EFFET DES STRUCTURES SUPRAVENTRICULAIRES EN "VOIX SATUREE" CHEZ LE CHANTEUR DE ROCK METAL

PAR GERARD CHEVAILLIER, DAVID FERON, RACHEL GUILBAULT, JEAN-NOËL RENARD, PHILIPPE HERMAN (DEPARTEMENT DE PHONIATRIE, SERVICE ORL, HOPITAL LARIBOISIERE, PARIS, FRANCE)

L'hôpital Lariboisière

Nous avons enregistré un professeur de chant (David Féron) 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 avons pratiqué une étude spectrographique à partir de l'électroglottogramme (EGG), une étude vidéo-stroboscopique du larynx en nasofibroscopie et enfin une étude à l'endoscope rigide connecté à une caméra ultrarapide (CUR). A partir des fichiers vidéo numériques nous avons effectué une série de kymogrammes.

L'analyse des vidéogrammes couplée à l'analyse spectrale EGG nous a permis de constater que la voix saturée nécessite la mise en œuvre d'au moins deux vibrateurs ou "co-vibrateurs" : les cordes vocales associées à un vibrateur supraglottique, les bandes ventriculaires le plus souvent. De plus, la perception d'un son plus grave, à l'octave ou à la quinte est le résultat de la mise en vibration des bandes ventriculaires. La CUR et la kymographie ont permit de confirmer ces données et de préciser la cinétique vibratoire de ce double vibrateur.

INTRODUCTION

Le but de ce travail était de répondre à plusieurs questions : comment et où se fabrique la "voix saturée", y a-t-il une relation entre le lieu des sensations perçues par le chanteur et la réalité physiologique, d'où provient la perception d'entendre un son beaucoup plus grave que ce que le son fondamental émis ne le laisserait attendre.

MATERIEL ET METHODE

Nous avons proposé à un professeur de chant spécialisé dans la technique vocale de la "voix saturée" 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.

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'EGG a été réalisé avec le Laryngograph 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. L'enregistrement EGG 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.
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 Pinacle Studio 8.
Les prises de vues en CUR ont été réalisées avec la caméra Model Richard Wolf 5562 équipée d'une lampe au xénon de 300 W. Le mode Hi Speed permet d'acquérir 4000 images / seconde soit 2 s d'acquisition ou environ 10 images /cycle vibratoire. La captation se fait à l'aide d'un endoscope rigide 70° ou 90° de la marque Wolf, le son et l'EGG sont enregistrés en même temps. La lecture est ralentie à 25 i/s et peut être accélérée. La résolution des images est de 256 x 128 pixels.
Pour l'acquisition vidéostroboscopique ou CUR, le son demandé devait être émis sur une même note et sur une même voyelle /e/. 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" ont été appelés *saturations vélaires*, les sons "juste au-dessus des cordes vocales" ont été appelés *saturations supraglottiques*, les sons "au niveau du voile du palais et au niveau des cordes vocales mêmes" ont été appelés *saturations glottovélaires*.
Une analyse par kymographie numérique a été réalisée. Il s'agit d'une analyse temporelle de tous les points d'une ligne croisant perpendiculairement les structures du vibrateur laryngé. Ainsi chaque point de la ligne, caractérisé par ses paramètres de couleur, de luminosité et de contraste va varier tout au long de la lecture de l'échantillon. Les points les plus changeants sont ceux qui correspondent aux structures vibrantes, cordes vocales et bandes ventriculaires. C'est ainsi que vont se dessiner sur le kymogramme, le rapprochement et l'écartement des structures participant à la vibration. (Figure 1)

