

**UNIVERSITE PARIS III - SORBONNE NOUVELLE**  
Institut de Linguistique et de Phonétique Générales et Appliquées

## **RESUME DE LA THESE (10 pages)**

Pour obtenir le grade de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS III  
Discipline : Phonétique

### **SUR L'EFFICACITE VOCALE DANS LE CHANT LYRIQUE** **Aspects physiologique, cognitif, acoustique et perceptif**

Présentée et soutenue publiquement par

**Claire PILLOT**

Le 02 décembre 2004

**Directeur de thèse:**

**Madame Jacqueline VAISSIERE, Professeur**

Composition du Jury :

Madame Jacqueline Vaissière	Directrice de thèse
Madame Michèle Castellengo	Présidente
Monsieur Didier Demolin	Rapporteur
Monsieur Christophe d'Alessandro	Rapporteur
Monsieur Shinji Maeda	Examineur
Docteur Benoît Amy de la Bretèque	Examineur

Notre société se tourne vers la recherche de la performance, et, dans ce domaine, la phonation n'est pas en reste. Qui plus est, les professionnels de la voix, et plus particulièrement les chanteurs lyriques, se doivent de satisfaire cette exigence de performance en étant *efficaces* vocalement, quelle que soit la circonstance de l'émission.

Il arrive cependant que cette capacité de performance vocale, acquise durant de nombreuses années d'apprentissage, fasse défaut au chanteur : notre pratique d'orthophoniste rééducatrice vocale nous le prouve chaque jour. Comment restaurer cette *efficacité vocale* chez ces sujets ?

Pour aider les chanteurs lyriques dont l'efficacité vocale est affectée, ou bien dans l'optimisation de cette efficacité dans un contexte pédagogique, il convient bien entendu de mieux définir cette efficacité vocale dans ses fondements physiologiques, acoustiques, cognitifs et perceptifs. La phonétique expérimentale nous est apparue comme un outil de choix pour satisfaire cette exigence.

L'objectif de cette thèse est d'éclairer les principales difficultés rencontrées dans la définition et la mesure de l'efficacité vocale, et ce d'une façon pluridisciplinaire. L'intérêt de la thèse est la combinaison de mesures pour mieux définir l'efficacité vocale dans le chant lyrique. La problématique de notre travail s'inscrit donc dans le cadre d'une étude transversale de l'efficacité vocale dans le chant lyrique par rapport à la parole.

**Le but de la thèse est de contribuer à répondre aux deux questions suivantes :**

- 1. Quels sont les marqueurs d'efficacité vocale dans le chant lyrique (définition, mesures, difficultés d'obtention) ?**
- 2. Parmi les marqueurs mesurables, quels sont les plus utilisables cliniquement (facilité et rapidité d'analyse, mesures non invasives) et les plus pertinents (ceux qui différencient significativement le chant lyrique par rapport à la parole) ?**

Nous n'avons pas cherché à comparer des chanteurs professionnels à des sujets débutants ; notre thèse s'est limitée à l'étude de l'efficacité vocale dans le chant par rapport à celle de la parole chez les mêmes sujets. Une perspective pour donner suite à cette étude sera, dans les mêmes disciplines, de comparer les marqueurs d'efficacité vocale les plus utilisables cliniquement, et différenciant le chant lyrique de la parole, chez des chanteurs et chez des non-chanteurs.

Nous définissons en **introduction** de notre travail les notions ambiguës se rapportant aux termes de « rendement » et d'« efficacité » : nous soulignons la différence terminologique entre les termes de « rendement vocal » – choisi au détriment du terme générique de « vocal efficiency » – et d'« efficacité vocale ». Dans cette étude, d'une part, le « rendement vocal », notion purement physique, renvoie uniquement au rapport de l'énergie utilisable (intensité vocale) à l'énergie totale dépensée (pression sous-glottique et débit) : il ne dépend que de la production vocale par le locuteur. D'autre part, « l'efficacité vocale » est définie comme la faculté de produire un effet ; celle-ci considère à la fois le locuteur et l'auditeur et intègre des aspects cognitifs, spectraux et perceptifs.

Cette thèse de compose d'une partie théorique, d'une partie expérimentale, et de quatre chapitres. Le **chapitre I** est une approche théorique de la question du rendement et de l'efficacité vocale dans la parole et le chant, dans lequel nous effectuons une revue de littérature. Les trois chapitres suivants constituent l'approche expérimentale proprement dite. Ils décrivent une étude acoustico-aérodynamique de l'efficacité vocale par le calcul du rendement vocal (**chapitre II**), une étude sur la représentation cognitive de l'efficacité vocale (**chapitre III**) et trois études sur les aspects acoustiques, radiologiques et perceptifs de cette notion (**chapitre IV**).

