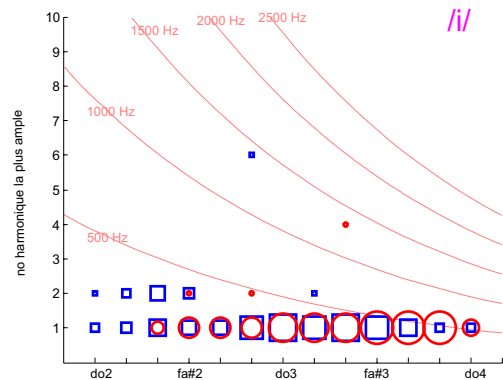
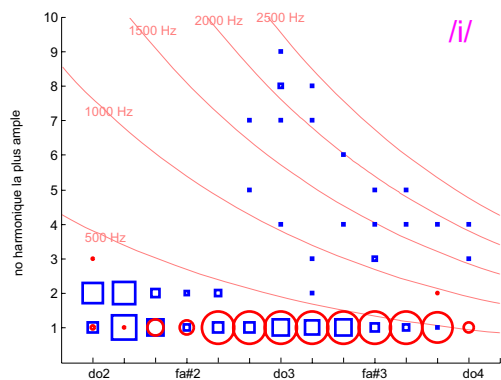
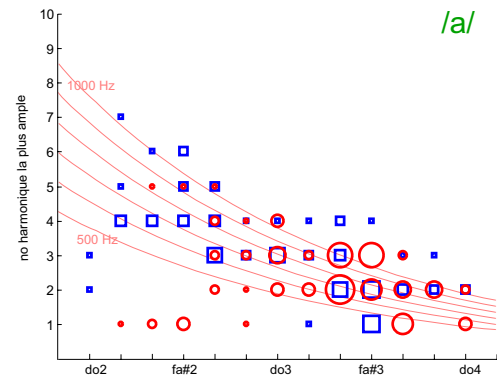
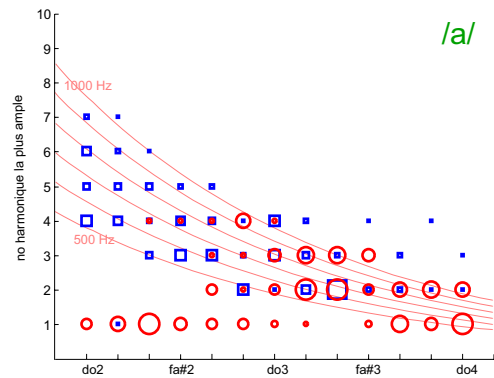


Figure 2: Rang de l’harmonique dominante en fonction de la hauteur, pour M1 (carré bleu) et M2 (rond rouge), pour les sujets masculins. La taille des symboles est proportionnelle au nombre de sujets.

Figure 3: Rang de l’harmonique dominante en fonction de la hauteur, pour M1 (carré bleu) et M2 (rond rouge), pour les sujets féminins. La taille des symboles est proportionnelle au nombre de sujets.

on enregistrait d’abord les productions sur la voyelle /a/, en commençant sur une note située au milieu de la tessiture étudiée (le do3 pour la plupart des chanteurs) [17], puis en descendant ou en montant ton par ton, soit jusqu’à la limite choisie (do2 ou do4), soit jusqu’à la limite physiologique du mécanisme laryngé, en effectuant chaque fois un crescendo puis un decrescendo. Cette tâche était ensuite répétée sur /o/ puis sur /i/, avant de passer à une des autres étapes de l’enregistrement. L’ordre de ces quatre étapes était laissé au libre choix du chanteur.

Les enregistrements ont été effectués dans une pièce calme et assourdie, où il était possible de discuter avec le chanteur pendant les enregistrements. Un microphone Brüel & Kjaer à capsule omnidirectionnelle était placé à 30 cm de la bouche du chanteur. Un électroglottographe à double entrée (dual channel) a été utilisé pour acquérir le signal électroglottographique (EGG). Le son et l’EGG ont été acquis directement sur un ordinateur Mac OS X grâce à une carte son Metric Halo 2882, et codés sur 16 bits à 44100 Hz.

