

CHAPITRE XXII

La voix « saturée » du chanteur de rock métal, un mécanisme supraglottique performant

The « saturated » voice of rock singers, a high-performance mechanism

Gérard Chevaillier, Rachel Guilbault, Jean-Noël Renard,
Philippe Herman et Patrice Tran Ba Huy
*Département de Phoniatrie
Service ORL - Hôpital Lariboisière
Paris - France
gerard.chevaillier@lrb.aphp.fr*

Résumé

Nous avons enregistré un professeur de chant et deux de ses élèves utilisant la technique dite de la « voix saturée » afin de déterminer la nature et l'origine de cette « saturation des sons ». Nous nous sommes intéressés aussi au « lexique » utilisé par ce professeur pour enseigner différents types d'émissions. Nous avons pratiqué une étude perceptive, une étude spectrographique à partir de l'électroglottogramme et une étude vidéo-stroboscopique du larynx en nasofibroscopie.

L'analyse vidéo couplée à l'analyse spectrale nous a permis de constater que la voix saturée nécessite la mise en œuvre d'au moins deux vibrateurs ou « co-vibrateurs ». Il s'agit de cordes vocales associées à un vibrateur supra-glottique, les bandes ventriculaires.

Nous n'avons pas pu mettre en évidence de relation claire entre les sensations du chanteur et un « pattern » vibratoire donné. Les différentes qualités acoustiques : nasale, vélaire, supraglottique et glottovélaire, que nous avons catégorisées à partir des sensations du chanteur, sont néanmoins bien discriminées en deux catégories par un jury d'expert ; celles qui donnent des sensations vibratoires « en haut » pour les saturations nasale et vélaire ; et celles qui donnent des sensations « en bas » pour les saturations supraglottique et glottovélaire.

Le chanteur va donc se servir de ses sensations pour atteindre le bon geste vocal, comme dans d'autres techniques vocales.

Mots-clés : voix saturée, bandes ventriculaires, co-vibrateur, harmonique secondaire, period doubling

Abstract

We recorded a singing teacher and two of his pupils using the said technique of the «voice saturated» to determine the nature and the origin of this «saturation of sounds». We were also interested in the «lexicon» used by this professor to teach various types of emissions. We practised a perceptive study, a spectrographic study and a video-stroboscopic study of the larynx. The video analysis coupled with the spectrum analysis allowed us to notice that the saturated voice requires the operated of at least two vibrators or «co-vibrators». We were not able to bring to light of clear relation between the sensations of the singer and the given vibratory «pattern».

The various acoustic qualities that we had categorized from the sensations of the singer are nevertheless discriminated well in two categories by expert's jury. The singer is thus going to use his sensations to affect the good vocal movement, as in the other vocal techniques.

Key Words : saturated voice, vocal cords, co-vibrator, harmonious secondary, period doubling

Introduction

Le but de ce travail est de définir et de comprendre l'origine des mécanismes de production de la voix dite saturée chez les chanteurs de rock ; Le premier point de notre étude a consisté à déterminer la nature physiologique des « sons saturés » à partir de données spectrographique et nasofibroscopique. Le deuxième point a été de vérifier s'il existait des corrélations entre les sensations ressenties par le chanteur et les mécanismes de production du son laryngé qu'il utilise ; autrement dit de vérifier si le « lexique du chanteur » était superposable à celui du physiologiste.

I - Matériel et méthode

A - Sujets

Nous avons proposé à un professeur de chant (Dav) spécialisé dans la technique vocale des « sons saturés » de participer à cette étude, ainsi qu'à deux de ses élèves. Ces trois chanteurs, deux hommes âgés de 40 et 32 ans et une femme âgée de 26 ans, maîtrisent la technique vocale des « sons saturés », et peuvent l'utiliser dans la durée sans ressentir de gêne. Ce sont des sujets sains ne présentant aucune plainte vocale et aucune lésion laryngée.

B - Matériel

La prise de son était enregistrée par un microphone Shure SM 48 placé à 30 cm de distance des lèvres. Un enregistrement simultané de l'électroglottogramme (EGG) a été réalisé avec le Laryngographe du type Fourcin. Les échantillons-sons et EGG étaient numérisés en 16 bits avec une fréquence d'échantillonnage de 44.1 kHz. Nous avons pratiqué une analyse acoustique basée sur des spectrogrammes de glottogramme avec le logiciel Gram 10.

Les laryngoscopies ont été réalisées au moyen d'un nasofibroscope Pentax FNL 20RP3 et d'un stroboscope Kay Pentax RLS 9100. Chaque enregistrement a été sauvegardé sur DVD (DVD Recorder Sony RDO GX7) pour servir à l'analyse des données et en extraire des photographies ; le montage des films a été réalisé à l'aide du logiciel Pinnacle Studio 8.

C - Méthode

Le professeur de chant a élaboré un lexique pédagogique à partir de ses sensations proprioceptives ressenties à l'émission des « sons saturés ». Quatre catégories vocales ont ainsi été rapportées par le professeur selon la place du son aux différents niveaux du conduit vocal. Nous avons traduit le plus fidèlement et avec son accord, en termes « plus physiologiques », ce que ressentait le professeur. Ainsi les sons « dans le nez » ont été appelés *saturations nasales*, les sons « sur le voile du palais » *saturations vélares*, les sons « juste au-dessus des cordes vocales » *saturations supraglottiques*, les sons « au niveau du voile du palais et au niveau des cordes vocales mêmes » *saturations glottovélares*.

Nous avons pratiqué une analyse perceptive à l'aide d'un jury de 25 experts : 11 orthophonistes spécialisés dans la rééducation vocale, 6 acousticiens, 4 phoniatres et 4 musiciens. Le but de l'évaluation perceptive était d'évaluer le recoupement possible entre la perception des sons saturés par un auditeur et les catégories définies par le chanteur, d'après ses sensations. Nous nous sommes inspirés du protocole original de Roubeau créé dans le cadre du mémoire d'orthophonie de Merkel et Travers (2006). Le protocole, dont la passation dure environ vingt minutes, est disponible sur internet à l'adresse suivante :

<http://kornyonline.free.fr/evaluation>. Il se compose de deux parties :

1 - Catégorisation libre des voix :

Douze items sont représentés par des icônes numérotées réparties sur l'écran de manière aléatoire. Ces icônes sont déplaçables pour permettre des regroupements. Les 12 sons correspondent à 3 notes différentes (fa2, la2, do3), chantées sur les 4 catégories de saturation, sur la voyelle /e/. L'intensité des sons a été égalisée par logiciel informatique pour les deux épreuves. Le but était d'obtenir des échantillons suffisamment homogènes ; l'hétérogénéité supposée ne devant reposer que sur des notions de hauteur et de « résonances » différentes. Il était demandé aux experts de constituer des groupes de voix selon les critères de leur propre choix. Les experts pouvaient faire autant de groupes souhaités, autant d'écoutes que nécessaire. Il n'y avait aucune indication donnée sur les voix écoutées.

2 - Identification en choix dirigé de la « résonance » la plus prégnante :

Pour 8 items, il fallait indiquer la résonance la plus prégnante parmi : nasale, vélaire, supraglottique, glottovélaire. Des indications étaient données sur la nature des critères proposés, à savoir leur utilisation par un chanteur en termes de placement de sa voix. Il était conseillé aux experts de faire d'abord des regroupements de sons, pour ensuite leur accoler une étiquette très subjective, comme il leur était précisé. Les 8 sons correspondaient à 2 notes différentes : la2 et fa2, chantées sur les 4 catégories de saturation, sur la voyelle /e/. Il y avait donc 4 groupes de 2 sons. Les sons étaient moins nombreux pour anticiper une éventuelle fatigue des experts.