Dans le **chapitre I** (approche théorique), nous débutons l'étude bibliographique sur le rendement et l'efficacité vocale en réalisant l'**inventaire des termes correspondants employés dans les études antérieures**. Il ressort de cette synthèse que 67% des études en parole normale et pathologique s'intéressent à l'efficacité vocale en utilisant des mesures de rendement (« efficiency »), contre 25% des études sur l'efficacité vocale en chant. Les deux autres façons d'étudier l'efficacité vocale sont l'efficacité spectrale corrélée au formant du chanteur<sup>1</sup> (« effectiveness », un dixième des études consacrées à la voix normale, un vingtième de celles consacrées à la pathologie et un tiers des études concernant la voix chantée), et le rendement vocal relié au Temps Maximal de Phonation (T.M.P.)<sup>2</sup>, au Quotient ouvert (Q.O.)<sup>3</sup> et à des considérations pédagogiques (« efficiency »).

De cette classification des termes consacrés au rendement et à l'efficacité vocale employés par les auteurs, nous décrivons ensuite :

1° les travaux consacrés au **rendement vocal**<sup>4</sup>, ses composantes aérodynamiques (*pression sous-glottique* et *débit d'air expiré*) et acoustiques (*intensité*), ainsi que la diversité des *formules* existant dans la littérature. Le **rendement vocal** est une formule composée du rapport de l'intensité vocale à l'énergie consommée par le corps pour la phonation, par unité de temps. Cette énergie consommée par le corps est la puissance glottique, c'est-à-dire la pression sous-glottique multipliée par le débit d'air à la glotte (Isshiki, 1981). La *pression sous-glottique*  $P_s$ , en Pascal ou cm H<sub>2</sub>O, est la pression d'air créée par le flux de l'air expiré contre les cordes vocales en parties fermées (Bunch, 1997), mais sa mesure par divers procédés est difficile : les méthodes invasives permettant sa mesure (pression trachéale) présentent l'avantage d'être fiables et réalisables à l'aide d'un protocole varié mais se limitent à un petit nombre de locuteurs (cf. les 14 articles existants que nous avons examinés<sup>5</sup>) ; les méthodes non invasives (pression intra-orale) présentent l'avantage d'être applicables à une plus grande population de sujets<sup>6</sup>, mais leur utilisation exige un protocole limité. Leur fiabilité est discutable pour l'étude de la voix chantée. La comparaison des pressions trachéale et intra-orale dans la parole et le chant d'une part, et le calcul du rendement vocal à l'aide de la pression trachéale d'autre part, n'ont jamais été effectués.

---

<sup>1</sup> Le formant du chanteur se définit comme un ensemble d'harmoniques renforcés entre 2000 et 4000 Hz pour les voix chantées lyriques entraînées, quelle que soit la voyelle ou la hauteur sonore émises par un chanteur donné.

<sup>2</sup> Le temps maximum de phonation (T.M.P.) est le temps de tenue maximale d'une émission vocalique après une inspiration profonde.

<sup>3</sup> Le quotient ouvert est le pourcentage du cycle glottique où les cordes vocales sont ouvertes, sur la période totale du cycle vibratoire de celles-ci.

<sup>4</sup> Principaux travaux : Vogelsanger (1954), Van den Berg (1956), Bouhuys *et al.* (1968), Isshiki (1964, 1981), Schutte (1980, 1984, 1992), Tang *et al.* (1995), Berry *et al.* (2001).

<sup>5</sup> Principaux travaux : Van den Berg (1956), Isshiki (1964), Rubin *et al.* (1967), Lieberman (1968), McGlone *et al.* (1970), Löfqvist *et al.* (1982), Schutte (1980, 1984), Schutte *et al.* (1986), Miller *et al.* (1990), Demolin *et al.* (1997), Lecuit *et al.* (1998), Bucella *et al.* (2000), Lecuit *et al.* (2001).

<sup>6</sup> Pression intra-orale seule : Di Cristo *et al.* (1979), Holmberg *et al.* (1988, 1989, 1994), Netsell *et al.* (1991), Till *et al.* (1992), Titze (1992), Akerlund *et al.* (1994), Tang *et al.* (1995), Sundberg (1995), Hans (1996), Sulter *et al.* (1996), Blomgren *et al.* (1998), Vilkmann *et al.* (1999), Sundberg (1990, 1999), Sundberg *et al.* (1993b, 1999), Thalen *et al.* (2000).