Chaque chanteur avait la possibilité de s’échauffer avant l’enregistrement. La calibration du niveau sonore (SPL) était effectuée sur une production vocale d’intensité constante produite au début de chaque session, et mesurée à l’aide d’un sonomètre placé à l’endroit du microphone.

3 Etude du rang de l’harmonique dominante

3.1 Résultats

Les figures 2 et 3 présentent le numéro de l’harmonique dominante pour les voyelles /a/ et /i/, en fonction de la hauteur. Les résultats sont présentés séparément pour les hommes (figure 2) et pour les femmes (figure 3). La taille des symboles est proportionnelle au nombre de sujets.

Voyelle /a/ : pour les hommes comme pour les femmes, le rang de l’harmonique dominante varie en fonction de la hauteur, allant du rang 2 à 7 en M1 et du rang 1 à 4 en M2. Pour l’ensemble des sujets, le rang de l’harmonique dominante diminue en M1, et semble rester dans une zone fréquentielle stable (autour de 700 Hz). En M2, nous observons un phénomène identique à partir de sib2 ou do3. En dessous, et essentiellement pour les hommes, l’harmonique dominante tend à être la première.

Voyelle /i/ : l’harmonique dominante est la première, sauf sur do2 et ré2, voire mi2 pour les femmes en M1. Pour certains chanteurs, elle est située en hautes fréquences (au-delà de 1 kHz) à partir de sib2. En M2, c’est presque systématiquement la première harmonique qui domine.

Un exemple de spectres observés est présenté figure 4. Sur la voyelle /a/, nous pouvons observer que l’ensemble du spectre est plus faible en M2 qu’en M1, et le rang de l’harmonique dominante est diminué d’un en M2 par rapport au M1, ceci pouvant résulter de l’abaissement des deux premiers formants. Sur la voyelle /i/, l’ensemble du spectre a à peu près la même énergie en M1 et en M2, en particulier

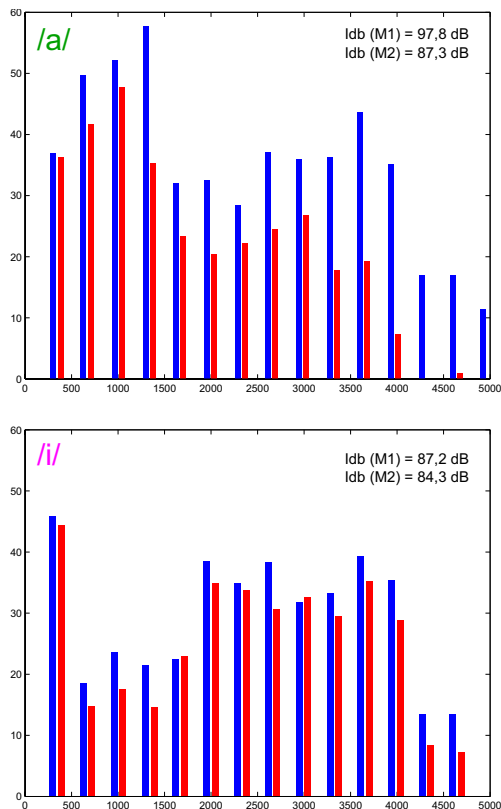


Figure 4: Spectres obtenus pour un sujet féminin. En haut : voyelle /a/, en bas : voyelle /i/. Les spectres obtenus en mécanisme M1 sont représentés en bleu et ceux en M2 en rouge. Note : mi3.

la première harmonique qui est l'harmonique la plus ample (pour les deux mécanismes).

3.2 Discussion

Pour la voyelle /i/, nous pouvons nous attendre à ce que le premier formant vocalique soit situé aux alentours de 300 Hz et le second aux alentours de 1500-2000 Hz. L'harmonique la plus ample est donc habituellement située à proximité du premier formant sur la voyelle /i/, et dans certains cas (pour les hommes essentiellement), proche du deuxième, voir du troisième formant. Dans la plupart des cas, donc, lorsque l'on n'observe pas de différence d'intensité entre M1 et M2 sur la voyelle /i/, cela traduit le fait que la première harmonique est aussi ample dans les deux mécanismes pour cette voyelle.