Pour l'analyse vidéostroboscopique, le professeur de chant devait produire sur une même note et sur une même voyelle /e/, les quatre saturations successivement, pour permettre un comparatif direct. Pour chaque catégorie de « sons saturés » (nasal, vélaire, supraglottique, glottovélaire), le nasofibroscope a également été placé au-dessus du voile du palais. Les autres chanteurs devaient produire des sons saturés sur des notes tenues, choisies en fonction de leur tessiture.

L'enregistrement glottographique était effectué sur des notes tenues. L'étendue vocale des sons saturés était ainsi balayée ton par ton. Des spectres et spectrogrammes en bandes étroites ont été réalisés à partir des enregistrements sonores et EGG.

II - Résultats

A - Analyse vidéostroboscopique

1 - Caractéristiques générales du phénomène



Figure 1a : Vue stroboscopique en nasofibroscopie, phonation saturée avec participation des bandes ventriculaires

Chez tous les chanteurs, nous distinguons nettement une vibration des bandes ventriculaires, associée à celle des cordes vocales. Les bandes ne s'accolent que très rarement sur toute leur longueur. Leur fermeture est incomplète et concerne essentiellement leur moitié antérieure le plus souvent. (Figure 1a)

La phase ouverte des bandes ventriculaires semble plus longue que la phase fermée.

L'accrolement des bandes ventriculaires est parfois instable dans le temps avec des moments sans contact. La vibration des bandes ventriculaires s'accompagne d'une projection plus ou moins importante de mucus. Les cordes vocales vibrent toujours plus rapidement que les bandes ventriculaires. Elles sont parfois difficiles à voir en raison d'une forte compression supraglottique latérale ou antéropostérieure.

2 - Attaque du « son saturé » en mécanisme I

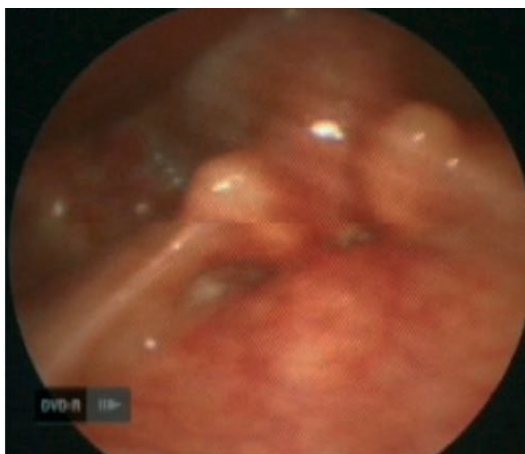


Figure 1b

Nous avons pu remarquer plusieurs façons d'attaquer les sons saturés en fonction de différents facteurs. Chaque chanteur construit sa manière de saturer les sons ; les attaques sont différentes selon que le fondamental est grave ou aigu ; les conditions d'émission sont expérimentales et n'ont rien à voir avec celles habituellement pratiquées par les chanteurs (anesthésie locale, fibroscope).

Pour certains, l'attaque du son se fait par un coup de « supraglotte » (Figure 1b) : les cartilages aryénoïdes basculent en avant, viennent au contact de la base de l'épiglotte jusqu'à fermeture complète du sphincter laryngé ; c'est la compression antéropostérieure. On observe ensuite une légère réouverture pendant la tenue du son. Le contact entre les bandes ventriculaires est alors nettement visible, mais pas sur toute leur longueur.



Figure 1c

Un des chanteurs a pu chanter sous nasofibroscopie. Nous avons alors observé une différence sensible entre les sons saturés produits « sur demande », et les sons saturés pendant le chant. Pour certains, les aryénoïdes vibraient, ou probablement les cartilages corniculés (Figure 1c).

Chez d'autres, le rapprochement des structures est moins extrême : les aryténoïdes ne touchent pas l'épiglotte.

Chez d'autres encore, nous n'avons pas pu observer un tel rapprochement des structures à l'attaque du son mais, au contraire, un énorme courant d'air donnant une impression de grande instabilité du vibrateur.

Pour chaque catégorie de « sons saturés », le nasofibroscope a été placé au-dessus du voile du palais, le chanteur ayant émis l'hypothèse que celui-ci vibrait pour les saturations vélaires et glottovélaires. Nous avons observé une immobilité parfaite du voile du palais, qui était constamment en position de fermeture, quel que soit le type de saturation.

D'autre part, les quatre catégories de « sons saturés » ne montrent aucune différence visible à l'œil nu au niveau laryngé. Tout au plus observe-t-on une mise en vibration de l'aryténoïde droit et de son ligament aryépiglottique pour les saturations « supraglottiques » et « glottovélaires », sans que cette observation soit constante d'un enregistrement sur l'autre.

3 - Attaque du « son saturé » en mécanisme II

Un seul chanteur a pu réaliser des sons saturés en « voix de tête ». L'analyse fibroscopique montre que d'autres structures laryngées entrent alors en vibration : les aryténoïdes entre eux, maintenus entre la paroi pharyngée postérieure et la base de l'épiglotte ; l'épiglotte, pliée en forme de V, la pointe de celui-ci vers l'arrière, contre la paroi pharyngée postérieure. Le degré de striction pharyngée est alors maximal.

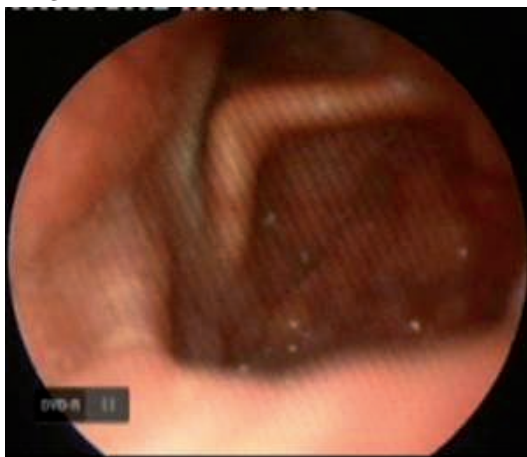


Figure 1d

B - Analyse acoustique

1 - Caractéristiques générales du phénomène

L'attaque du son saturé se fait « par en haut » ou « par en bas », c'est-à-dire que la fondamentale est toujours attaquée en dessus ou en dessous de la note demandée. Le phénomène dure entre 100 et 300 ms. On peut dire que la mise en vibration du système prend du temps.

Cette attaque est souvent suivie d'un régime transitoire caractérisé par la présence de bruit et des harmoniques secondaires peu stables. Le chanteur procède à un ajustement du son entre 50 et 300 ms et débouche finalement sur un régime stabilisé.

Les sons saturés présentent des « sous-harmoniques ». Ce terme constitue à notre avis un abus de langage, il laisse entendre que ces harmoniques seraient dépendants du vibrateur principal. Ils sont en réalité mécaniquement produits par un deuxième vibrateur ayant sa propre fréquence fondamentale. Nous les appellerons donc « harmoniques secondaires » en lien avec un vibrateur secondaire responsable d'une seconde fréquence fondamentale.

Nous appellerons F° la fréquence du vibrateur principal, c'est-à-dire celle des cordes vocales. Cette fréquence correspond à la hauteur du son demandé au chanteur et entendu par l'auditeur.

Nous appellerons $F^{\prime\circ}$ la fréquence du deuxième vibrateur. Celle-ci est toujours inférieure, mais dans un rapport harmonique par rapport à celle du vibrateur principal.

Nous avons réalisé des spectrogrammes pour 3 des chanteurs, 2 hommes (Dav et Tho) ; et une femme (Emi).