Le *débit d'air expiré* est la quantité de l'air expiré par la bouche par unité de temps (seconde). Si cette quantité d'air est mesurée durant la phonation, on parle de débit phonatoire, en litre par seconde (l/s) ou millilitre par seconde (ml/s). Sa mesure, au moyen d'un dispositif appelé pneumotachographe, est aisée mais l'utilisation de ce dispositif peut fausser certaines mesures d'intensité associées, en particulier pour les voix entraînées.

L'*intensité* sonore est un flux d'énergie (ondes) par unité de surface et par seconde. Le niveau d'intensité se mesure en dB et cette mesure peut s'effectuer simultanément aux paramètres précédents. De nombreux facteurs influencent les valeurs de pression sous-glottique, intensité, débit d'air expiré et rendement vocal (fréquence fondamentale, intensité, débit, taux d'adduction des cordes vocales, facteurs phonétiques, mode d'analyse) ; aucune étude n'a pris en compte l'ensemble de ces facteurs dans les valeurs obtenues de ces paramètres.

Les *formules de rendement vocal* utilisées par la littérature comprennent 3 paramètres (intensité, pression sous-glottique et débit d'air expiré)<sup>7</sup> ou deux (intensité et débit d'air expiré<sup>8</sup>, ou intensité et pression sous-glottique<sup>9</sup>, ou encore intensité sur intensité de collision des cordes vocales, Berry *et al.*, 2001). Elles intègrent parfois la fréquence fondamentale, la surface intérieure du pneumotachographe, le rendement de transfert et de radiation et les caractéristiques du local d'enregistrement<sup>10</sup>. Cependant, les unités employées et le détail de ces formules ne sont pas toujours précisés, ainsi que les liens existant entre elles.

2° En plus de l'inventaire des termes employés dans les études antérieures concernant le rendement vocal et l'efficacité vocale et de la description des travaux consacrés au rendement vocal, le **chapitre I** rappelle les travaux consacrés aux **aspects spectraux de l'efficacité vocale** déterminés à partir du formant du chanteur. Celui-ci se définit comme un ensemble d'harmoniques renforcés entre 2000 et 4000 Hz pour les voix chantées lyriques entraînées, quelles que soient la voyelle ou la hauteur sonore émises par un chanteur donné. D'origine controversée, il a pour principal rôle perceptif la portée vocale et d'échapper à l'effet de masque de l'orchestre. Son centre fréquentiel permet la mesure de l'efficacité vocale spectrale selon 3 formules de rapport des courbes d'intensité des fréquences du formant du chanteur sur l'intensité totale, et 4 formules de différences d'amplitude entre les harmoniques situés en dessous de 2000 Hz et au-dessus dans les spectres des sons correspondants des articles de la littérature<sup>11</sup>. Cette caractéristique est importante pour les trois maillons de la chaîne de communication verbale, notamment du point de vue du destinataire du message, mais elle ne tient pas compte des données d'entrée (paramètres respiratoires).

La synthèse de cette revue de la littérature met en évidence la diversité et la non-simultanéité des mesures associées à l'efficacité vocale et au rendement vocal, et souligne combien il est difficile de déterminer clairement des marqueurs d'efficacité vocale. Nous concluons notre première partie en discutant ces études et c'est à partir de cette discussion que nous avons pu élaborer une réflexion puis justifier et introduire nos propres expériences. Les divers aspects du rendement vocal et de l'efficacité

---

<sup>7</sup> Travaux de : Van den Berg (1956), Isshiki (1964), Cavagna *et al.* (1968), Bouhuys *et al.* (1968), Koyama (1972), Schutte (1980, 1984), Titze (1988), Holmberg *et al.* (1988), Iwata (1988), Yanagi *et al.* (1991), Bard *et al.* (1992), Nasri *et al.* (1994), Hans (1995), Tang *et al.* (1995), Laukkanen *et al.* (1995), Sundberg (1995), Sulter *et al.* (1996).

<sup>8</sup> L'étude de Isshiki (1981 : rapport du composant alternatif AC ou débit glottique divisé par le taux de débit moyen) mise à part, les travaux correspondants sont ceux de : Vogelsänger (1954), Tanaka *et al.* (1985), Kakita (1987), Sawashima (1988).

<sup>9</sup> Klingholz (1979), Sawashima (1988).

<sup>10</sup> Respectivement travaux de : Kakita (1987), Titze (1992), Tang *et al.* (1995), Isshiki (1964), Koyama (1972), Nasri *et al.* (1994), Tanaka *et al.* (1985).