Pour la voyelle /a/, l'harmonique dominante est le plus souvent située entre 500 et 1000 Hz, ce qui correspond à une zone renforcée par le premier ou les deux premiers formants vocaliques. Cette région correspond essentiellement à une harmonique de rang supérieur ou égale à 2 pour la tessiture étudiée. Pour certains hommes, dans le grave du mécanisme M2, nous avons observé que l'harmonique dominante était toujours la première. Ces productions sont alors de très faible intensité. Cette situation est rencontrée lorsque les chanteurs n'ont pas eu la possibilité d'augmenter suffisamment l'intensité vocale pour faire émerger la zone fréquentielle de 500 - 1000 Hz. La zone dominante correspond alors à celle du formant glottique [2].

En conclusion, pour les deux mécanismes, les deux voyelles et dans la plupart des cas, l'harmonique domi-

nante est localisée proche du premier ou des deux premiers formants. L'énergie de cette région dépend donc plus du mécanisme laryngé sur la voyelle /a/ (et elle correspond alors à 500 - 1000 Hz) que sur la voyelle /i/ (300 Hz).

4 Etude du niveau du premier harmonique

Nous avons vu que pour la voyelle /i/, pour la plupart des sujets, l'harmonique dominante est la première. En conséquent, la différence d'énergie du premier harmonique entre M1 et M2, et sur les limites supérieures des phonétogrammes, doit correspondre avec la différence de niveau maximal entre les mécanismes M1 et M2. Le but de cette section est de déterminer si la différence de niveau de H1 entre les mécanismes M1 et M2 dépend de la voyelle.

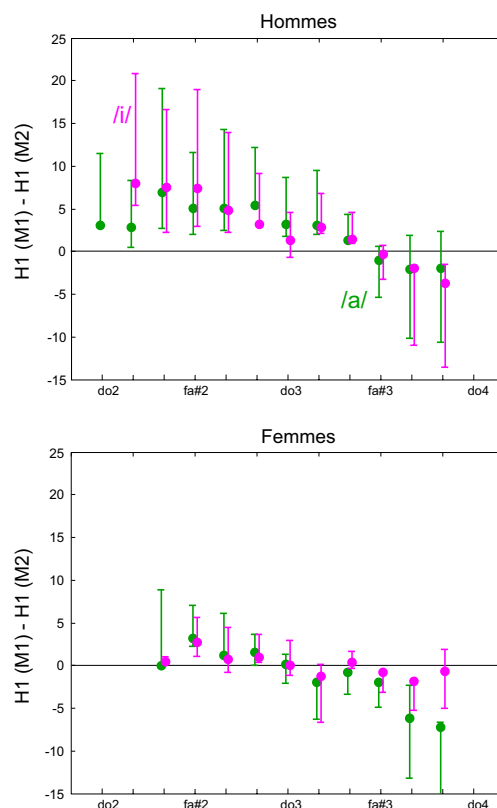


Figure 5: Différence d'énergie de H1 observée sur la limite supérieure des phonétogrammes de M1 et de M2. Les valeurs présentées sont les médianes et les quartiles supérieurs et inférieurs.

La figure 5 présente la différence d'énergie du premier harmonique entre les productions de mécanisme M1 et M2. Les comparaisons sont effectuées sur les limites maximales des phonétogrammes. La figure présente séparément les résultats pour les hommes et pour les femmes, et pour les deux voyelles étudiées. Nous pouvons essentiellement observer les deux points suivants :

- La différence de niveau du premier harmonique a tendance à décroître avec la fréquence fondamentale pour les hommes, alors qu'elle reste quasiment constante et proche de zéro pour les femmes.
- la différence de niveau de H1 entre les mécanismes M1 et M2, est identique sur les voyelles /a/ et /i/.