Pour Dav et Tho, le phénomène d'apparition des harmoniques secondaires est systématique. Pour Emi, il arrive que les harmoniques secondaires soient peu présents par rapport à la présence de bruit. (Figure 2)

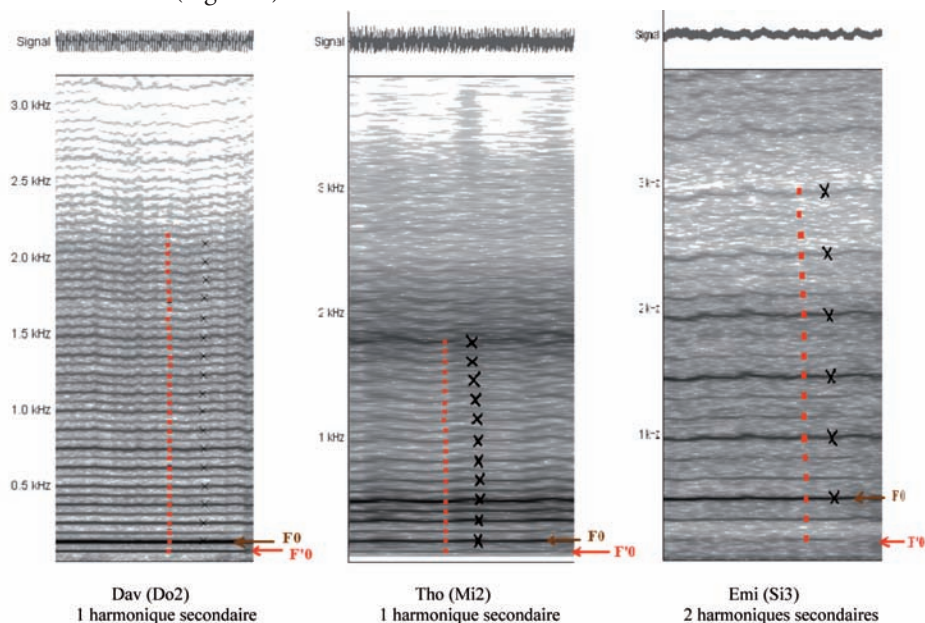


Figure 2 : Spectrogrammes de glottogrammes (Dav et Emi) - Spectrogramme du son rayonné (Tho).
 Flèche marron : F° , Flèche rouge : $F^{\prime\circ}$, Croix : harmoniques principaux,
 Carrés rouges : harmoniques secondaires

2 - Nombre d'harmoniques secondaires

Pour des fréquences basses, nous trouvons un seul harmonique secondaire. Si nous prenons pour exemple un do2 produit par Dav, soit $F^{\circ} = 130$ Hz, $F^{\prime\circ}$ correspond à la fréquence fondamentale du vibrateur secondaire, soit $F^{\prime\circ} = 65$ Hz (do 1). Le vibrateur secondaire produit un deuxième son perçu à l'octave inférieure ($F^{\prime\prime\circ} = 1/2 F^{\prime\circ}$). Sur le spectre du son issu du glottogramme, nous retrouvons le même phénomène que sur le spectrogramme : les harmoniques du vibrateur

secondaire s'intercalent entre les harmoniques du vibreur principal (Figure 3).

Pour des fréquences moyennes, nous retrouvons deux harmoniques secondaires. Si nous prenons pour exemple un la3 produit par Dav, soit $F^{\circ} = 440$ Hz. F'° correspond à la fréquence fondamentale du vibreur secondaire. $F'^{\circ} = 147$ Hz (ré 2), donc $F'^{\circ} = 1/3 F^{\circ}$ le vibreur secondaire produit un deuxième son perçu à la quinte inférieure (Figure 4).

Pour des fréquences aiguës en « voix de tête », Dav produit un son d'intensité beaucoup plus forte et qui s'apparente au cri. Si nous prenons un la#3, la F° et la F'° apparaissent nettement sur le spectre. On peut déduire de la F'° la suite des harmoniques secondaires, qui sont au nombre de six. (Figure 5).

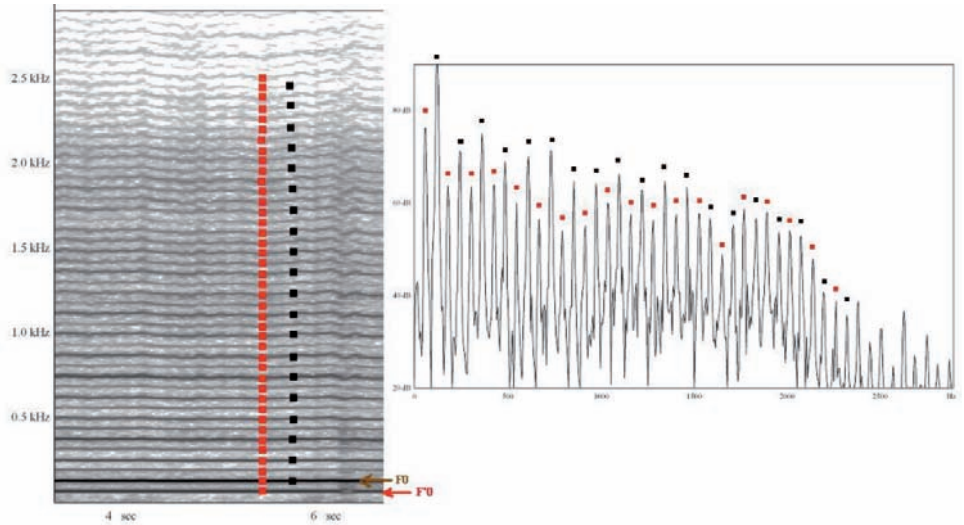


Figure 3 : Spectrogramme et spectre du glottogramme d'un do2 produit par Dav.
Flèche marron : F° , Flèche rouge : F'° , Points noirs : harmoniques principaux,
Points rouges : harmoniques secondaires

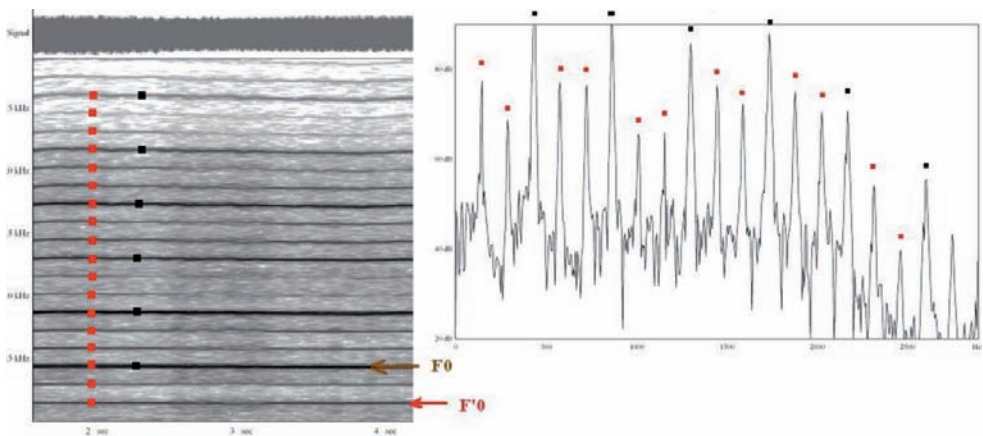


Figure 4 : Spectrogramme et spectre du glottogramme d'un la 3 produit par Dav.
Flèche marron : F° , Flèche rouge : F'° , Points noirs : harmoniques principaux,
Points rouges : harmoniques secondaires.