<sup>11</sup> Winckel (1971), Klingholz (1992), Schultz-Coulon *et al.* (1979), Schutte *et al.* (1984, 1986), Seidner *et al.* (1995), Novak *et al.* (1995), Omori *et al.* (1996).

vocale n'ont pas été envisagés simultanément avant notre propre étude. 1) Il existe une équivalence empirique entre les formules de rendement vocal comprenant l'intensité, la pression sous-glottique et le débit (nommées  $R_{Pq}$ ), et celles comprenant l'intensité et le débit (nommées  $R_q$ ). Nous choisissons donc le rendement dans le débit  $R_q$  (dont la validité est à vérifier par des mesures de l'intensité, de la pression sous-glottique et du débit), comme marqueur d'efficacité vocale du point de vue de rendement vocal. Il nous apparaît nécessaire de calculer le rendement vocal avec des méthodes fiables d'acquisition des paramètres qui le composent (dont la pression sous-glottique, expérience 1) ; 2) nous devons définir l'efficacité vocale à tous les niveaux de la chaîne de la communication, et en particulier au niveau cognitif (absence de littérature consacrée à l'aspect cognitif de l'efficacité vocale, expérience 2) ; 3) il sera aussi nécessaire de prendre en compte le conduit vocal dans la définition physiologique de l'efficacité vocale (expérience 4) ; 4) enfin, il faut préciser la définition de l'efficacité vocale en termes spectraux (expérience 3) et perceptifs (expériences 5 et 6) face aux limites des mesures du rendement vocal : le choix d'une formule d'efficacité vocale spectrale dépend des valeurs du formant du chanteur.

Au **chapitre II**, dans le souci d'obtenir le marqueur d'efficacité vocale du point de vue de la production (rendement vocal) le plus utilisable cliniquement et différenciant chant et parole, 5 mesures simultanées des pressions trachéale  $P_t$  et intra-orale  $P_{io}$ , débit d'air  $q$ , intensité  $I$  et fréquence fondamentale  $F_0$  ont été effectuées chez un sujet masculin non entraîné au chant (*expérience 1*). Les mêmes mesures (exceptée  $P_t$ ) ont été effectuées chez un sujet féminin chanteur (*étude préliminaire*). Le corpus analysé était composé de 162 syllabes et 30 phrases parlées, de 81 syllabes et 54 phrases chantées sur les trois voyelles cardinales du français, et de 6 *glissandi* sur [a]. Le calcul du rendement vocal a été effectué selon le rendement dans la pression et le débit  $R_{Pq}$ , le rendement dans le débit  $R_q$  et le rendement vocal contenant l'intensité et la pression sous-glottique  $R_p$  mis en évidence dans le chapitre I.

Les résultats montrent :

(i) un écart entre la pression trachéale et l'estimation de la pression sous-glottique médiane à partir des pics de pression intra-orale (presque la moitié des items) pour le sujet non entraîné ;

(ii) la confirmation d'une corrélation positive entre le rendement dans la pression et le débit ( $R_{Pq}$ ), et le rendement dans le débit ( $R_q$ ), nous permettant ainsi de remédier aux difficultés d'acquisition de la pression sous-glottique  $P_s$  (méthode invasive ou exactitude de l'estimation de  $P_s$  inconstante) et de mesurer le rendement vocal dans un contexte compatible avec le quotidien clinique et pédagogique. Ces constatations nous amènent à proposer la formule de rendement vocal la plus étroitement corrélée au rendement composé de l'intensité, de la pression sous-glottique et du débit ( $R_{Pq}$ ), telle la différence entre  $I$  et le logarithme du débit ( $R_q$ ) jadis utilisée par Sawashima (1988), comme un marqueur de rendement vocal aisément utilisable en vue d'une pratique clinique ou pédagogique.

(iii) A intensités et items comparables, la plupart des valeurs de  $P_t$ ,  $I$ ,  $F_0$  (non contrôlée),  $I$ ,  $q$ ,  $R_q$  obtenues en parole sont analogues à celles de la littérature pour le sujet non entraîné. Les valeurs extrêmes de la pression trachéale sont de 2 à 12 hPa pour ce sujet : ceci nous autorise à utiliser la formule de rendement vocal ne contenant que  $I$  et  $q$  ( $R_q$ ) comme une formule estimant correctement celles contenant  $I$ ,  $P_s$  et  $q$  ( $R_{Pq}$ ). Pour les items de notre corpus n'existant pas dans la littérature, les valeurs sont plus variées en raison d'un champ de liberté exploré plus large. Les valeurs chantées correspondent en moyenne à celles de sujets non entraînés au chant lyrique chez le sujet de l'expérience 1. A intensité égale, celles du rendement dans le débit  $R_q$  sont identiques à la parole.

(iv) Enfin, les nombreux facteurs de variation influençant le rendement vocal sont à prendre en compte dans sa détermination (absence d'influence significative de la fréquence fondamentale chez le sujet non entraîné, voyelle, augmentation avec l'intensité).