Dans le cadre de la théorie source-filtre linéaire, et si l'on fait l'hypothèse que les fréquences formantiques sont les mêmes en M1 et en M2 (pour une fréquence fondamentale donnée), alors la différence d'amplitude de H1 mesurée sur le son rayonné est la même que celle que l'on observerait sur le signal de source. Deux possibilités s'offrent alors à nous pour expliquer les résultats présentés :

- soit, pour un mécanisme donné, le niveau de H1 (mesuré à la source) ne dépend pas de la voyelle sur les limites supérieures.
- soit le niveau de H1 à la source n'est pas le même pour /a/ et pour /i/ (sur les limites supérieures des phonétogrammes), mais dans ce cas la différence de niveau observée sur le H1 de source entre /a/ et /i/ est la même en M1 et en M2.

5 Quelle interprétation en termes de signal de source?

Nous avons vu que la région fréquentielle qui détermine le SPL était due au filtre, et plus précisément à la fréquence du premier ou des deux premiers formants (à l'exception des productions les plus graves en mécanisme M2 pour les hommes). Nous allons maintenant chercher à comprendre quels éléments provenant de la source pourraient impliquer les différences de niveaux observées dans ces régions.

Dans la plupart des modèles, l'onde de débit glottique (ODG) est déterminée à l'aide des paramètres présentés sur la figure 6 : trois paramètres de forme, le quotient ouvert Oq , le coefficient d'asymétrie α_m et le quotient de phase de retour Qa , et un paramètre d'amplitude, l'amplitude de voisement A_v ou l'excitation maximale E (qui correspond également au MFDR). À ces paramètres s'associe naturellement la fréquence fondamentale f_0 . Schématiquement, Doval et al. [2] ont montré que le quotient ouvert déplace la fréquence du formant glottique, que le coefficient d'asymétrie en modifie son amplitude, et que le quotient de phase de retour contrôle une fréquence de coupure au delà de laquelle la pente spectrale de la source est plus forte.

La région spectrale correspondant aux premières harmoniques correspond à celle du formant glottique. Nous avons observé que la différence de niveau du premier harmonique (du signal rayonné) ne dépendait pas de la voyelle. Nous pouvons alors former l'hypothèse que le niveau du premier harmonique du signal glottique observé sur les limites supérieures des phonétogrammes, ne dépend pas de la voyelle, donc que pour les différentes voyelles, la fréquence du formant glottique reste la même. Ce résultat ne peut pas être vérifié dans l'absolu, car pour la voyelle /i/, et compte tenu de la tessiture choisie, l'échantillonnage spectral n'est pas suffisant pour estimer correctement la fréquence du premier formant. Néanmoins dans le cadre de la théorie source-filtre linéaire, cette hypothèse paraît la plus cohérente.

Il est connu que le quotient ouvert prend des valeurs très différentes en mécanisme M1 et en M2 [7], et particulièrement sur la limite supérieure des phonétogrammes. Une simulation antérieurement présentée [12] a permis d'établir que ces différences de quotient ouvert expliquent une partie des résultats. Par exemple, si le quotient ouvert passe de 0,4 en M1 à 0,8 en M2, la fréquence du formant glottique est multipliée par 2, ce qui entraîne une différence pou-

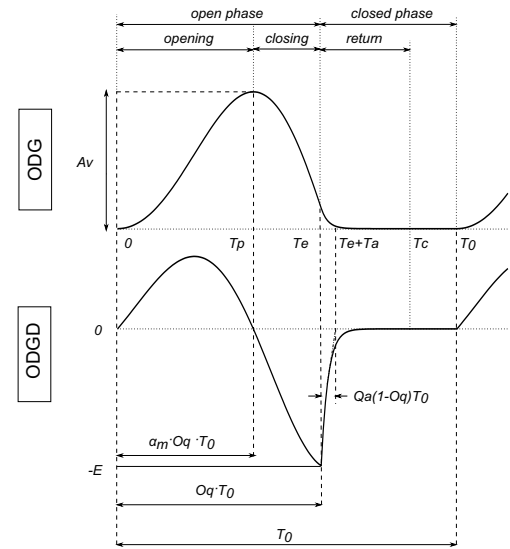


Figure 6: Représentation schématique d'une onde de débit glottique (ODG) ainsi que de sa dérivée (ODGD). Adapté de [2].

