

# Oreille absolue et mémoire proprioceptive

Nicole SCOTTO DI CARLO  
Directeur de Recherche au CNRS  
UMR 6057 CNRS

## INTRODUCTION

Les artistes lyriques ont une mémoire extrêmement précise de la position qu'occupent leurs organes phonatoires pour chaque note de leur tessiture\*. La plupart de ceux qui possèdent l'oreille absolue — autrement dit, qui sont capables de reconnaître ou de produire spontanément une hauteur sonore sans aucune référence extérieure — utilisent une stratégie qui laisse supposer que c'est leur mémoire proprioceptive\* qui leur sert de diapason interne. Si notre hypothèse s'avère exacte, le seul fait de changer la position de l'un de ces organes devrait nécessairement perturber leur contrôle proprioceptif de la justesse. Afin de le vérifier, nous avons choisi une chanteuse professionnelle dotée de l'oreille absolue qui utilise une technique vocale comportant de légers déplacements laryngés vers le bas pour le grave et vers le haut pour l'aigu, ce qui est caractéristique des voix aiguës vocalisantes. Nous avons réalisé une expérimentation destinée à modifier ses repères proprioceptifs avec la collaboration d'un ostéopathe qui a fait varier la hauteur de son larynx en jouant sur les tensions entre l'os hyoïde et l'occiput.

## EXPERIMENTATION

### 1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Des téléréoradiographies\* de la tête et du cou de profil, en incidence temporale gauche-plaque (Distance : 3 mètres, Temps d'exposition : 0,15 s, Tension : 120 kv, Intensité : 100 mAS) ont été prises avant et après manipulation sur le sujet debout que l'on a laissé se positionner naturellement sans lui imposer de contraintes (céphalostat ou mise en Francfort par le radiologue). La totalité de l'expérimentation a été enregistrée sur un magnétophone professionnel Nagra III équipé d'un microphone omni-directionnel Sennheiser, type ME40, afin de conserver les commentaires de la soprano et de pouvoir entreprendre une étude acoustique de la qualité de sa voix avant et après manipulation. Pour ne pas l'influencer dans l'analyse de ses sensations, on ne lui a pas révélé le but véritable des manipulations qu'elle allait subir.

### 2. DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE

On demande à la chanteuse de parcourir sa tessiture du grave à l'aigu et ensuite d'émettre la voyelle [a] dans le grave sur sib2 (233 Hz\*), puis dans l'aigu sur

sib4 (932 Hz) afin de posséder les clichés et les enregistrements de référence avant toute intervention de l'ostéopathe. Une téléréoradiographie de profil est prise pour chaque note avec enregistrement sonore simultané. L'ostéopathe intervient alors pour commencer à préparer le sujet qu'il fait allonger. D'une main, il maintient l'occiput temporal et de l'autre, l'os hyoïde. La première phase de l'opération consiste à équilibrer les tensions. Pour cela, l'ostéopathe fixe d'abord l'occiput et tire légèrement l'os hyoïde vers l'avant, puis il fixe l'os hyoïde et pousse légèrement l'occiput vers l'arrière. La deuxième phase de l'opération consiste à trouver un point d'équilibre entre ces deux extrêmes, ce qui va provoquer une détente des tissus et permettre une arrivée correcte de sang, de lymphes et de tissus intersticiels. C'est à ce moment-là seulement que l'ostéopathe va pouvoir manipuler. Deux possibilités se présentent à lui : il peut soit changer la tension sur l'os hyoïde par rapport à l'occiput, soit changer la tension de l'occiput par rapport à l'os hyoïde. Afin d'être plus proche de la réalité physiologique, c'est cette deuxième solution qui a été retenue. L'ostéopathe joue donc sur la position de l'occiput, soit pour attirer l'os hyoïde vers le bas et empêcher ainsi le larynx de monter, ce qui correspond à la position laryngée utilisée par cette chanteuse pour émettre le grave, soit pour l'attirer vers le haut et empêcher le larynx de descendre, ce qui correspond à sa position laryngée pour émettre l'aigu (*figure 1*).

L'ostéopathe procède à la première manipulation et fixe le larynx de la chanteuse en position de grave. Pour cela, il antériorise son occiput en faisant glisser le condyle occipital sur la cavité glénoïde de l'atlas, de telle sorte que la face postérieure de l'apophyse odontoïde de l'axis soit en contact avec la partie postérieure du trou occipital. Cette position de l'occiput a pour conséquence d'antérioriser l'apophyse styloïde du temporal, ce qui va relâcher la tension du stylo-hyoïdien et entraîner une descente de l'os hyoïde et du larynx. On dispose d'une dizaine de minutes pour travailler. Passé ce délai, les organes reprennent leur position initiale. On demande à la soprano d'émettre la voyelle [a] dans l'aigu, sur sib4 pendant qu'une téléréoradiographie de profil est prise avec enregistrement sonore simultané. On lui demande ensuite de parcourir sa tessiture du grave à l'aigu et de donner ses impressions.

Le même processus est utilisé pour la seconde manipulation au cours de laquelle le larynx du sujet va être fixé en position d'aigu. La manipulation consiste cette fois à postérioriser l'occiput par rapport à l'atlas, de manière à provoquer une bascule supéro-postérieure de l'apophyse styloïde et à augmenter ainsi la tension du stylo-hyoïdien, ce qui aura pour conséquence de faire pivoter l'os hyoïde vers le haut et l'arrière et de