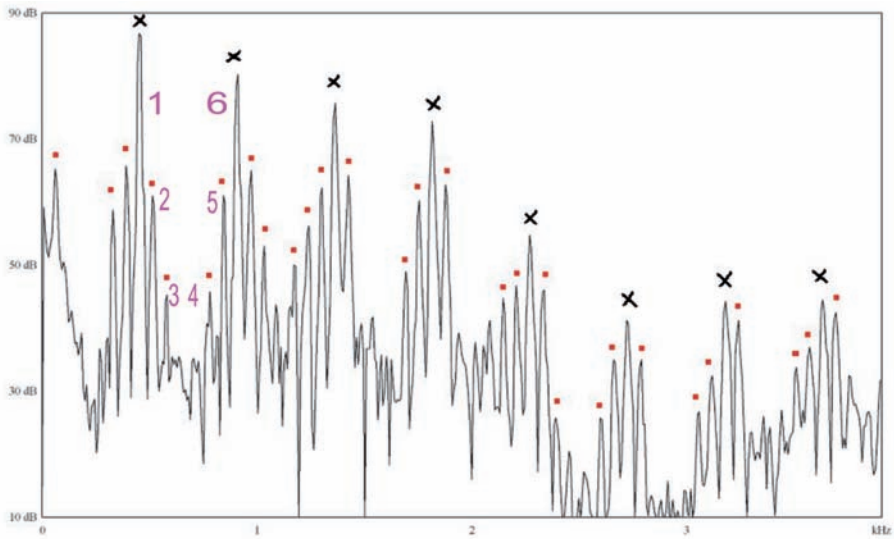


Figure 5 : Spectre du la#3 de la figure x à t= 1 sec.
Croix noires : harmoniques principaux - Carrés rouges : harmoniques secondaires

Au total, plus la fréquence fondamentale est élevée, plus le nombre d'harmoniques secondaires est élevé.

3 - Phénomènes d'instabilité du vibrateur secondaire

Si les chanteurs parviennent à conserver une vibration des cordes vocales stable, le vibrateur secondaire est plus instable. On observe parfois les phénomènes suivants :

Un pincement des harmoniques secondaires (figure 6).

L'apparition de « bruit » sur le spectrogramme. Les harmoniques secondaires deviennent instables, le spectrogramme devient plus gris.

Une variation du nombre d'harmoniques secondaires (figure 7).

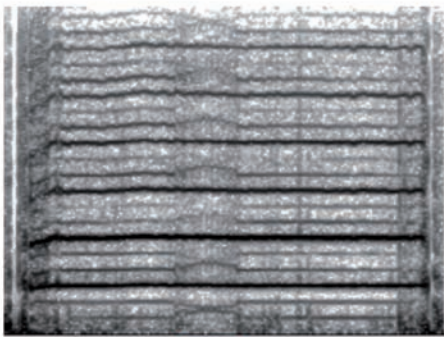


Figure 6 : Pincement des harmoniques secondaires
(spectrogramme de glottogramme)

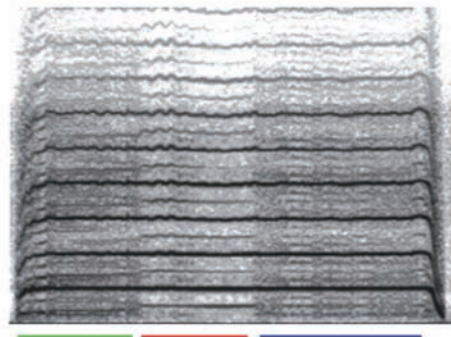


Figure 7 : Variation du nombre d'harmoniques secondaires
(spectrogramme de glottogramme)
en vert : 2 harmoniques secondaires
en rouge : 1 harmonique secondaire
en bleu : 3 harmoniques secondaires

C - Analyse perceptive

1 - Réactions spontanées des experts

A l'écoute des voix proposées, les experts ont exprimé des sentiments très divers, de l'inconfort : « *Quels sons désagréables !* » ; « *C'est hyper resserré et je suis anti-resserrement* » ; « *Ce sont des sons inconfortables, qui me gênent, auxquels je ne suis pas habituée* », à l'amusement, en passant par la perplexité : « *Ce sont des vraies voix ? Je suis perplexe !* », « *C'est bizarre, très étrange tout ça !* » ; et de l'étonnement : « *Ce sont des voix ? Je pensais que c'était un klaxon !* » ; « *Ce sont des voix, vraiment ?* ».

Les voix proposées étaient tenues pour artificielles par la majorité des experts. Les voix étaient notamment qualifiées d'électroniques, de synthèse, filtrées, déshumanisées, trafiquées, transformées, indirectes, bidouillées, de bruit de klaxon, de sonnette, d'interrupteur, ou encore un *buzzer*. Les experts restaient parfois sceptiques lorsqu'ils apprenaient que les voix n'avaient effectivement pas été manipulées.

Les voix étaient parfois considérées comme pathologiques. Lorsque les experts étaient informés qu'il s'agissait des productions d'un chanteur, certains les considéraient comme porteuses de pathologie et se montraient inquiets pour le chanteur. Les chanteurs de *métal* jouent d'ailleurs avec la notion de pathologie, comme en témoigne le nom morbide de certains groupes : Anorexia Nervosa, Suicidal Tendencies.

Les voix ont aussi été qualifiées de « sons de trachée », « sons de glotte », « sons de gorge », sans que ces experts puissent expliquer avec certitude ce qu'ils entendaient par là sur le plan physiologique.

2 - Hypothèses acoustiques et physiologiques des experts

Les hypothèses physiopathologiques suivantes ont été évoquées : Dysphonies « monstrueuses », pseudomyxome, fuite d'air, bitonalité ; voix de *fry*.

D'autres réactions parlaient manifestement du mécanisme vibratoire supposé, laissant entendre que la source vibratoire pouvait être double : « raucités très timbrées avec un bruit parasite qui ajoute sa fréquence propre ; vibration asymétrique des cordes vocales ; doublement de période avec utilisation des bandes ventriculaires, « voix des bandes » (terme évoqué par 4 experts sur 25).

Le son produit par ce vibreur a pu être interprété par les experts, soit en termes de grésillement, de granulation ou de bruit surajouté, soit en terme de manipulation acoustique du son : « Dans chaque son il y a deux sons, le deuxième est manipulé ; Ce sont des sons doubles ; C'est comme une diphonie distordue, écrasée ; ça me rappelle le chant guimbarde ou chant diphonique ; Le deuxième formant est manipulé et il ressort parfois beaucoup ; La vitesse de la « granulation » est parfois lente, parfois rapide ; Le grésillement surajouté est plus ou moins régulier ; La fréquence fondamentale est parfois masquée avec du bruit surajouté. »

3 - Catégorisation libre des voix

Il était demandé aux experts de constituer des groupes de voix selon les critères de leur propre choix. Les experts pouvaient faire autant de groupes que souhaité, autant d'écoutes que nécessaire. Il n'y avait aucune indication donnée sur les voix écoutées.

3 - 1 - Critères de regroupement choisis par les experts

Sur les 25 experts interrogés, 2 n'ont pas mené à terme leur regroupement. Nous les avons exclus de nos données pour les deux évaluations.

Le premier critère choisi était celui de la hauteur, rapidement compris comme étant secondaire à un critère de « timbres différents ». Les experts s'efforçaient alors de faire abstraction de la hauteur avec plus ou moins de facilité. D'autres proposaient un tableau à double entrée avec la hauteur d'un côté et le timbre de l'autre.

Certains experts réfléchissaient en terme de gradation : « *Les sons sont plus ou moins rauques* », d'autres en terme binaire : « *Il y a des sons rauques et d'autres non* ». Des sous-groupes étaient souvent proposés, généralement guidés par la hauteur. Certains experts n'ont pas su qualifier leur critère de regroupement.

Enfin, d'autres critères que le timbre ont été choisis : l'ouverture plus ou moins grande de la voyelle, la « vitesse de granulation », le caractère humain ou non de ces voix, le caractère plus ou moins bizarre ou plus ou moins porteur de pathologie de ces voix.

3 - 2 - Regroupements proposés par les experts

Les regroupements proposés étaient donc très variés en taille et en nombre, mais chaque son a été associé à d'autres de manière préférentielle. Le tableau 1 permet de montrer que les sons nasaux et vélares sont souvent associés ensemble ; de la même manière que le sont les sons supraglottiques et glottovélares.