vant aller jusqu'à 12 dB entre l'harmonique 1 (déterminant le SPL du /i/) et l'harmonique 4 (déterminant en moyenne le SPL du /a/). Le coefficient d'asymétrie pourrait également jouer un rôle important. En effet en mécanisme M2 les cordes vocales sont fines [16], et l'oscillation est plus régulière, ce qui se traduit par une onde de débit glottique plus sinusoïdale en mécanisme M2 qu'en M1 [20]. Nous pouvons donc nous attendre à observer des α_m plus faibles, ce qui aurait pour conséquence d'abaisser le niveau des harmoniques de rang supérieur à 2. Enfin, il est raisonnable de considérer que le quotient de phase de retour conserve une valeur très faible sur les productions vocales de plus forte intensité. Ainsi Qa ne joue probablement qu'un rôle minime sur la bande de fréquences 500-1000 Hz.

Nous avons observé que la différence de niveau du premier harmonique entre les mécanismes M1 et M2 dépendait de la fréquence fondamentale pour les hommes et pas pour les femmes. Ce résultat pourrait être dû à une différence d'entraînement vocal. En effet les hommes (à l'exception des contre-ténors) utilisent presque exclusivement le mécanisme M1 dans le chant lyrique, alors que les femmes utilisent surtout le mécanisme M2 et, comme les contre-ténors, travaillent l'homogénéisation des deux mécanismes laryngés dans leur zone de recouvrement (qui correspond à la tessiture que nous avons étudié). Pour clarifier l'influence de l'entraînement vocal sur la différence de niveau du premier harmonique entre M1 et M2, il serait nécessaire d'effectuer des mesures similaires à celles présentées dans cet article pour trois groupes distincts : des ténors, baryton et basses d'une part, pour des contre-ténors, et pour un dernier groupe constitué de voix de femmes. Si notre hypothèse est valide, les résultats des contre-ténors devraient être similaires à ceux des femmes.

6 Conclusion

Dans la tessiture do2 - do4, le niveau maximal possible est de 10 dB supérieur sur la voyelle /a/ que sur la voyelle /i/ en mécanisme M1, et pas en mécanisme M2, pour les hommes comme pour les femmes. Les résultats montrent

que le niveau SPL, déterminé par la ou les harmoniques les plus amples du spectre, correspond, dans la plupart des cas, à la région du premier ou du deuxième formant. Pour /i/, il s'agit habituellement du premier ou des deux premiers harmoniques, dont le niveau est proche en M1 et en M2. Pour /a/, il s'agit d'une région située vers 500 - 1000 Hz (en fonction des chanteurs), dont le niveau varie beaucoup en fonction du mécanisme laryngé. Au niveau glottique, ces différences sont en partie attribuables au quotient ouvert, mais le coefficient d'asymétrie pourrait également intervenir.

La différence de niveau de l'harmonique 1 entre M1 et M2 semble ne pas dépendre de la voyelle. L'harmonique 1 pourrait ainsi contenir une information sur le niveau maximal que peut produire un chanteur.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement les 21 chanteurs qui ont accepté de participer à cette étude. Ces travaux font suite à une thèse de doctorat financée par la Fondation de France.