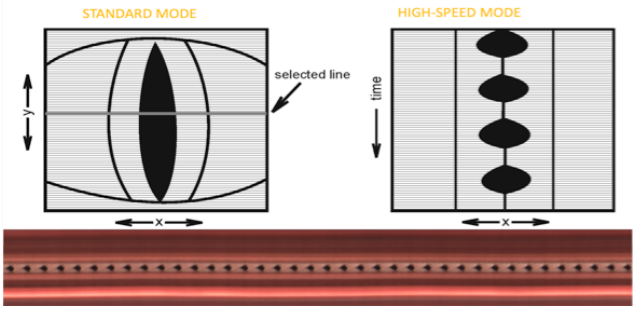


Figure 1 : Principe de la kymographie et Kymogramme

RESULTATS

I. ANALYSE VIDEOSTROBOSCOPIQUE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DU PHENOMENE

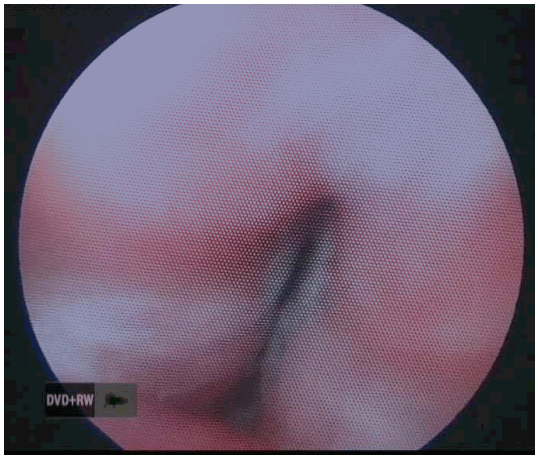
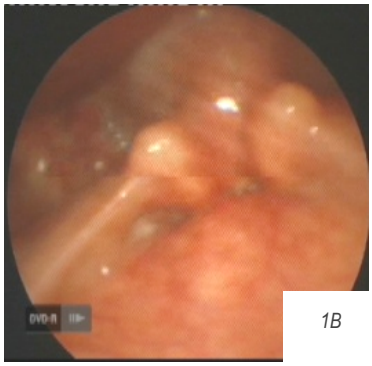


Figure 1a : Vue stroboscopique en nasofibroscopie, phonation saturée avec participation des bandes ventriculaires

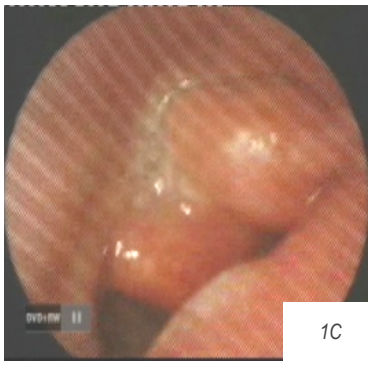
Chez tous les chanteurs nous distinguons nettement une vibration des bandes ventriculaires associée à la vibration des cordes vocales. Les bandes ne s'accolent que très rarement sur toute leur longueur. Leur fermeture est incomplète et concerne essentiellement leur moitié antérieure le plus souvent (Figure 1a). La phase ouverte des bandes ventriculaires semble plus longue que la phase fermée.
L'accolement 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 SATURE" EN MECANISME I

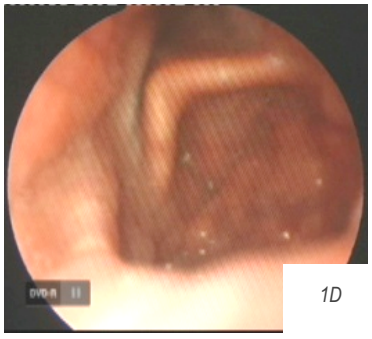
Nous avons pu remarquer plusieurs façons d'attaquer les sons saturés en fonction de différents facteurs. Chaque chanteur construit sa manière de saturer les sons ; les attaques sont différentes selon que le fondamental est grave ou aigu.
Pour certains l'attaque du son se fait par un coup de "supraglotte" (Figure 1b) : les cartilages aryténoïdes basculent en avant, viennent au contact de la base de l'épiglotte jusqu'à fermeture complète de la filière laryngée. C'est la compression antéropostérieure donnant dans ce cas ce qui a pu être appelé, le "sphincter laryngé".
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.


1B

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 aryténoïdes vibraient ou du moins 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 une 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


1C

pour les saturations appelées "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.
Enfin, les quatre catégories de "sons saturés" décrites par le professeur en fonction du lieu de perception vibratoire, 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.


1D

3. ATTAQUE DU "SON SATURE" EN MECANISME 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).

II. ANALYSE ACOUSTIQUE

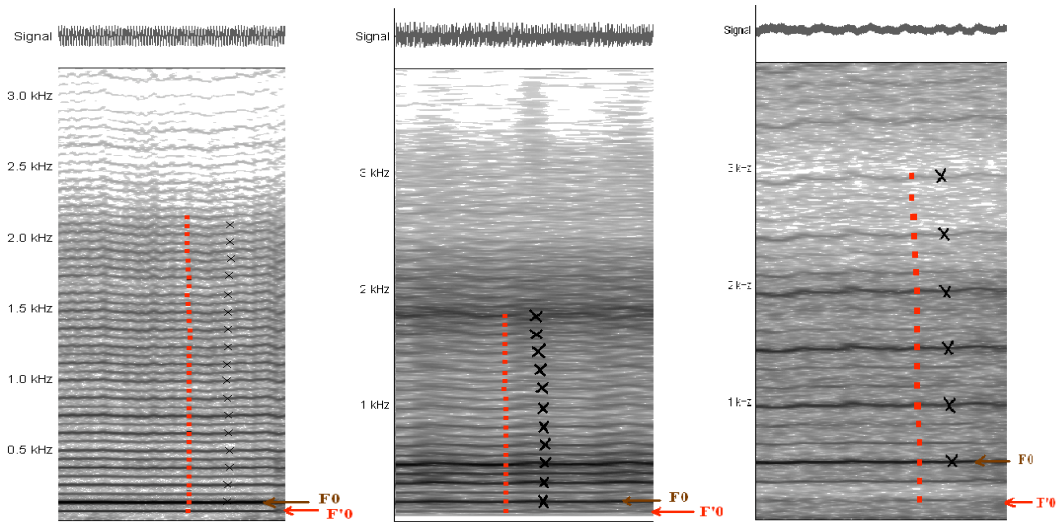
1. CARACTERISTIQUES GENERALES DU PHENOMENE