Précisons que le nombre d'associations possibles n'est pas le même suivant que le son est associé à un son de même catégorie ou de catégorie différente. Par exemple un son « nasal » ne peut être associé qu'à deux autres sons « nasaux ». Par contre, il peut être associé à trois sons issus d'une autre catégorie que la sienne.

son	associé avec son « nasal »	associé avec son « vélaire »	associé avec son « supraglottique »	associé avec son « glottovélaire »
la2 nasal	25	35	4	3
fa2 nasal	24	35	4	3
do3 nasal	17	30	6	5
la2 vélaire	33	22	5	5
fa2 vélaire	37	21	4	3
do3 vélaire	30	17	6	5
la2 supraglottique	5	5	28	32
fa2 supraglottique	5	5	29	35
do3 supraglottique	4	5	25	29
la2 glottovélaire	2	3	32	29
fa2 glottovélaire	2	4	40	27
do3 glottovélaire	7	6	24	23

Tableau 1 : Nombre de fois où chaque son est associé à un son « nasal », à un son « vélaire », à un son « supraglottique » et à un son « glottovélaire » d'après les regroupements effectués par les experts dans l'évaluation 1

Le tableau 2 prend en compte les associations effectuées relativement au nombre de combinaisons possibles. Comme nous l'avons dit, les combinaisons possibles sont moins nombreuses au sein d'une même catégorie qu'entre deux catégories différentes.

Pour chaque association possible, le nombre de combinaisons observées est rapporté au nombre de combinaisons attendues par le hasard.

Tout score supérieur à 1 montre que le nombre de combinaisons observées est supérieur au nombre de combinaisons attendues par le hasard. Tout score inférieur à 1 montre que le nombre de combinaisons observées est inférieur au nombre de combinaisons attendues par le hasard.

son	nasal	vélaire	supraglottique	glottovélaire
nasal	1,84 (33)	1,86 (100)	0,26 (14)	0,21 (11)
vélaire	1,86 (100)	1,67 (30)	0,28 (15)	0,24 (13)
supraglottique	0,26 (14)	0,28 (15)	2,30 (41)	1,79 (96)
glottovélaire	0,21 (11)	0,24 (13)	1,79 (96)	2,24 (40)

Tableau 2 : Score de regroupement entre les différentes catégories selon le nombre de combinaisons observées (signalé entre parenthèses) rapporté au nombre attendu par le hasard.

Les histogrammes suivants (Figure 8) sont construits à partir des données du tableau 3 : ils mettent en évidence les associations préférentielles pour chaque catégorie de sons.

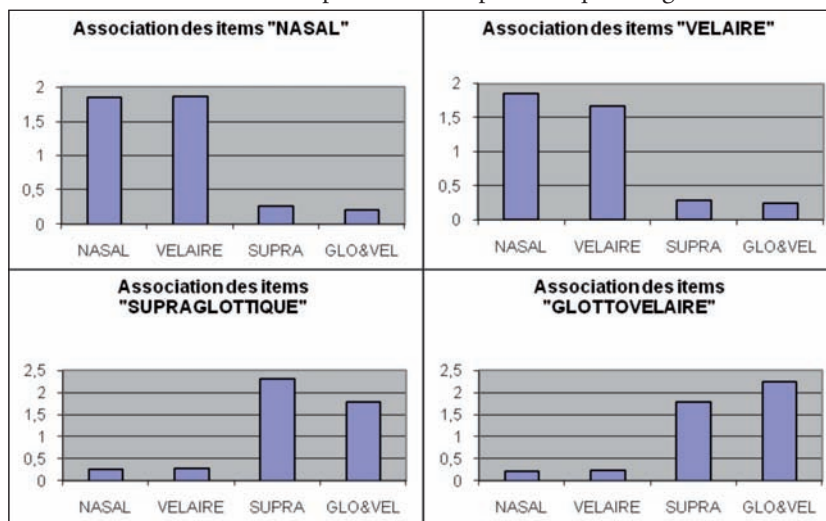


Figure 8 : Associations préférentielles pour chaque catégorie de son

Les items « nasaux » sont préférentiellement combinés aux items « vélaire » et « nasaux ». Les items « vélaire » sont préférentiellement associés aux items « nasaux » et « vélaire ». Les items « supraglottiques » sont préférentiellement associés aux items « supraglottiques » puis « glottovélaire ». Les items « glottovélaire » sont préférentiellement associés aux items « glottovélaire » puis « supraglottiques ».

Deux grands groupes se dégagent : le groupe des sons saturés qui seraient fabriqués « en haut » (nasaux et vélaïres), le groupe des sons saturés qui seraient fabriqués « en bas » (supraglottiques et glottovélaïres).

3 - 3 - Adjectifs utilisés pour opposer les sons

Les saturations supraglottiques et glottovélaïres ont été ressenties en terme de « plus » : plus rauques (critère choisi par 5 experts), plus instables, plus irrégulières, plus bruiteuses, plus tendues, plus resserrées, plus porteuses de pathologie, plus bizarres, plus denses, plus cavernueuses et rocailleuses ; en opposition à un aspect métallique, stable et régulier des saturations nasales et vélaïres.

A ce propos, il est intéressant de noter la volonté affichée par nos chanteurs de « salir les sons » lorsqu'ils utilisent la technique des « sons saturés ». Les termes péjoratifs utilisés par les experts sont donc à tout à fait significatifs à cet égard : « voix de dégueuli », « voix de vomissure », « vrombissement dégueulasse ». Les 17 experts ont intuitivement dissocié les sons saturés placés « en haut » des sons saturés placés « en bas ».

4 - Identification en choix dirigé

Pour 8 items, il fallait indiquer la « résonance » la plus prégnante parmi « nasale », « vélaïre », « supraglottique », « glottovélaïre ». Des indications étaient données sur la nature des critères proposés. Il y avait deux sons par groupe. Nous avons tenu compte dans nos résultats des experts ayant fait des groupes de trois sons.

4 - 1 - Regroupements effectués par les experts

Les experts étaient peu enclins à distinguer les sons nasaux des sons vélaïres et auraient souvent souhaité n'en faire qu'un seul groupe. Ils ont souvent procédé par hasard pour les diviser en groupes de deux. Par contre les sons supraglottiques ont été très bien discriminés des sons glottovélaïres (Tableau 3).

son	associé avec son « nasal »	associé avec son « vélaïre »	associé avec son « supraglottique »	associé avec son « glottovélaïre »
la2 nasal	11	12	0	1
fa2 nasal	11	14	0	0
la2 vélaïre	14	8	0	2
fa2 vélaïre	12	8	3	0
la2 supraglottique	0	1	17	9
la2 supraglottique	0	1	17	9
la2 glottovélaïre	0	2	5	18
fa2 glottovélaïre	1	0	8	18

Tableau 3 : Nombre de fois où chaque son est associé à un son « nasal », à un son « vélaïre », à un son « supraglottique » et à un son « glottovélaïre » d'après les regroupements effectués par les 23 experts dans l'évaluation 2

Comme pour la première évaluation, nous proposons un tableau prenant en compte les associations effectuées relativement au nombre de combinaisons possibles (Tableau 4).

son	nasal	vélaire	supraglottique	glottovélaire
nasal	3,14 (11)	1,86 (26)	0 (0)	0,07 (1)
vélaire	1,86 (26)	2,29 (8)	0,21 (3)	0,14 (2)
supraglottique	0 (0)	0,21 (3)	4,86 (17)	0,86 (12)
glottovélaire	0,07 (1)	0,14 (2)	0,86 (12)	5,14 (18)

Tableau 4 : Score de regroupement entre les différentes catégories selon le nombre de combinaisons observées (signalé entre parenthèses) rapporté au nombre attendu par le hasard.

Les histogrammes suivants sont construits à partir des données du tableau 4.

Il en ressort que les items « nasaux » sont associés de manière à peu près égale aux items « nasaux » et « vélaire » et les items « vélaire » également. Les sons « supraglottiques » et « glottovélaire » sont nettement plus différenciés que dans la première évaluation (Figure 9).