References

- [1] A. Bouhuys, J. Mead, D.F. Proctor, K.N. Stevens, "Pressure-flow events during Singing", *Annals of the New York Academy of Sciences* Blackwell Publishing Ltd, 1968, **155**, 165-176
- [2] B. Doval, C. d'Alessandro, N. Henrich, "The Spectrum of Glottal Flow Models", *Acta Acustica united with Acustica* **92**, 1026-1046 (2006)
- [3] G. Fant, K. Fintoft, J. Liljencrants, B. Lindblom, J. Mártony, "Formant-Amplitude Measurements", *J. Acoust. Soc. Am.* **35**(11), 1753-1761 (1963)
- [4] J. Gauffin, J. Sundberg, "Spectral correlates of glottal voice source waveform characteristics", *J. Speech Hear. Res.* **32**, 556-565 (1989)
- [5] P. Gramming, "Vocal Loudness and Frequency Capabilities of the Voice", *J. Voice* **5**(2), 144-157 (1991)
- [6] P. Gramming, J. Sundberg, "Spectrum factors relevant to phonetogram measurement", *J. Acoust. Soc. Am.* **83**(6), 2352-2360 (1988)
- [7] N. Henrich, C. d'Alessandro, B. Doval, M. Castellengo, "Glottal open quotient in singing: measurements and correlation with laryngeal mechanisms, vocal intensity, and fundamental frequency", *J. Acoust. Soc. Am.* **117**(3), 1417-1430 (2005)
- [8] N. Isshiki, "Regulatory mechanism of voice intensity variation", *J. Speech Hear. Res.* **7**, 17-29 (1964)
- [9] P. Ladefoged, N. P. McKinney, "Loudness, Sound Pressure, and Subglottal Pressure in Speech", *J. Acoust. Soc. Am.* **35**, 454-460 (1963)
- [10] S. Lamesch, "Mécanismes laryngés et voyelles en voix chantée. Dynamique vocale, phonétogrammes de paramètres acoustiques et spectraux, transitions de mécanismes", PhD thesis, UPMC univ. Paris 6, France (2010)
- [11] S. Lamesch, B. Doval, M. Castellengo, "Phonetograms of laryngeal source parameters for different vowels and laryngeal mechanisms", In *Acoustics'08*, Paris. In *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 3243 (2008)
- [12] S. Lamesch, B. Doval, M. Castellengo, "Towards a more informative Voice Range Profile: the role of laryngeal vibratory mechanisms on vowels dynamic range", *J. Voice*, (in press).
- [13] J. P. H. Pabon, "Objective Acoustic Voice-Quality Parameters in the Computer Phonetogram", *J. Voice* **5**(3), 203-216 (1991)
- [14] A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, The Acoustical Society of America, New York (1991)
- [15] A. M. Sulter, H.K. Schutte, D.G. Miller, "Differences in Phonetogram Features Between Male and Female Subjects With and Without Vocal Training", *J. Voice* **9**(4), 363-377 (1995)
- [16] B. Roubeau, N. Henrich, M. Castellengo, "Laryngeal Vibratory Mechanisms: The Notion of Vocal Register Revisited", *J. Voice* **23**, 425-438 (2009)
- [17] H. K. Schutte, *The efficiency of voice production*, Kemper (1980)
- [18] W. Seidner, H. Krüger, K.-D. Wernecke, "Numerische Auswertung spektraler Stimmfelder", *Sprache - Stimme - Gehör* **9**(1), 10-13 (1985)
- [19] B. Stout, "The Harmonic Structure of Vowels in Singing in Relation to Pitch and Intensity", *J. Acoust. Soc. Am.* **10**, 137-146 (1938)
- [20] J. Sundberg, C. Högset, "Voice source differences between falsetto and modal registers in counter tenors, tenors and baritones", *Log. Phon. Vocol.* **26**, 26-36 (2001)
- [21] J. Sundberg, I.R. Titze, R. Scherer, "Phonatory control in male singing : a study of the effects of the subglottal pressure, fundamental frequency, and mode of phonation on the voice source", *J. Voice* **7**, 15-29 (1993)
- [22] I. R. Titze, "On the relation between subglottal pressure and fundamental frequency in phonation", *J. Acoust. Soc. Am.* **85**, 901-906 (1989)
- [23] I. R. Titze, "Nonlinear source-filter coupling in phonation: Theory", *J. Acoust. Soc. Am.* **123**(5), 2733-2749 (2008)
- [24] I. R. Titze, J. Sundberg, "Vocal intensity in speakers and singers", *J. Acoust. Soc. Am.* **91**(5), 2936-2946 (1992)
- [25] S. K. Wolf, D. Stanley, W. Sette, "Quantitative Studies on the Singing Voice", *J. Acoust. Soc. Am.* **6**, 255-266 (1935)