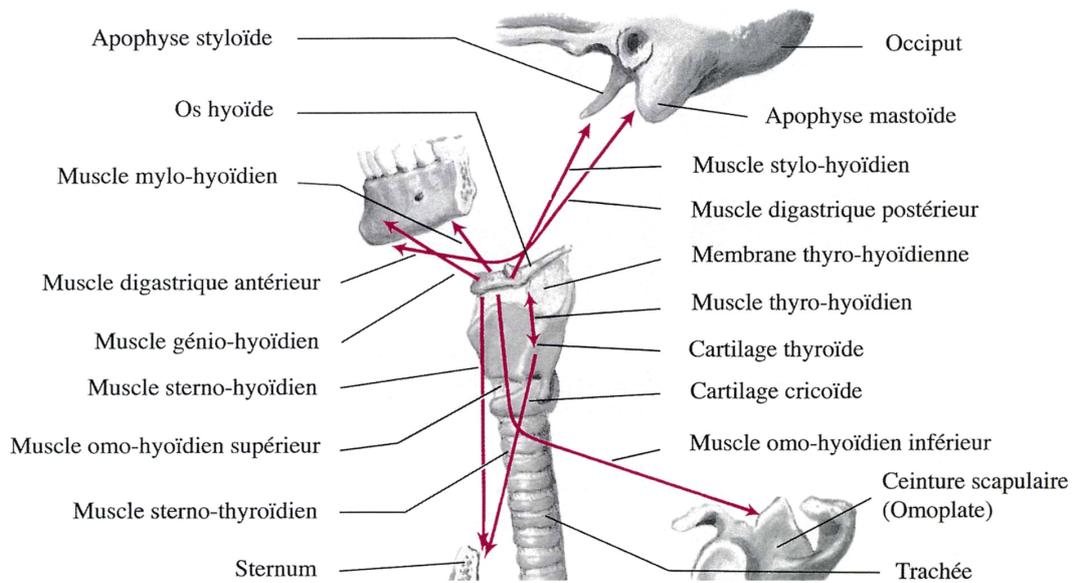


Figure 1. Relations entre l'os hyoïde, le larynx et les structures osseuses environnantes (d'après F.H. Netter). L'os hyoïde est le seul os isolé du squelette. Il est relié à la base du crâne et à la mandibule par les muscles sus-hyoïdiens et au sternum ainsi qu'à la ceinture scapulaire par les muscles sous-hyoïdiens, ce qui lui assure une grande mobilité dont bénéficie le larynx puisque ce dernier est rattaché à lui par la membrane thyro-hyoïdienne. On comprend donc qu'en jouant sur l'orientation de l'occiput, l'ostéopathe puisse agir sur la position de l'os hyoïde et par son intermédiaire, sur celle du larynx.

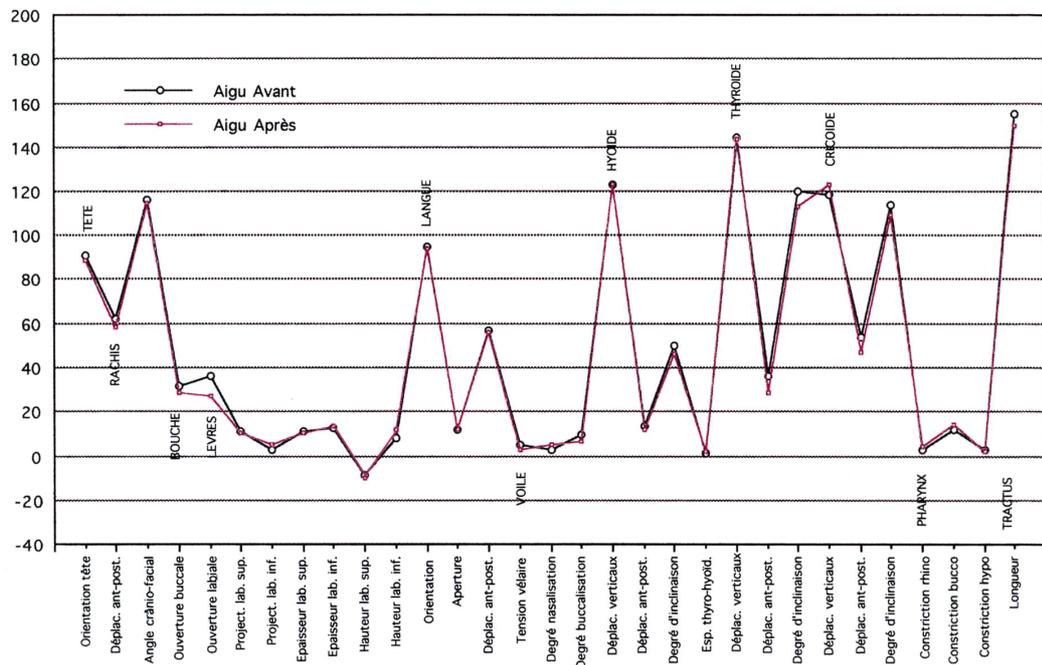


Figure 2. Résultats de l'analyse céphalométrique pour l'aigu.

Le graphique obtenu à partir des résultats de l'analyse céphalométrique met en évidence les modifications qui sont intervenues à la suite de la manipulation au niveau des différents organes phonatoires. Il est important de souligner que la technique vocale utilisée par les chanteurs d'opéra est le résultat d'un conditionnement tellement puissant et précis que pour chaque note de leur tessiture, leurs organes occupent toujours les mêmes positions. Avant d'entreprendre ce travail, une expérience préliminaire a été conduite par l'auteur sur six chanteurs professionnels volontaires dont faisait partie la soprano retenue pour cette étude. L'expérience consistait à prendre, à un ou deux mois d'intervalle en fonction de leur disponibilité, des clichés radiologiques de ces chanteurs pendant qu'ils

soulever le bloc laryngé. On demande cette fois à la soprano d'émettre la voyelle [a] dans le grave sur sib2.

## RESULTATS DE L'ANALYSE PHYSIOLOGIQUE ET ACOUSTIQUE

### 1. METHODE UTILISEE

Les quatre téléxéroradiographies de la voyelle [a] avant et après manipulation dans le grave sur sib2 et dans l'aigu sur sib4 ont été analysées selon une méthode inspirée de la céphalométrie\* (Muller, 1973) et adaptée à l'étude radiologique de la phonation (Scotto Di Carlo, 1977). Pour cette étude, 31 paramètres ont été mesurés : la position de la tête, les déplacements antéro-postérieurs du rachis, l'angle crânio-cervical, l'ouverture buccale, l'ouverture labiale, la projection ou la rétraction labiale (supérieure et inférieure), l'épaisseur labiale (supérieure et inférieure), la hauteur labiale (supérieure et inférieure), l'orientation de la masse linguale, le degré d'aperture, la zone d'articulation, le degré de tension vélaire, le degré de nasalisation (au niveau pharyngo-uvulaire) et de buccalisation (au niveau dorso-uvulaire), les déplacements verticaux et antéro-postérieurs de l'os hyoïde, son degré d'inclinaison, l'espace thyro-hyoïdien, les déplacements verticaux et antéro-postérieurs du cartilage thyroïde, son degré d'inclinaison, les déplacements verticaux et antéro-postérieurs du cartilage cricoïde, son degré d'inclinaison, les dimensions de la cavité pharyngale aux points de constriction maximale (au niveau du rhino-pharynx, du bucco-pharynx et de l'hypo-pharynx) et enfin, la longueur du tractus vocal.