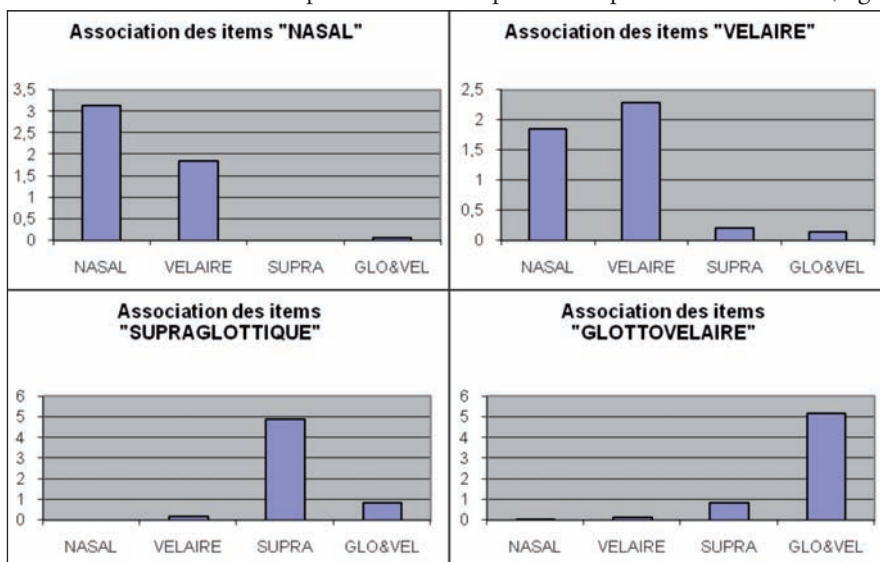


Figure 9 : Associations préférentielles pour chaque catégorie de son

4 - 2 - Adjectifs utilisés pour opposer les sons

Les sons « glottovélaire » ont été ressentis comme plus « pourris », plus abîmés, plus bruyants, plus de poitrine et plus rauques que les sons « supraglottiques ».

Le rapport de force était parfois inverse, les sons « supraglottiques » étant alors considérés comme plus forcés, plus bruts, plus gras, plus sombres, plus serrés et plus bas que les sons « glottovélaire ».

Les experts ont donc essayé de qualifier la différence qu'ils ressentaient, sans qu'une opposition lexicale frappante se dégage. Nous pouvons considérer les sons supraglottiques et glottovélaire comme des sous-catégories de sons parmi ceux qui seraient fabriqués « en bas ».

4 - 3 - Réactions des experts face au lexique proposé

Il était conseillé aux experts de faire d'abord des regroupements de sons, pour ensuite leur accoler une étiquette – étiquette somme toute très subjective, comme il était précisé aux experts. Certains experts ont toutefois exprimé leur incompréhension face au lexique proposé, en particulier pour les termes de « supraglottique » et « glottovélaire » : « *Ca ne veut rien dire* » ; « *Je ne comprends pas sa terminologie* » ; « *Ca ne me parle pas, ça n'est pas clair* », « *Je ne sais pas ce que ça veut dire* »...

D'autres ont trouvé que les sons appartenait à une même catégorie : « *Pour moi ils sont tous supraglottiques* » ; « *Tout me paraît glottique* ». Deux experts ont affirmé que la modification majeure était de toute façon laryngée et non spectrale : « *C'est à la source que ça se passe, c'est le vibreur qui agit, pas les résonateurs* ».

Le terme « glottovélaire » a été rebaptisé « pharyngé » et « infraglottique » par deux experts ayant refusé le lexique proposé. Le terme « supraglottique » a été rebaptisé « subglottique » par un expert : « *car ça raisonne plus en dessous, plus dans la poitrine* ».

4 - 4 - Etiquettes lexicales attribuées aux sons par les experts

Il est intéressant de faire la distinction entre regroupement correct et étiquetage correct (Tableau 5). Les sons sont-ils plus ou moins bien étiquetés ? Les différents termes proposés sont-ils plus ou moins « parlants » ?

son	associé avec son « nasal »	associé avec son « vélaire »	associé avec son « supraglottique »	associé avec son « glottovélaire »
nasal la2	17	4	1	0
nasal fa2	14	6	1	1
vélaire fa2	7	10	1	4
vélaire la2	6	10	4	3
supraglottique fa2	1	0	10	12
supraglottique la2	1	1	8	11
glottovélaire fa2	0	5	8	8
glottovélaire la2	0	6	8	8

Tableau 5 : Nombre de fois où chaque son a été associé à l'étiquette « nasal », « vélaire », « supraglottique », « glottovélaire »

Le croisement entre le son et son étiquetage correct est souligné en gras.

Les résultats (Tableau 6) montrent que l'étiquette « nasal » est la plus parlante pour les experts. L'étiquette « glottovélaire » est la moins parlante puisqu'elle est même davantage attribuée à des sons étiquetés « supraglottiques » par le chanteur.

Etiquetage des experts	« nasal »	« vélaire »	« supraglottique »	« glottovélaire »
Etiquetage du chanteur				
« nasal »	31	10	2	1
« vélaire »	13	20	5	7
« supraglottique »	2	1	18	23
« glottovélaire »	0	11	16	16

Tableau 6 : Concordance entre l'étiquetage des experts et celui du chanteur, toutes hauteurs confondues.
Le croisement entre étiquetages concordants est souligné en gras

Les histogrammes suivants (Figure 6) sont construits à partir des données du tableau 6. Nous observons que l'étiquette « nasal » a été exclusivement associée à des sons sensés être fabriqués « en haut » d'après le chanteur (c'est-à-dire « nasaux » et « vélaire »).

Les autres étiquettes sont attribuées de manière plus confuse.

L'étiquette « vélaire » a été attribuée de manière assez conséquente aux sons « glottovélaire ». Ceci va dans le sens des propos du chanteur selon lesquels le voile serait impliqué dans la production de cette catégorie de sons.

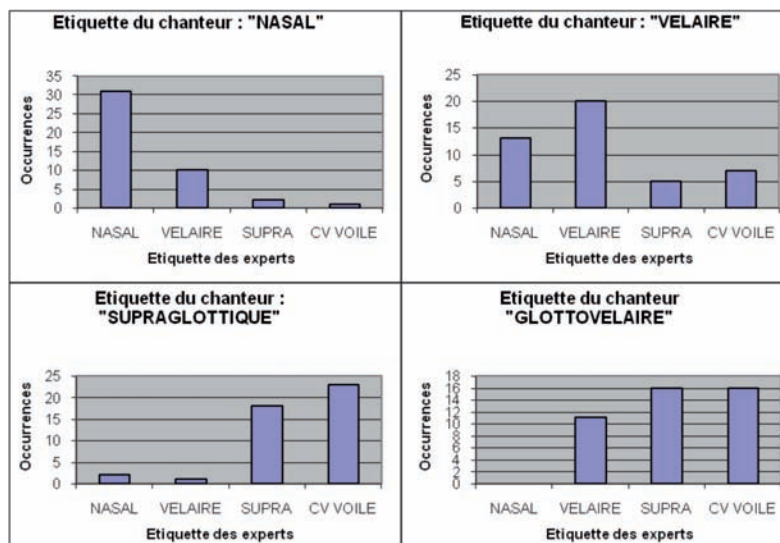


Figure 10 : Etiquetage des experts pour chaque catégorie de son définie par le chanteur

5 - Synthèse des deux évaluations

Les résultats des deux évaluations vont dans le même sens : deux grands groupes de saturations : nasales et vélaire d'un côté, supraglottiques et glottovélaire de l'autre, sont clairement distincts en termes de stabilité, de régularité et de raucité.