Cette étude est une première étape dans la détermination de la différence entre I et le logarithme du débit ( $R_q$ ) comme l'un des marqueurs de l'efficacité vocale dans le chant lyrique, même si celui-ci ne différencie pas le chant de la parole pour notre sujet non entraîné. Il conviendrait d'étendre ces mesures chez plusieurs sujets entraînés suite à cette première expérience afin de confirmer ces données, comme nous l'avons commencé préliminairement chez une chanteuse.

L'expérience 1 ne considère cependant l'efficacité vocale que du point de vue du locuteur (rendement vocal). Considérant cette limite et dans la foulée de la deuxième nécessité soulignée dans la discussion de notre premier chapitre (définir l'efficacité vocale à tous les niveaux de la chaîne de la communication), nous avons entrepris de procéder à une description cognitive de l'efficacité vocale au moyen de l'analyse de questionnaires : celle-ci fait l'objet du **Chapitre III**. (*expérience 2*).

Dans le souci d'élargir l'étude de la définition de l'efficacité vocale en considérant le sujet auditeur et locuteur dans son ensemble, ce qui consiste notamment à intégrer l'analyse de données objectives avec l'analyse de données subjectives, ont été conduites : 1) une analyse de questionnaires à questions ouvertes demandant à 35 sujets non chanteurs et 29 sujets chanteurs de définir l'efficacité vocale dans la parole et le chant, puis d'en donner des contraires et synonymes ; 2) une analyse de questions fermées sur l'efficacité vocale à partir des résultats du premier questionnaire.

L'analyse linguistique des définitions obtenues montre une appropriation objective collective du concept d'efficacité vocale. Cette analyse a en outre permis d'ordonner les définitions et les expressions synonymiques et contraires selon 5 axes de classification : « l'efficacité vocale de perception » (« hédonique » et « acoustique »), « l'efficacité vocale de communication », « l'efficacité vocale de production », « l'efficacité vocale de conditionnement et de variabilité » et « autres expressions ». Malgré des variations liées (i) à l'activité des sujets (non chanteurs/chanteurs) ; (ii) au contexte de l'efficacité vocale (parole/chant), on observe généralement la prévalence de l'aspect perceptif (de 34 à 50% de toutes les réponses des synonymes), devant l'aspect de production.

Au sein de la catégorie «acoustique » représentant au moins 2/3 des réponses de la catégorie « efficacité vocale de perception », les sujets ont insisté sur les notions de voix portée et timbrée (surtout pour qualifier l'efficacité vocale dans le chant) ; dans la catégorie « efficacité vocale de production » les sujets ont défini, puis répété les expressions synonymiques et contraires se rapportant à une voix sans fatigue quel que soit le contexte. Les tendances les plus importantes se confirment à l'analyse des questions fermées qui ont été proposées dans un deuxième temps aux sujets.

Ces résultats montrent : (i) la nécessité de séparer l'efficacité vocale dans la parole et le chant d'une part, et de tenir compte des activités vocales des sujets d'autre part ; (ii) que la définition de l'efficacité vocale dans la parole et le chant est multidimensionnelle : (ii-a) le chanteur doit gérer organiquement sa voix, en prenant en compte des propriétés perceptives (portée) et la communication avec l'auditoire ; (ii-b) l'efficacité vocale n'est pas seulement mesurable en des termes purement physiques (comme nous l'avons fait dans l'expérience 1) mais peut inclure des marqueurs psychophysiques (portée vocale et timbre, expériences 3 à 6) et d'autres dimensions non mesurables (communication, émotion).

Dans la première expérience du **chapitre IV** (*expérience 3*), nous avons le souci d'étudier les marqueurs acoustiques de « l'efficacité vocale de perception » mise en avant par les sujets de l'expérience 2. Afin de définir les marqueurs mesurables de l'efficacité vocale différenciant le chant de la parole et utilisables cliniquement, une base de données et une analyse acoustique de voyelles parlées et chantées *messa di voce*, vocalise de Rossini, phrases parlée, déclamée puis chantée, et morceaux, est réalisée auprès de 23 chanteurs et chanteuses lyriques dont 17 professionnels. L'analyse acoustique concerne 9 paramètres spectraux de l'efficacité vocale trouvés dans la littérature : le formant du chanteur, le formant à l'octave du formant du chanteur, deux différences d'amplitude spectrales (harmoniques les plus élevés entre 2 et 4 kHz/harmoniques les plus élevés entre 0 et 2kHz : « rapport de puissance en chant » d'Omori *et al.*, 1996 ; Schutte *et al.*, 1984), 3 rapports d'intensité (intensité de la zone de 3000Hz/intensité totale : Schultz-Coulon *et al.*, 1979 ; Winckel, 1971 ; Klingholz, 1992), le Centre de Gravité Spectrale (Fabre, 1988) et la pente spectrale (Novak *et al.*, 1995).