### 2. PREMIERE MANIPULATION

#### Anamnèse

Après la première manipulation visant à fixer son larynx en position de grave, la chanteuse a déclaré se sentir « attirée vers le bas » et avoir des difficultés à émettre les aigus. L'analyse acoustique révèle en effet des aigus de qualité médiocre.

#### Analyse céphalométrique

La comparaison entre les radiogrammes de la voyelle [a] émise dans l'aigu sur sib4 avant et après manipulation, met en évidence après manipulation (figure 2) :

*émettaient la même note sur la même voyelle dans le grave, puis à l'octave dans le médium et enfin à l'octave dans l'aigu. Pour chacun d'entre eux, la comparaison des clichés par registre à un ou deux mois d'intervalle ne laissait apparaître aucune différence entre les productions ; quant aux calques radiologiques, ils étaient parfaitement superposables. Cette précision dans les positions phonatoires peut paraître surprenante, mais ainsi que le montre ce graphique et celui de la figure 5, bien que les modifications provoquées par la manipulation soient de l'ordre du millimètre ou du degré pour les mesures angulaires, elles entraînent des différences de timbre et de qualité parfaitement audibles. Il est donc normal que les chanteurs dont l'une des priorités est l'homogénéité vocale, soient astreints à une grande précision dans les positions et les mouvements de leurs organes phonatoires.*

## — Lexique —

**Amplitude du vibrato (Av) :** Intervalle musical compris entre les valeurs extrêmes du son vibré\*, c.-à-d. entre sa fréquence maximale\* et sa fréquence minimale\*. (Cf. *Vibrato*.)

**Céphalométrie :** Méthode établissant avec une grande rigueur et une extrême précision les techniques de mesures effectuées en orthopédie dento-faciale sur des téléradiographies de face ou de profil dans le but d'analyser les modifications des structures osseuses crânio-faciales chez des patients en cours de croissance ou de traitement.

**Centiesecnde (Cs) :** Centième de seconde. Unité de temps utilisée pour l'étude de la voix chantée. Pour la voix parlée où les phénomènes temporels sont très rapides, l'unité de temps est la milliseconde (ms) ou millième de seconde.

**Comma :** Le comma est le plus petit intervalle musical discernable et praticable. (Le comma utilisé par les musiciens est le comma de Holder qui correspond au 1/9 de ton, le demi-ton chromatique étant de 5 commas et le demi-ton diatonique de 4 commas).

« **En tête** » (**son -**) : Expression utilisée par les chanteurs et les professeurs de chant pour désigner un son qui « résonne » dans la tête. (Cf. *Place du son*.)

**Fréquence :** Dans un phénomène périodique, nombre d'oscillations ou de vibrations par unité de temps.

**Fréquence maximale (FM) et minimale (Fm) d'un son vibré :** Limite supérieure et inférieure du son vibré.

**H :** Abréviation d'harmonique. Suivi d'un chiffre, il indique le rang d'un harmonique. Par exemple H4 = le quatrième harmonique.

**Harmonique :** Chacun des éléments qui composent un son. Un son pur (par exemple le « la » donné par un diapason) n'est composé que d'un fondamental responsable de sa hauteur, alors qu'un son complexe est composé à la fois d'un fondamental qui est responsable de sa hauteur et de plusieurs harmoniques qui sont responsables de son timbre. Ainsi, par exemple, le « la » donné par un violon, un hautbois ou un cor a toujours la même fréquence, c.-à-d. la même hauteur, mais ce qui les différencie chacun de ces « la », ce sont leurs harmoniques qui, distribués différemment vont conférer à chaque instrument un timbre caractéristique permettant à l'auditeur de les distinguer les uns des autres.

## — Lexique —

**Hertz (Hz)** : Unité de mesure de la fréquence\* ou hauteur d'un son.

**Mémoire kinesthésique** : Mémoire des contractions musculaires, des mouvements exécutés et de la place qu'occupent les membres à chaque instant.

**Mémoire pallessthésique** : Mémoire des sensations éveillées par une vibration.

**Mémoire proprioceptive** : Terme générique regroupant les différents types de mémoires utilisés au cours de l'apprentissage d'une activité physique.

**Note-cible** : Note que le chanteur se propose d'atteindre lorsqu'il émet un son.

**Odologie** : (du grec *ôdê* = chant et *logos* = science). Etude scientifique de la voix chantée, du point de vue physiologique, acoustique et perceptif. Terme créé par Nicole Scotto Di Carlo pour désigner la nouvelle spécialité scientifique qu'elle a créée en 1970. Après avoir été homologué par le Conseil International de la Langue Française, ce mot a commencé à faire son entrée dans les dictionnaires en 2002.

**Périodicité du vibrato (Pv)** : Nombre de modulations de fréquence par unité de temps. (Cf. *Vibrato*.)

**Phases d'un son vibré** : Comme tout phénomène temporel, un son quel qu'il soit, comporte un début (l'attaque), un milieu (la tenue) et une fin (l'extinction).

La tenue d'un son vibré se subdivise en quatre parties :

- un *temps d'ajustement* qui correspond au délai du feed-back auditif et au cours duquel le chanteur rectifie la justesse de son attaque,
- un *temps de latence* qui lui permet de s'assurer de la bonne hauteur du son avant de commencer à le faire vibrer,
- un *temps de stabilisation* au cours duquel s'installe le son vibré qui est très souvent instable dans ses premières périodes,
- et enfin un *temps de stabilité* qui correspond à la phase où le vibrato est parfaitement stabilisé et régulier.

**Place du son** : La *place de la voix* ou la *place d'un son* correspond à l'emplacement des sensibilités internes\* d'origine pallessthésique (éveillées par une vibration) que les chanteurs ressentent dans la région crânio-faciale pour l'aigu, leur donnant ainsi l'impression que leur voix leur « résonne » dans la tête (d'où les expressions *voix de tête*, *résonance\* de tête*) ou dans la région thoracique pour le grave, ce qui leur donne l'illusion que leur voix leur « résonne » dans la poitrine (d'où les expressions *voix de poitrine*, *résonance de poitrine*).