Les saturations supraglottiques et glottovélaire sont également bien discriminées entre elles lorsque les experts sont en situation plus dirigée.

Les saturations nasales et vélaire sont quasiment indistinctes.

L'étiquette « nasal » est la seule à être partagée par tous les experts de manière évidente. L'étiquette « supraglottique » renvoie très majoritairement à des sons fabriqués « en bas », puisqu'elle est autant associée à des sons « supraglottiques » qu'à des sons « glottovélaire ». Les étiquettes « vélaire » et « glottovélaire » sont source de confusion : ce lexique-là n'est pas reconnu par les experts.

III - Discussion

Svec «et coll.» (1986) ont montré que l'apparition d'harmoniques secondaires pouvait être due à une désynchronisation vibratoire des faces supérieures et inférieures des cordes vocales. Ils ont observé ce phénomène dans le cadre d'un passage du mécanisme I au mécanisme II, ce qui n'est pas le cas du phénomène observé notre étude.

D'autres auteurs Neubauer «et coll.» (2001) ; Jiang « et coll.» (2003), ont montré que la biphonation, c'est-à-dire le fait de produire deux sons simultanément, peut résulter d'une asymétrie des cordes vocales dans le sens antéro-postérieur ou transverse.

Dans les deux cas, notre analyse fibroscopique, montre que l'apparition d'harmoniques secondaires que nous avons observées dans l'analyse acoustique est à mettre sur le compte de la vibration des bandes ventriculaires. Nos résultats concordent avec ceux de Fuks «et coll.» (1998), Lindestad «et coll.» (2004) et Borch «et coll.» (2004) faisant état de l'apparition d'harmoniques secondaires parallèlement à une co-vibration des bandes ventriculaires.

Les trois chanteurs observés dans notre étude utilisent donc un système à double vibreur. Ce système est composé : d'un vibreur principal : les cordes vocales. (Il assure le régime principal de vibration et donne la fréquence fondamentale du son) et d'un vibreur secondaire : les bandes ventriculaires. Le vibreur secondaire produit un deuxième son avec sa fréquence propre. Superposé au son du vibreur principal, le son du vibreur secondaire donne au timbre un aspect « granuleux ». Ce son est perçu à l'octave inférieure lorsque les bandes vibrent 2 fois moins vite, et à la quinte inférieure lorsque les bandes vibrent 3 fois moins vite que les cordes vocales. Nous retrouvons cette description dans les travaux de Henrich «et coll.» (2006). Par ailleurs, nous avons souligné certains phénomènes d'instabilité, ainsi que des phénomènes d'ajustement du son lors de l'attaque, Neubauer «et coll.» (2004). Ceci correspond bien à difficulté à installer puis à maintenir le système à double vibreur chez les trois chanteurs observés. Bailly «et coll.» (2007) décrit le vibreur laryngé comme un système à dynamique non linéaire ou les variations périodiques de la durée du cycle cordal et les interactions des bandes ventriculaires sur le temps de fermeture glottique sont précisées sur la dérivée de l'EKG (DEGG).

Le phénomène de co-vibration des bandes ventriculaires a déjà été observé par des ethnomusicologues (chant Sarde « A Tenore », chant Xhosa d'Afrique « Umngokolo », chant Mongol « Kargyraa », Léothaud «et coll.» (1996) et étiqueté sous le nom de *period doubling*. Nous pouvons également parler de *period tripling* voire *quadrupling* lorsque les harmoniques secondaires se multiplient.

Lindestad «et coll.» (2001) décrivent en cinématographie ultrarapide une fermeture des deux tiers antérieurs des bandes ventriculaires avec de grandes amplitudes vibratoires ; une phase d'ouverture des bandes plus rapide que la phase de fermeture, alors que les cordes vocales ont

une phase de fermeture rapide. La fermeture des bandes précède celle des cordes vocales. Une étude en kymographie confirme que la vibration des bandes ventriculaires correspond à la phase d'ouverture du second cycle vibratoire cordal et que la phase de fermeture du cycle cordal suivant est cachée par les bandes ventriculaires.

Nous observons dans certains cas une vibration des aryténoïdes dans l'aigu et en régime stabilisé. Ce phénomène a déjà été observé par Sakakibara «et coll.» (2004) dans leur étude sur le *growl* dans les musiques ethniques et *pop*. Les auteurs décrivent comme nous : une compression laryngée antéro-postérieure très importante ; des ligaments ary-épiglottiques rapprochés ; un pétiole de l'épiglotte en contact avec les aryténoïdes. Ils observent l'apparition d'harmoniques secondaires. Ils n'ont pu voir ni les cordes vocales ni les bandes ventriculaires, mais pensent que ces dernières ne vibrent pas.

Des variations interindividuelles sont probables en ce qui concerne les bandes ventriculaires, comme le suggèrent Borch «et coll.» (2004). Les données concernant les muscles des bandes ventriculaires ne sont pas établies de manière aussi certaine que celles concernant les cordes vocales, ce qui semble naturel, vu le rôle secondaire qu'occupent les bandes dans la production de la voix « normale ». Les auteurs restent prudents quand il s'agit de les décrire. L'étude détaillée de Reidenbach (1998) montre d'ailleurs que certains muscles sont inconstants. La masse des bandes ventriculaires peut varier d'un individu à l'autre, voire d'un sexe à l'autre.

Le phénomène de pincement des harmoniques (Cf. Figure 6) semble bien correspondre à l'étude des instabilités et des troubles de la voix retrouvée dans l'article de Jiang «et coll.» (2006). Il est question de méthodes d'études basées sur la théorie du chaos et sur l'analyse dynamique de phénomènes non linéaires appliquées à des modèles mathématiques de cordes vocales.

D'autre part, le phénomène de variation du nombre d'harmoniques secondaires (Cf. figures 7) soulève le problème de la nature des interactions entre vibrateurs principal et secondaire. Selon Bailly «et coll.» (2006, 2007), l'action des bandes ventriculaires sur le vibrateur cordal peut être, soit de faciliter, soit de réduire, ou de n'avoir aucune action sur le régime vibratoire des cordes vocales en fonction du régime de pression. Des bifurcations peuvent apparaître dans certaines configurations.

Le but de l'évaluation perceptive était de vérifier si un auditeur averti était capable de discriminer perceptivement des différences entre les différents types de sons saturés proposés et les catégories définies par le chanteur. Tout d'abord, les réactions spontanées des professionnels montrent une non-familiarité avec cette technique vocale, ainsi que son caractère inhabituel et curieux. Ces voix sont parfois considérées comme pathologiques ou porteuses de pathologie.

L'épreuve de catégorisation libre laisse supposer que les saturations nasales et vélares d'un côté, supraglottiques et glottovélares de l'autre, sont perçues comme étant très différentes ; les secondes étant notamment considérées comme plus « bruyantes ». L'analyse perceptive et l'analyse acoustique se rejoignent sur ce point.

Les résultats de l'épreuve d'identification en choix dirigé montrent également une bonne discrimination des saturations supraglottiques versus glottovélares, tandis que les saturations nasales et vélares sont confondues.

Les types de sons saturés décrits par le chanteur sont donc plus ou moins corrélés à une perception différenciée. Nous ne sommes pas en mesure de dire si ces différences sont dues à des modifications laryngées plutôt qu'à des modifications résonnantes. Certes, le chanteur a tendance à utiliser des voyelles plus ouvertes pour les saturations supraglottiques et glottovélaires, mais des modifications laryngées sont sûrement responsables de l'adjonction de bruit sur ces deux derniers types de saturations. On peut penser qu'il y a donc à la fois des modifications laryngées et résonnantes.