Les résultats concernant le centre fréquentiel du formant du chanteur (valeurs comprises entre 2400 et 3500Hz) interdisent l'utilisation de certaines formules d'efficacité vocale spectrale de la littérature ne prenant pas en compte des valeurs extrêmes du formant du chanteur de nos données (formules de Winckel, 1971, Schultz-Coulon *et al.*, 1979, Schutte *et al.*, 1984). En outre, la présence d'un minimum spectral entre 3500 Hz et 5000 Hz n'est pas prise en compte dans la plupart de ces formules (formules de Klingholz, 1992, Schultz-Coulon *et al.*, 1979, Schutte *et al.*, 1984, Omori *et al.*, 1996, Novak *et al.*, 1995). Finalement, l'absence de valeurs de référence pour certaines formules (Winckel, 1971, Schutte *et al.*, 1984, Fabre, 1988), ainsi que la nécessité d'analyses fastidieuses (Fabre, 1988, Novak *et al.*, 1995) ou nécessitant l'utilisation de filtres (Schultz-Coulon *et al.*, 1979 ; Winckel, 1971 ; Klingholz, 1992), nous conduit à choisir le « Rapport de Puissance en chant » d'Omori *et al.* (1996) comme le marqueur de l'« efficacité vocale de perception » différenciant le chant de la parole, et compatible avec une utilisation dans un contexte clinique ou pédagogique. Cependant, celui-ci ne tenant pas compte du minimum spectral, nous avons mis en évidence un autre marqueur d'efficacité vocale spectrale complémentaire au précédent, constitué par la différence entre l'amplitude du formant du chanteur et celle du minimum spectral qui le suit. Seul ce dernier paramètre différencie significativement les professionnels des amateurs.

Le « rapport de Puissance en Chant » d'Omori *et al.* (1996) et la différence entre l'amplitude du formant du chanteur et celle du minimum spectral qui le suit, sont significativement corrélés aux autres formules d'efficacité vocale spectrale, excepté celle de Schultz-Coulon *et al.*, 1979. La présence du formant du chanteur s'accompagne des plus grandes valeurs du Rapport de Puissance en Chant (Omori *et al.*, 1996) vers -16 dB, et de la différence entre l'amplitude du formant du chanteur et celle du minimum spectral qui le suit de 32 dB en moyenne chez les professionnels.

A une grande intensité, à la voyelle [i] parlée par rapport aux autres voyelles parlées, au chant par rapport à la parole (voyelles, phrases) est associée une meilleure efficacité vocale spectrale (grandes valeurs du Rapport de Puissance en Chant et de la différence entre l'amplitude du formant du chanteur et celle du minimum spectral qui le suit). Il existe toutefois une variabilité en fonction des items produits et de la catégorie vocale des sujets. La comparaison des voyelles parlées et chantées (sons *messa di voce*) à fréquence fondamentale analogue montre le rapprochement des 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> formants pour [i], [a] et [u], contribuant à la création du formant du chanteur, suivi d'un important minimum spectral plus important en chant.

Par conséquent, le Rapport de Puissance en Chant et la différence entre l'amplitude du formant du chanteur et celle du minimum spectral qui le suit peuvent être considérés comme deux marqueurs complémentaires d'efficacité vocale spectrale, utilisables dans un contexte clinique, différenciant significativement le chant lyrique de la parole. Concernant la différence entre professionnels et amateurs, il convient d'étendre ces analyses à une plus grande population de chanteurs débutants afin de confirmer la capacité de ces marqueurs d'efficacité vocale spectrale à montrer cette différence.

Dans le souci de prendre en compte le conduit vocal dans la définition physiologique de l'efficacité vocale, l'*expérience 4* a été consacrée au corrélat physiologique de l'efficacité spectrale, dont le formant du chanteur est un des principaux aspects, et a utilisé l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) chez un chanteur professionnel. 21 coupes sagittales médianes d'IRM des voyelles françaises [a], [i] et [o] parlées et chantées à la même fréquence (100 Hz) ont été effectuées<sup>12</sup>. Les résultats ont montré un grand nombre de modifications articulatoires de la parole au chant (abaissement du larynx de deux centimètres, abaissement du corps de la langue, postériorisation du point de constriction linguale, abaissement mandibulaire, protrusion labiale, réduction de la courbure cervicale). La fonction de transfert estimée à partir de ces données physiologiques, grâce au programme de simulation acoustique du conduit vocal de Maeda, montre plusieurs modifications acoustiques de la parole au chant, dont la plus importante est le rapprochement des troisième et quatrième formants de toutes les voyelles de la parole au chant. Ce phénomène correspond au formant du chanteur observable dans les productions acoustiques enregistrées du sujet.