- des positions phonatoires spécifiques à l'émission du grave :

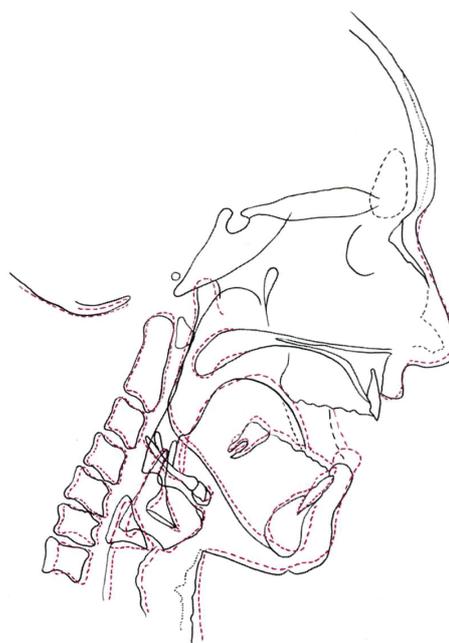
- \* antériorisation du rachis cervical ( $\Delta = + 3,6$  mm) ;
- \* diminution de la tension vélaire ( $\Delta = + 1,8$  mm) ;
- \* antériorisation de la masse linguale ( $\Delta = - 3$  mm) ;
- \* descente ( $\Delta = - 1$  mm) et antériorisation du bloc laryngé ( $\Delta = 7,7$  mm) ;
- \* inclinaison hyoïdienne moins prononcée ( $\Delta = - 4^\circ$ ) ;
- \* bascule crico-thyroïdienne moins prononcée ( $\Delta = - 7^\circ$ ) ;

- des positions phonatoires spécifiques à l'émission de l'aigu :

- \* espace thyro-hyoïdien quasi-identique ;

- des positions phonatoires de compensation :

- \* ouverture labiale moindre ( $\Delta = - 9$  mm) ;
- \* ouverture buccale moindre ( $\Delta = - 2,9$  mm) ;
- \* légère inclinaison de la tête ( $\Delta = - 2^\circ$ ).



**Figure 3.** Superposition des calques radiologiques de l'aigu émis avant et après manipulation.

L'une des techniques la plus couramment utilisées en céphalométrie est la superposition des calques radiologiques. Elle se pratique selon une procédure extrêmement rigoureuse afin d'obtenir des superpositions d'images qui rendent compte avec une grande précision des modifications entre deux clichés dont les différences sont peu perceptibles à l'œil nu. Si l'on compare au *sib4* de référence (en traits pleins) le son émis après manipulation (en pointillés), on observe un certain nombre de modifications des structures anatomiques dont le but est de compenser l'abaissement laryngé et l'antériorisation de l'occiput et du rachis cervical, qui gênent considérablement l'émission de l'aigu. Un ajustement acoustique est également nécessaire pour compenser l'allongement du tractus vocal consécutif à l'abaissement du larynx.

### Interprétation physiologique

La descente du bloc laryngé résultant de la manipulation a pour effet d'augmenter le volume du tractus vocal\*, ce qui va nécessiter un ajustement acoustique pour l'émission de l'aigu (Scotti Di Carlo, 1991). Cet ajustement est réalisé par une réduction de l'ouverture mandibulaire afin de diminuer le volume du résonateur buccal et de compenser l'éirement labial supérieur lié au soulèvement important des pommettes, mimique caractéristique de l'aigu chez cette soprano.

La mesure de l'inclinaison céphalique par référence au Plan de Francfort\* est de 2° après manipulation. La chanteuse a essayé de neutraliser l'antériorisation occipitale imposée par la manipulation en baissant la tête de manière à soulever et reculer son occiput et son apophyse styloïde afin d'entraîner l'os hyoïde vers le haut et l'arrière et de faciliter ainsi la bascule crico-thyroïdienne, indispensable à l'émission de l'aigu (Scotti Di Carlo, 2002). Sans cette manoeuvre de compensation qui lui a permis de « monter la place du son\* », la soprano a déclaré qu'elle aurait été incapable d'émettre cette note aiguë (figure 3).

### Analyse sonographique et interprétation acoustique

La partie acoustique de cette étude a été réalisée à partir du corpus enregistré pendant la prise des radiographies et porte sur les quatre sonagrammes de la voyelle [a] chantée par la soprano dans le grave et l'aigu avant et après manipulation. Pour chaque son, on a calculé la justesse de l'attaque, la justesse de la tenue, les écarts de justesse entre l'attaque et la cible (c.-à-d. la hauteur théorique de la note de référence), entre la tenue et la cible, entre l'attaque et la tenue, entre l'attaque avant et après manipulation et enfin entre la tenue avant et après manipulation. On a également analysé le timbre (composition spectrale) et le vibrato\* (amplitude\*, périodicité\*, quotient de régularité, durée du temps de latence\* et du temps de stabilisation\*).

La comparaison des sonagrammes\* de la voyelle [a] émise dans l'aigu sur sib4 avant et après manipulation met en évidence après manipulation une attaque du sib4 plus basse de 14,87 Svt\* (≈ 1/4 de ton). Quant à la hauteur moyenne du son calculée sur la durée totale de la tenue, elle est basse de 10,56 Svt (≈ 2 commas\*). Ceci est dû à la descente du bloc laryngé ainsi qu'à une bascule crico-thyroïdienne moins prononcée. Cette position laryngée a également une incidence sur le timbre qui est plus sombre car moins riche en harmoniques\* aigus (atténuation des harmoniques à partir de H4\*) et sur la place du son, qui de ce fait est moins céphalisé, moins « en tête\* » que le son de référence (figure 4).

Le vibrato est peu affecté par la manipulation. La périodicité passe de 6,72 à 6,30 Pv/s et l'amplitude de 47,75 à 38 Svt. Le quotient de régularité moyen est quasi-identique avant manipulation (22,22 %) et après (23,30 %). Dans les deux cas, le vibrato est irrégulier.

Le temps de latence et le temps de stabilisation augmentent de façon significative par rapport au son de référence puisqu'ils doublent pratiquement leurs durées. En effet, le temps de latence passe de 22,50 cs\* à 32,10 cs et le temps de stabilisation de 63 cs à 135 cs, ce qui indique qu'à la suite de la manipulation, la soprano a eu des difficultés à trouver la hauteur exacte du son.

En résumé, le sib4 après manipulation est bas de deux commas par rapport à celui réalisé avant manipulation. Il est en outre moins « haut de place », moins « en tête » et possède un timbre légèrement plus sombre que le son de référence.