La tentation est parfois grande pour les chanteurs de donner à leurs sensations des caractéristiques scientifiques. Quand ils sont dans la métaphore pure, il n'y a pas d'ambiguïté possible, par exemple : « Fais *comme si* tu avais une pomme de terre chaude dans la bouche ». Quand ils utilisent des notions de physiologie, cela prête à confusion et peut tromper. Notre propos n'est pas de remettre en cause les sensations du professeur de chant, mais de comprendre ce qu'elles recouvrent sur le plan physiologique. Ainsi pouvons-nous dire que le mécanisme vibratoire laryngé et supralaryngé sont les mêmes pour les quatre types de saturation ; et que le voile du palais reste chaque fois immobile : il n'y a pas de changement flagrant de « pattern » laryngé. Le mécanisme supralaryngé de base reste le même pour les quatre types de saturation décrits par le professeur de chant. Les bandes ventriculaires vibrent tout autant lorsque le chanteur dit mettre le son *au-dessus* de ses cordes (saturation supraglottique), que lorsqu'il dit le mettre *sur* les cordes (saturation glottovélaire).

Par contre, lorsque le professeur de chant passe en « voix de tête », il y a adjonction d'un élément vibrant supplémentaire avec utilisation des aryténoïdes et/ou de l'épiglotte. Cet élément vibrant ne nous apparaît pas être de même nature que les bandes ventriculaires ; il ne vibre contre rien, cela semble être le résultat d'une transmission vibratoire. Ils n'ont donc pas à être considérés comme des vibreurs secondaires comme décrits plus haut.

D'un point de vue purement acoustique, le terme de « saturation », utilisé spontanément par ces chanteurs, pourrait signifier la mise en place d'un régime de distorsion, Hanquinet «et coll.» (2005). En définissant cette technique comme une saturation du son, le chanteur nous donne une information objectivement fautive de ce point de vue. Le timbre obtenu ne résulte pas d'un régime de distorsion du vibreur, mais de l'utilisation d'un système à double vibreur. La signification du terme de saturation est plus proche de celle utilisée par les musiciens de rock qui utilisent des amplificateurs à lampes pour créer des sons « sales » ou distordus à partir de leurs instruments.

Le mécanisme supraglottique utilisé par les chanteurs de *métal* est performant : il leur permet de crier fort et assez longtemps, tout en préservant leurs cordes vocales. L'aisance avec laquelle ils crient incite même à penser que le système à double vibreur autorise plus facilement ce type de performances, que le système traditionnel à vibreur unique. Quand un chanteur trouve le son qu'il cherche, il ne fait pas que l'entendre, il le ressent. Les sensations proprioceptives sont déterminantes car elles permettent au chanteur d'avoir une action de contrôle. C'est ce que fait notre professeur de chant, et c'est ce qui l'amène à créer un lexique pédagogique quand il enseigne.

Conclusion

La voix dite saturée est produite par une source vibrante mettant en jeu plusieurs « co-vibrateurs » ; il s'agit d'un mécanisme supralaryngé dans lequel les bandes ventriculaires vibrent à une fréquence inférieure, multiple de celle des cordes vocales pour les sons graves et médium. Dans l'aigu, d'autres structures peuvent aussi participer à la vibration, en particulier l'épiglotte et les aryénoïdes. Ce mécanisme est tout à fait similaire à celui décrit dans d'autres techniques vocales sous le terme de « period doubling ».

Nous n'avons pas observé de différence fonctionnelle entre les quatre catégories de « sons saturés » décrits par le chanteur. Le lexique créé et utilisé par le professeur de chant correspond donc à une métaphore pédagogique et non à un « pattern » vibratoire donné.

Les différentes qualités acoustiques : nasale, vélaire, supraglottique et glottovélaire, sont néanmoins bien discriminées en deux catégories ; celles qui donnent des sensations vibratoires « en haut » pour les saturations nasale et vélaire ; et celles qui donnent des sensations « en bas » pour les saturations supraglottique et glottovélaire. Comme dans toute technique vocale, le chanteur va ainsi construire un programme d'action motrice qui lui permettra d'associer à un geste phonatoire, une perception donnée, et de chanter en sécurité.

Références bibliographiques

Bailly L., Ruty N., Van Hirtum A., Cisonni J., Pelorson X., Henrich N. (2006) « Aerodynamic interaction between the vocal folds and the ventricular bands », *7th International Conference Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research*, Groningen, Netherlands, 6-7 octobre 2006.

Bailly, L., Henrich, N (2007), *Exploration of vocal folds and ventricular bands interaction in singing using high-speed cinematography and electroglottography*, Proc. 19th International Congress on Acoustics (ICA), Madrid, Spain (article accepté, parution septembre 2007)

Behrman, A., Dahl, L.D., Abramson, A.L., Schutte, H.K. (2003), Anterior-posterior and medial compression of the supraglottis: signs of nonorganic dysphonia or normal posture? *J Voice*, 17 (3): 403-410

Borch, D.Z., Sundberg, J., Lindestad, P.A., Thalén, M. (2004) Vocal fold vibration and voice source aperiodicity in 'dist tones': a study of timbral ornament in rock singing, *Logoped Phoniatr Vocol*, 29 (4): 147-153

Fuks, L., Hammarberg, B. (1998), A self-sustained vocal-ventricular phonation mode: acoustical, aerodynamic and glottographic evidences, *Trita-TMH*, 3 (1): 49-59

Hanquinet, J., Grenet, F., Schoentgen, J. (2005): «Synthesis of disordered voices», In *NOLISP-2005*, 168-173.

Henrich, N. (2001), *Etude de la source glottique en voix parlée et chantée : modélisation et estimation, mesures acoustiques et électroglottographiques, perception*, Thèse de doctorat de l'Université de Paris VI.

Henrich, N., Lortat-Jacob, B., Castellengo, M., Bailly, L., Pelorson, X. (2006). Period-doubling occurrences in singing: the «bassu» case in traditional Sardinian «A Tenore» singing, in *International Conference on Voice Physiology and Biomechanics*, Tokyo, Japan, Jul. 2006.

- Jiang, J., Zhang, Y., Ford, C.N. (2003), Nonlinear dynamics of phonations in excised larynx experiments, *J Acoust Soc*, 114(4): 2198-2205
- Leothaud, G., Lortat-Jacob, B., Zemp, H. (1996), *Les voix du monde*, CMX374 1010.12, CNRS / Musée de l'Homme (3 CDs avec livret)
- Lindestad, P.A., Blixt, V., Pahlberg-Olsson, J., Hammarberg, B. (2004), Ventricular fold vibration in voice production: a high-speed imaging study with kymographic, acoustic and perceptual analyses of a voice patient and a vocally healthy subject, *Logoped Phoniatr Vocol*, 29 (4): 162-170
- Merkel, H., Travers, C. (2006), La dysphonie spasmodique en adduction : apport de l'analyse acoustique pour le diagnostic différentiel, Mémoire pour le certificat de capacité d'orthophoniste. Université Pierre et Maie Curie PARIS VI.
- Neubauer, J., Edgerton, M., Herzel, H. (2004), Nonlinear phenomena in contemporary vocal music, *J Voice*, 18 (1): 1-12
- Neubauer, J., Mergell, P., Eysholdt, U., Herzel, H. (2001). Spatio-temporal analysis of irregular vocal fold oscillations: biphonation due to desynchronisation of spatial modes, *J Acoust Soc*, 110 (6): 3179-3192
- Reidenbach, M.M. (1998). The muscular tissue of the vestibular folds of the larynx, *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 255 (7): 365-367
- Sakakibara, K., Fuks, L. (2004). *Growl voice in ethnic and pop styles*, Proc. of International Symposium on Musical Acoustics (ISMA), 159-162
- Stager, S.V., Neubert, R., Miller, S., Regnell, J.R., Bielamowicz, S.A. (2003), Incidence of supraglottic activity in males and females: a preliminary report, *J Voice*, 17 (3): 395-402
- Svec, J., Schutte, H., Miller, D.G. (1996). A subharmonic vibratory pattern in normal vocal folds, *J Speech Hear Res*, 39 (1):135-143