L'analyse acoustique comparative des paramètres spectraux de l'efficacité vocale des voyelles synthétiques et naturelles fait apparaître que toutes les voyelles naturelles sont plus « efficaces » spectralement que leurs équivalentes simulées, à fréquences formantiques analogues, exceptés F5 et F6 plus élevés dans les voyelles naturelles. De plus, le minimum spectral suivant le formant du chanteur et repoussant le formant à l'octave à une fréquence plus élevée n'existe que pour les voyelles naturelles, en raison de la non prise en compte par le modèle de Maeda du rôle des sinus piriformes créant ce minimum spectral (Dang *et al.*, 1997 ; Titze *et al.*, 1997). Une participation de la source dans l'efficacité vocale spectrale des voyelles chantées non prise en compte par le modèle explique également la plus grande efficacité vocale spectrale des voyelles naturelles (valeurs du Rapport de Puissance en Chant et de la différence entre l'amplitude du formant du chanteur et celle du minimum spectral qui le suit, plus élevées). Ces phénomènes acoustiques se retrouvent dans les émissions chantées par les sujets de même catégorie vocale de notre expérience 3.

Cette étude invasive ne portant que sur un seul sujet pouvant posséder sa propre stratégie d'émission des sons chantés, des études semblables chez des chanteurs d'autres catégories et pratiquant diverses techniques vocales seraient nécessaires afin de vérifier ces données.

---

<sup>12</sup> L'expérience, après de nombreux essais sur nous-même, s'est déroulée dans le service de Radiologie de l'hôpital Robert Debré et nous remercions particulièrement le Docteur Elmaleh, radiologue, de nous avoir précieusement aidée dans ces recherches, et Shinji Maeda de nous avoir assistée dans l'analyse de ces données, ainsi que notre sujet chanteur.

Ces deux dernières expériences nous ont montré que le conduit vocal pouvait être pris en compte dans la définition acoustique (*expérience 3*) et physiologique (*expérience 4*) de l'efficacité vocale au travers de l'Imagerie par Résonance Magnétique dans l'étude de la production du formant du chanteur. L'IRM révèle les positions articulaires permettant l'existence du formant du chanteur, principal élément de l'efficacité vocale spectrale.

L'*expérience 5* est un test perceptif à base des productions de l'expérience 4. Quatre tests de discrimination de paires de voyelles [a], [i] et [o] synthétisées et naturelles ont été effectués auprès de 8 auditeurs non chanteurs et 12 auditeurs chanteurs ayant tous défini l'efficacité vocale au moyen de questionnaires (expérience 2). La consigne des deux premiers tests concernant les voyelles naturelles puis synthétiques était la perception d'une différence entre deux voyelles d'une paire. La consigne des deux derniers tests concernant les voyelles naturelles puis synthétiques était de choisir la voyelle la plus « efficace » parmi la voyelle parlée ou chantée de la paire.

Concernant les deux premiers tests, nos résultats montrent que les ¾ de l'ensemble de nos auditeurs perçoivent une différence entre les voyelles parlées et chantées naturelles et synthétiques. La perception d'une différence entre les voyelles « parlée » et « chantée » est plus importante pour les voyelles simulées et chez les sujets chanteurs.

Pour les deux derniers tests, nos résultats montrent que plus du ¾ de l'ensemble de nos auditeurs perçoivent les voyelles chantées comme plus « efficaces » que les voyelles parlées, mais cette tendance est moins affirmée : 1° pour les sujets non chanteurs ; 2° pour les voyelles naturelles (excepté pour les auditeurs chanteurs) ; 3° si la voyelle chantée est en deuxième position de la paire (excepté pour les auditeurs chanteurs dans les voyelles synthétiques).

La différence entre les voyelles parlées et les voyelles chantées (ces dernières étant considérées comme les plus efficaces par les ¾ de nos auditeurs) – marquée par l'absence versus la présence du formant du chanteur et des autres paramètres d'efficacité vocale spectrale – est donc pertinente perceptivement, et ce d'autant plus que l'efficacité vocale n'est véhiculée que par l'aspect articulaire (voyelles synthétiques), et que l'écoute de telles voyelles concerne des auditeurs entraînés au chant. La notion d'efficacité vocale dans le chant était bien entendue par les caractères de portée et de clarté de la voix que les auditeurs ont évoqué dans leurs définitions de cette efficacité vocale (expérience 2).