## Lexique

**Plan de Francfort** : Plan utilisé en céphalométrie\*. Il est déterminé par le *Point Sous-Orbitaire\** et les deux *Porions\**.

« On admet que ce plan est horizontal lorsque le sujet, se tenant droit, regarde devant lui à la hauteur de ses yeux » (Muller).

**Point Sous-Orbitaire** (ou *Point Orbital*) : Point céphalométrique bilatéral plus déclive du rebord inférieur de l'orbite.

**Porion** : Point céphalométrique bilatéral situé à l'extrémité supérieure du méat auditif externe.

**Radiogrammes** : Calques réalisés d'après les clichés radiologiques à partir desquels on trace les constructions et on effectue les mesures. En orthodontie, ils sont appelés *calques* ou *tracés céphalométriques*, le *céphalogramme* désignant la téléradiographie du crâne réalisée selon les standards rigoureux qui régissent les installations céphalométriques.

**Résonance** : En physique, augmentation de l'amplitude d'une oscillation sous l'influence d'impulsions périodiques de fréquence voisine. Les chanteurs et les professeurs de chant appellent « résonance » les sensibilités internes phonatoires\*.

**Savart (Svt)** : Unité d'intervalle musical utilisée par les acousticiens français, le Savart est le plus petit intervalle musical perceptible dans des conditions optimales. (1 comma = 5 Svt). Pour mesurer les intervalles musicaux, les Anglo-Saxons utilisent le *Cent* qui correspond au centième de demi-ton tempéré.

**Sensibilités internes phonatoires** : Sensibilités proprioceptives\* essentiellement d'ordre kinesthésique (musculaires) et palloesthésiques (vibratoires) ressenties au cours du chant.

**Sensibilité proprioceptive** : Terme générique regroupant les sensations d'origine musculaire, osseuse, tendineuse ou articulaire.

**Seuil différentiel de hauteur** : La sensibilité à la hauteur sonore est caractérisée par le seuil différentiel de hauteur, c'est-à-dire la différence minimale de hauteur entre deux sons susceptible d'être perçue. Ce seuil est de l'ordre de 1,25 Savart d'après Knudsen ; il varie de 0,3 à 3 Svt d'après Seashore ; il est situé entre 1,5 et 4,25 Svt selon Straub.

# — Lexique —

## Sonagramme

Document obtenu à l'aide du sonographe\* sur lequel la fréquence est représentée en ordonnée et la durée en abscisse. En ce qui concerne l'intensité, c'est le degré de noircissement du papier qui en donne une indication.

**Sonographe** : Appareil qui fournit l'analyse spectrale en trois dimensions de tous les phénomènes sonores.

**Son blanc** : Son émis sans vibrato\* que les chanteurs appellent aussi parfois *son droit*. Dans le chant classique, il est utilisé à des fins expressives.

**Son poitriné** : Un son est dit poitriné lorsqu'il est émis avec un larynx en position basse qui entraîne des « résonances » dans la région thoracique.

**Son vibré** : Son émis avec un vibrato\* par opposition à *son blanc*.\* (Cf. *Phases d'un son vibré.*)

**Téléxéroradiographie** : La xéroradiographie est une technique radiologique permettant d'obtenir des clichés sur papier selon un procédé mis au point par la société Rank Xérox. Les téléxéroradiographies sont des xéroradiographies prises de loin (entre 3 et 5 mètres) pour éviter les déformations de l'image.

**Temps de latence** : (Cf. *Phases d'un son vibré.*)

**Temps de stabilisation** : (Cf. *Phases d'un son vibré.*)

**Tessiture** : Ensemble des notes que peut émettre un sujet avec le maximum de facilité. L'étendue vocale étant l'ensemble des notes que peut émettre un sujet de l'infra-grave au suraigu.

**Tractus vocal** : Partie supérieure de l'appareil phonatoire située entre les cordes vocales et les lèvres.

**Vibrato** : Le vibrato de la voix chantée est caractérisé par des variations périodiques de fréquence et d'intensité qui peuvent être synchrones ou en opposition de phase. Il résulte d'un parfait équilibre entre les différentes coordinations musculaires nécessaires à l'exécution du geste vocal, ce qui explique qu'on ne le trouve que dans les voix travaillées et que toute manœuvre vocale défectueuse ait un retentissement sur sa qualité. Il se détériore en cas de mauvaise utilisation de l'appareil vocal ou avec l'âge. Les paramètres principalement atteints sont l'amplitude\* et la périodicité\*.

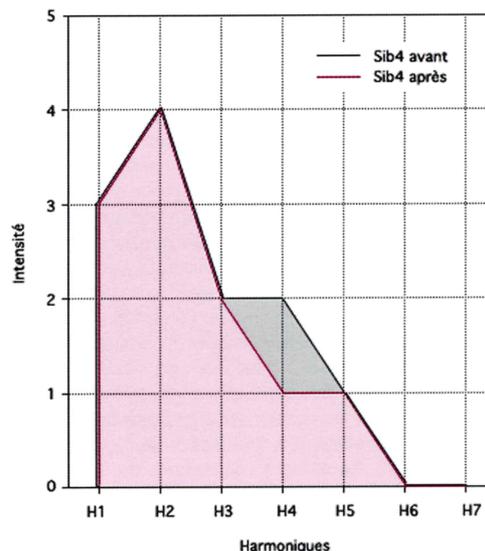


Figure 4. Spectre harmonique du sib4 avant et après manipulation.

Le spectre du sib4 avant manipulation (en gris) est entièrement recouvert par celui du sib4 émis après manipulation (en rose), parce que leur composition harmonique est strictement identique, à l'exception du 4<sup>e</sup> harmonique dont la disparition après manipulation confère au son un timbre plus sombre et plus « poitriné ».

## 3. SECONDE MANIPULATION

### Anamnèse

Après la seconde manipulation destinée à fixer son larynx en position d'aigu, la chanteuse estime avoir été facilitée dans l'émission des aigus sans toutefois avoir été gênée pour émettre les graves. L'analyse acoustique confirme d'ailleurs une excellente qualité vocale du grave à l'aigu.

### Analyse céphalométrique

La comparaison entre les radiogrammes de la voyelle [a] émise dans le grave sur sib2 avant et après manipulation met en évidence :

- des positions phonatoires spécifiques à l'émission de l'aigu :

- \* légère postériorisation du rachis cervical ( $\Delta = - 0,1 \text{ mm}$ ) ;
- \* postériorisation ( $\Delta = - 0,7 \text{ mm}$ ), montée ( $\Delta = + 1,6 \text{ mm}$ ) et verticalisation de l'os hyoïde ( $\Delta = + 4^\circ$ ) ;
- \* montée du bloc laryngé ( $\Delta = + 3 \text{ mm}$ ) ;
- \* diminution de l'espace thyro-hyoïdien ( $\Delta = - 0,2 \text{ mm}$ ) ;
- \* bascule crico-thyroïdienne plus prononcée ( $\Delta = + 3^\circ$ ) ;
- \* espace pharyngo-uvulaire plus important ( $\Delta = + 2 \text{ mm}$ ) ;
- \* labialisation légèrement moins importante ( $\Delta = - 1 \text{ mm}$ ) ;
- \* raccourcissement du tractus vocal ( $\Delta = - 5 \text{ mm}$ ) ;

- des positions phonatoires spécifiques du grave :

- \* position linguale quasi-identique ;
- \* position vélaire quasi-identique ;

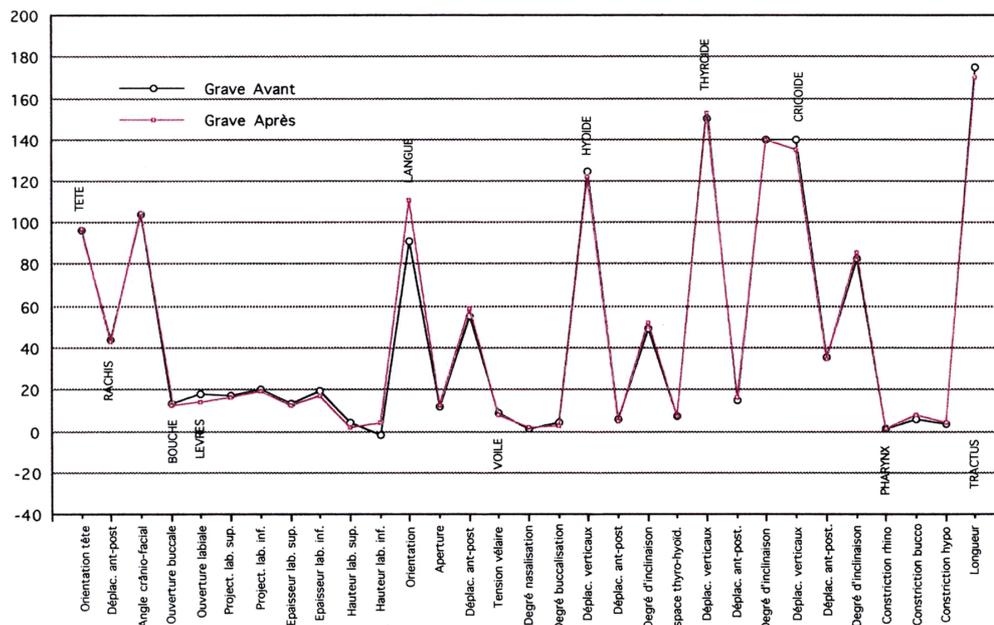


Figure 5. Résultats de l'analyse céphalométrique pour le grave.

Dans le grave, l'émission ne nécessite pas une mobilisation des organes aussi importante que celle qui doit être mise en place pour l'aigu, ce qui a laissé à la soprano une plus grande liberté pour conserver dans le registre grave des positions phonatoires spécifiques à l'aigu.

- des positions phonatoires de compensation :

- \* ouverture mandibulaire moins importante ( $\Delta = -1,4$  mm),
- \* ouverture labiale réduite ( $\Delta = -3,8$  mm), (figure 5).

#### Interprétation physiologique

L'émission du grave ne nécessitant pas une mobilisation des organes phonatoires aussi importante que celle exigée pour l'aigu, la soprano n'a pas eu de difficultés majeures pour chanter dans le registre grave avec un larynx positionné pour l'aigu, ce qui explique que ses positions phonatoires de compensation se limitent à une tentative de correction du timbre par réduction de l'ouverture buccale et de l'ouverture labiale. En effet, le raccourcissement du volume du tractus vocal résultant de la seconde manipulation va nécessiter un ajustement acoustique dans le but d'assombrir le timbre dans le registre grave. Pour y parvenir, il faudrait allonger le tractus vocal par une projection labiale importante et en diminuer le volume par une ouverture buccale réduite. Or, si l'ouverture buccale est moindre que pour le son de référence, elle n'est pas suffisamment réduite pour répondre aux impératifs acoustiques. Quant à la projection labiale, elle est sensiblement identique à celle utilisée avant la manipulation et correspond vraisemblablement à une limite physiologique que la chanteuse ne peut dépasser. La soprano tente donc de compenser sa labialisation insuffisante et son ouverture buccale inadaptée en réduisant son ouverture labiale (figure 6).

#### Analyse sonographique et interprétation acoustique

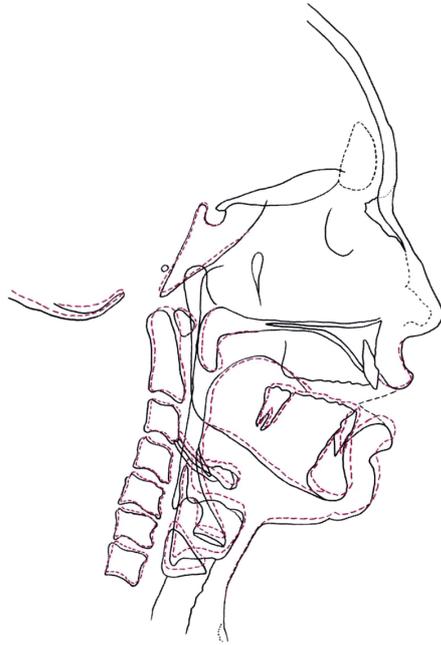
Après manipulation, l'attaque du sib2 est plus haute de 57,04 Svt\* (plus d'un ton). La tenue est

supérieure de 25,98 Svt (1/2 ton) à celle du son témoin. Ceci s'explique par la montée du bloc laryngé et une bascule crico-thyroïdienne plus prononcée. Cette position laryngée a par ailleurs une incidence sur le timbre qui est plus clair car plus riche en harmoniques aigus (renforcement de H7, H8, H10, H13, H15, H16) et sur la place du son qui est moins « poitriné\* » que le son de référence (Scotto Di Carlo, 1994) (figure 7).