Dans l'*expérience 6*, 54 auditeurs chanteurs et non chanteurs ont librement qualifié une voix de ténor accompagnée d'un orchestre dans un extrait enregistré de Faust de Gounod. Les stimuli comprenaient deux fois le même extrait, le premier dont le formant du chanteur était filtré, et le deuxième original (avec le formant du chanteur). Les auditeurs connaissaient l'existence d'un stimulus filtré et d'un stimulus original.

En exprimant *librement* les principales différences perçues entre les 2 productions au niveau de la voix du chanteur (qualification du deuxième extrait par rapport au premier ou le premier par rapport au deuxième), les auditeurs ont employé 10 qualificatifs par personne ; ces expressions sont qualifiables en 12 catégories dont les plus importantes sont relatives par ordre décroissant : au timbre vocal (2<sup>ème</sup> voix plus « brillante »), à l'esthétique (2<sup>ème</sup> voix plus « belle »), à l'articulation (2<sup>ème</sup> voix plus « compréhensible »), à l'émotion (2<sup>ème</sup> voix plus « chaleureuse »), à l'intensité (2<sup>ème</sup> voix plus « forte »), à la hauteur (2<sup>ème</sup> voix plus « haute ») et à la position de la voix par rapport à l'orchestre (2<sup>ème</sup> voix mieux entendue par rapport à l'orchestre).

Les corrélats perceptifs de la présence du formant du chanteur et des paramètres d'efficacité vocale spectrale sont donc nombreux. En effet, le timbre, principal corrélat perceptif pour notre population, est un attribut multidimensionnel (Castellengo, 1993-1994) : une grandeur physique comme le formant du chanteur affecte donc une multiplicité de grandeurs perceptives que la littérature n'a pas toujours mise en évidence (articulation, émotion...) et que nos sujets répondants au questionnaire sur la définition de l'efficacité vocale (expérience 2) ont remarqué. L'étude de la perception d'un extrait orchestral en plus de sons isolés, et la méthode de la libre qualification des extraits écoutés a permis d'approcher cette perception multidimensionnelle de l'efficacité vocale.

Ces deux dernières expériences nous ont montré que le formant du chanteur s'inscrit dans la définition de l'efficacité vocale en termes spectraux et perceptifs et correspond à la prévalence de l'aspect perceptif sur les autres aspects identifiés par les sujets interrogés dans l'expérience 2 (aspect cognitif de l'efficacité vocale). C'est par ce dernier point que nous avons conclu cette recherche.

## CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

En conclusion, nous dressons le bilan de cette étude en résumant les chapitres, puis nous discutons de leur contenu afin de répondre aux deux questions que nous avons posées en introduction de ce travail : 1. les principaux marqueurs d'efficacité vocale dans le chant lyrique sont le rendement vocal et l'efficacité vocale spectrale, mais aussi d'autres paramètres non mesurables (émotion, communication). 2. La formule de rendement vocal contenant uniquement l'intensité et le débit ( $R_q$ ), le Rapport de Puissance en chant et la différence entre l'amplitude du formant du chanteur et celle du minimum spectral qui le suit, sont les principaux marqueurs d'efficacité vocale mesurables les plus utilisables cliniquement et différenciant significativement le chant lyrique de la parole. Le Rapport de Puissance en chant et la différence entre l'amplitude du formant du chanteur et celle du minimum spectral qui le suit, sont corrélés, dans notre étude, à l'abaissement laryngé, à la mise en action des sinus piriformes, et à la portée de la voix. A la lumière de ces constatations, les apports et applications pédagogiques de cette étude sont évoqués, ainsi que les perspectives pour l'avenir de la recherche dans ce thème.

Ce travail pluridisciplinaire contribue à une meilleure connaissance de l'efficacité vocale dans le chant lyrique : celle-ci peut être définie différemment de divers points de vue. Nous pouvons ainsi considérer trois sortes d'énergies, essentielles pour la pédagogie de la performance : énergie de souffle et réponse laryngée à celle-ci ; énergie acoustique ; énergie artistique/émotive, non mesurable par l'instrumentation : expliquer complètement l'efficacité est aussi impossible que de définir totalement la beauté. La définition et la mesure de l'efficacité vocale dans le chant lyrique exposées dans les quatre chapitres de cette thèse prennent simultanément en compte les différents axes d'étude de la phonétique expérimentale (acoustiques, physiologiques et cognitifs) et justifient la grande utilité de cette discipline au-delà de l'étude des sons de la parole. Cette étude pluridisciplinaire montre l'intérêt d'utiliser les connaissances et les méthodes fournies par la phonétique expérimentale pour affiner la pédagogie et la rééducation de la voix chantée.