En ce qui concerne le vibrato, si son amplitude diminue légèrement ( $-3$  Svt) après manipulation, sa périodicité reste quasi identique (5,84 au lieu de 5,82 Pv/s). En revanche, il perd de sa régularité. En effet, le quotient de régularité moyen passe de 12,5 % pour le son témoin (vibrato régulier) à 29 % pour le son après manipulation (vibrato irrégulier).

Curieusement, le temps de latence qui est de 37,20 cs avant manipulation chute à 19,95 cs après manipulation. Le temps mis par le vibrato pour s'installer est ici deux fois plus court après manipulation alors que la soprano, déstabilisée, devrait mettre plus de temps à trouver la bonne hauteur avant de commencer à faire vibrer le son. C'est sans doute en raison de l'abrègement anormal du temps de latence qu'il lui faudra quatre fois plus de temps pour stabiliser son vibrato. En effet, le temps de stabilisation qui est de 37,20 cs pour le son témoin passe à 172,50 cs pour le son après manipulation.

En résumé, le sib2 après manipulation est haut d'un demi-ton par rapport à celui réalisé avant manipulation. Il est également moins « poitriné » et possède de ce fait un timbre beaucoup plus clair qu'un grave émis par cette soprano dans des conditions normales.



*Figure 6. Superposition des calques radiologiques du grave émis avant et après manipulation.*

*Par rapport au sib2 de référence (en traits pleins), les modifications après manipulation (en pointillés) se réduisent à l'assombrissement du timbre par réduction de l'ouverture bucco-labiale. Ceci a pour but de compenser l'élévation du bloc laryngé qui, en raccourcissant le tractus vocal entraînerait, sans cette manoeuvre physiologique compensatoire, un éclaircissement du timbre peu compatible avec le registre grave.*

## RESULTATS DE L'ETUDE PERCEPTIVE

### 1. SELECTION DES SUJETS

Une étude perceptive du sib2 et du sib4 avant et après manipulation a été réalisée sur 10 musiciens (Jury d'écoute I) qui n'ont jugé que la justesse et sur 5 professeurs de chant et 5 chanteurs professionnels (Jury II) qui ont jugé la justesse et la place de la voix. Nous avons également demandé à la chanteuse qui avait subi les manipulations huit mois auparavant (Jury III) de juger sa propre production sans toutefois lui préciser de quelle expérimentation il s'agissait. Tous les sujets sélectionnés (Jurys I, II et III) ont subi au préalable un test auditif destiné à mesurer leur seuil différentiel de hauteur\*. Alors que pour les sons purs ce seuil avoisine 1,3 Svt (0,26 comma) chez les non-musiciens, chez les musiciens testés il est de l'ordre de 0,12 Svt (0,0028 comma), leur seuil différentiel de hauteur étant de 0,7 Svt (0,14 comma) pour les sons blancs\* et de 4,6 Svt (0,92 comma) pour les sons vibrés dont l'amplitude est inférieure ou égale à 25 Svt (1/2 ton) (Scotto di Carlo, 1981-1982).

### 2. PASSATION DU TEST

Les consignes étaient de comparer le deuxième son au premier son de chaque paire [grave avant manipulation / grave après manipulation], puis [aigu

avant manipulation / aigu après manipulation]. Les stimuli, montés sur boucles comportaient dix répétitions dans un ordre aléatoire. Les vingt sujets testés ont répondu unanimement en ce qui concerne la justesse. Les dix sujets du Jury II et le sujet du Jury III ont répondu unanimement en ce qui concerne la place de la voix avec cependant quelques nuances de vocabulaire. Tous les sujets ont subi en outre une épreuve d'ajustage fréquentiel consistant à égaliser, à l'aide d'un générateur de fréquences\*, les différentes notes montées sur boucles, ce qui leur a permis de quantifier avec plus de précision les écarts de justesse qu'ils avaient relevés au cours de la première partie du test.

### 3. TEST COMPLEMENTAIRE

La soprano qui avait servi de sujet à cette expérimentation a été soumise en outre à un test complémentaire consistant à évaluer sa propre production à l'oreille (en nommant la note entendue). Le montage, effectué dans un ordre aléatoire, comportait les notes à juger auxquelles ont été ajoutées dix notes extraites des enregistrements de référence effectués avant d'entreprendre les manipulations. Le test ne comportait pas de répétitions et a fait l'objet d'une seule passation. La soprano a jugé « horriblement fausses » les notes qu'elle avait émises après manipulation.

### 4. EVALUATION DE LA JUSTESSE D'UN SON VIBRE

Tous les sujets testés — y compris la soprano — ont estimé que le sib2 était haut d'un quart de ton et le sib4 bas d'un comma. Or, les résultats de l'analyse acoustique réalisée sur ces deux notes montrent qu'après manipulation, le sib2 est haut d'un demi-ton et le sib4 est bas de deux commas. Les sujets ont donc perçu correctement les erreurs de justesse mais les ont sous-estimées. Ce manque de précision dans l'appréciation d'une hauteur qui pourrait paraître surprenant chez des musiciens professionnels dotés d'une excellente oreille musicale est dû au fait que les stimuli qui leur ont été soumis sont des sons vibrés. En effet, le vibrato vocal est constitué par des variations périodiques de fréquence autour de la note-cible\*. Ces variations qui se situent entre un quart de ton et trois quarts de ton pour les voix normales et qui peuvent atteindre et même dépasser un ton pour les voix pathologiques constituent l'amplitude du vibrato. Or, plus l'amplitude est importante, plus l'oreille a des difficultés pour opérer un choix (Scotto Di Carlo, 1993). C'est pour cette raison que, lors des tests destinés à déterminer leur seuil différentiel de hauteur, le score des musiciens est tombé de 0,12 Svt pour les sons purs à 4,6 Svt pour les sons vibrés d'amplitude égale à 25 Svt (1/2 ton). Or, les stimuli chantés avant et après manipulation qui ont été présentés aux musiciens avaient tous une amplitude supérieure au demi-ton puisqu'elle était comprise entre 38 et 45,75 Svt, ce qui explique leur manque de précision dans l'appréciation de la justesse.

## CONCLUSION

Cette étude a permis de démontrer d'une part que la technique vocale résulte d'un puissant conditionnement de réflexes puisque la hauteur du bloc laryngé entraîne automatiquement les positions phonatoires correspondantes. Ainsi, par exemple, lorsque le larynx est positionné pour le grave, on voit apparaître les

positions phonatoires spécifiques au grave même pendant l'émission d'une note aiguë et inversement. Elle démontre en outre, la prédominance de la mémoire proprioceptive dans la reconnaissance des hauteurs sonores chez le sujet étudié, ce qui laisse supposer l'existence de différents types d'oreilles absolues. La chanteuse qui a fait l'objet de cette expérimentation est dotée d'une forme d'oreille absolue faisant appel non pas à la mémoire auditive comme c'est le cas pour la plupart des instrumentistes, mais à la mémoire kinesthésique (mémoire des contractions musculaires), généralement très développée chez les chanteurs d'opéra, et par voie de conséquence à la mémoire pallesthésique (mémoire des sensations vibratoires) puisque les différences de hauteurs laryngées induisent des sensations pallesthésiques différentes. C'est sa mémoire kinési-pallesi que permet donc à cette chanteuse, en positionnant mentalement ses organes phonatoires, de retrouver la hauteur exacte de

la note qu'elle doit reconnaître ou chanter et si, pour une raison quelconque, on perturbe leur position, elle s'avère incapable d'évaluer correctement cette hauteur ou de contrôler la justesse des sons qu'elle émet.

N. S. D. C.

#### Remerciements.

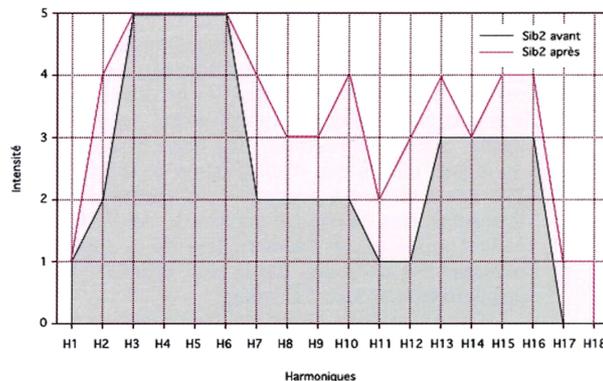
Je tiens à remercier très sincèrement la cantatrice Mady Mesplé qui, en 1985, a bien voulu se prêter à cette expérience, Bruno Fadié, ostéopathe, sans la collaboration duquel cette étude n'aurait pu être entreprise, ainsi que le Docteur Patrick Sarraz, radiologue et Patrice Napolitano, manipulateur en radiologie dans le Service de Radiologie Adulte de l'Hôpital de la Timone à Marseille pour leur aide précieuse. Dix-huit années de recherche en odologie\* ont été nécessaires pour me fournir les éléments indispensables à la réalisation de cette étude.

#### In memoriam.

A la mémoire de mon cousin Félix FABRE (12/7/1913-28/8/2001) qui, en ouvrant mes yeux d'enfant sur les merveilles du monde et les mystères de la vie, a éveillé en moi la curiosité d'esprit, ce besoin impérieux d'apprendre, de comprendre et d'expliquer qui est à l'origine de ma vocation de chercheur.

Figure 7. Spectre harmonique du sib2 avant et après manipulation.

Le son émis après manipulation (en rose) est plus riche en harmoniques que le son de référence (en gris) puisqu'il possède 18 harmoniques au lieu de 16. En ce qui concerne l'intensité de chaque harmonique (mesurée de 0 à 5 sur l'axe vertical), exception faite de H3, H4, H5, H6 pour lesquels l'intensité est identique avant et après manipulation, tous les autres harmoniques ont une intensité plus importante après manipulation, ce qui va donner au son un timbre plus clair, moins « poitriné ».



## — En résumé —

Une expérimentation destinée à modifier les repères proprioceptifs d'une chanteuse professionnelle dotée de l'oreille absolue a été conduite avec la collaboration d'un ostéopathe qui a fait varier sa hauteur laryngée en jouant sur les tensions entre l'os hyoïde et l'occiput. L'analyse céphalométrique des clichés radiologiques pris avant et après les manipulations permet de constater que celles-ci ont bien eu une incidence sur la position des organes phonatoires. D'autre part, les résultats de l'analyse acoustique et des tests perceptifs portant sur les sons émis avant et après manipulation mettent en évidence de façon irréfutable l'influence des manipulations laryngées sur la justesse de l'émission. Cette étude démontre la prédominance de la mémoire kinési-pallesi dans la reconnaissance des hauteurs sonores chez le sujet étudié, ce qui laisse supposer l'existence de différents types d'oreilles absolues.

#### Absolute pitch and proprioceptive memory

This experiment was aimed at modifying the proprioceptive references of a professional soprano endowed with absolute pitch. To do so, an osteopathic doctor changed the height of her larynx by altering the tension between the hyoid bone and the occipital bone. A cephalometric analysis of X-rays taken before and after the manipulations indicated that the position of the phonatory organs had indeed been affected. The results of an acoustic analysis, and perception tests on the tones produced before and after manipulation provided irrefutable evidence of the influence of the laryngeal manipulations on the tonal accuracy of the emission. This study demonstrates the critical role that this soprano's kinesthetic-pallesi memory plays in pitch recognition, and suggests the existence of different types of absolute pitch.

## — Bibliographie —

MULLER (L.), *Céphalométrie et Orthodontie*, S.P.M.D., Paris, 1973.  
 NETTER (F. H.), *Atlas d'anatomie humaine*, Maloine, Paris, 1997.  
 SCOTTO DI CARLO (N.), *Applying Cephalometric Methods to the X-ray Study of Phonation*, Admission Thesis to the Cephalometric Society of America, Philadelphia, 1977, 159 pages.  
 SCOTTO DI CARLO (N.), "Les troubles de la sensibilité à la hauteur et leur rééducation", *Travaux de l'Institut de Phonétique d'Aix*, 1981-1982, 8, p. 227-239.  
 SCOTTO DI CARLO (N.), «La voix chantée», *La Recherche*, 1991,

22, 235, p. 1016-1025.  
 SCOTTO DI CARLO (N.), "Les amusies de perception et leur rééducation", *Médecine des Arts*, 1993, 6, p. 16-19.  
 SCOTTO DI CARLO (N.), "Internal Voice Sensitivities in Opera Singers", *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 1994, 46, 2, p. 79-85.  
 SCOTTO DI CARLO (N.), "X-ray study of a professional soprano's postural strategy for increasing laryngeal mobility", *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 2002, 54, 4, p. 65-170.