Sur les sonagrammes, 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 puis atteinte et conservée. 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 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'° la fréquence du deuxième vibrateur. Celle-ci est toujours inférieure, mais dans un rapport harmonieux par rapport à celle du vibrateur principal.

Nous avons réalisé des spectrogrammes pour trois des chanteurs, deux hommes et une femme.
Pour les sujets masculins, le phénomène d'apparition des harmoniques secondaires est systématique. Pour le sujet féminin, il arrive que les harmoniques secondaires soient peu présents par rapport à la présence de bruit.
(Figure 2)



Dav ♂ (Do2)
1 harmonique secondaire

Tho ♂ (Mi2)
1 harmonique secondaire

Emi ♀ (Si3)
2 harmoniques secondaires

Figure 2 : Spectrogrammes de glottogrammes (Dav, le professeur et Emi, une élève) – Spectrogramme du son rayonné (Tho, un élève).
Flèche marron (gris foncé) : F°, Flèche rouge (gris clair) : F°, Croix : harmoniques principaux, Carrés rouges (gris clair) : harmoniques secondaires

2. NOMBRE D'HARMONIQUES SECONDAIRES

Pour des fréquences basses, nous trouvons un seul harmonique secondaire. Si nous prenons pour exemple un do 2 produit par le professeur, soit F° = 130 Hz, F'° correspond à la fréquence fondamentale du vibrateur secondaire**,** soit F'° = 65 Hz (do 1). Le vibrateur secondaire produit un deuxième son perçu à l'octave inférieure (F'° = 1/2 F°). 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 vibrateur principal (Figure 3).
Pour des fréquences moyennes, nous retrouvons deux harmoniques secondaires. Si nous prenons pour exemple un la3 produit par le professeur, soit F° = 440 Hz. F'° correspond à la fréquence fondamentale du vibrateur secondaire. F'° = 147 Hz (ré 2), donc F'° = 1/3 F° le vibrateur secondaire produit un deuxième son perçu à la quinte inférieure (Figure 4).
Pour des fréquences aigues en "voix de tête", le professeur 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).

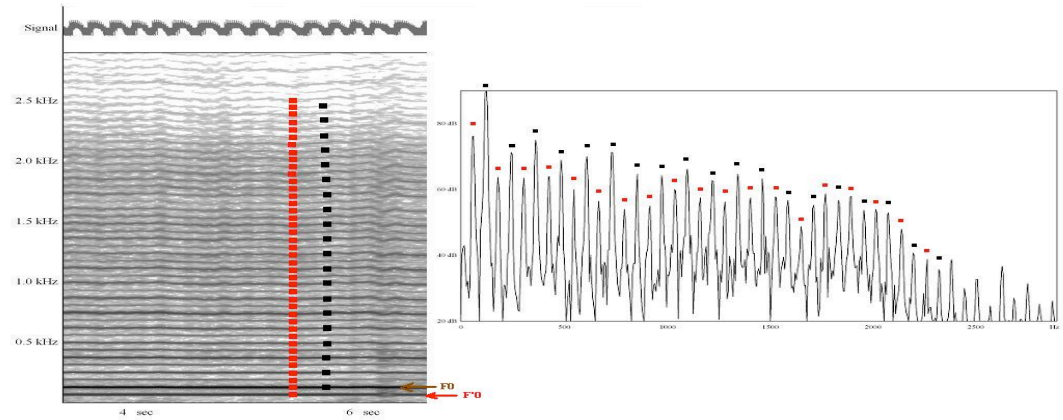


Figure 3 : Spectrogramme et spectre du glottogramme d'un do2 produit par Dav,le professeur.

Flèche marron (gris foncé) : F°, Flèche rouge (gris clair) : F'°, Points noirs : harmoniques principal, Points rouges (gris clair) : harmoniques secondaires

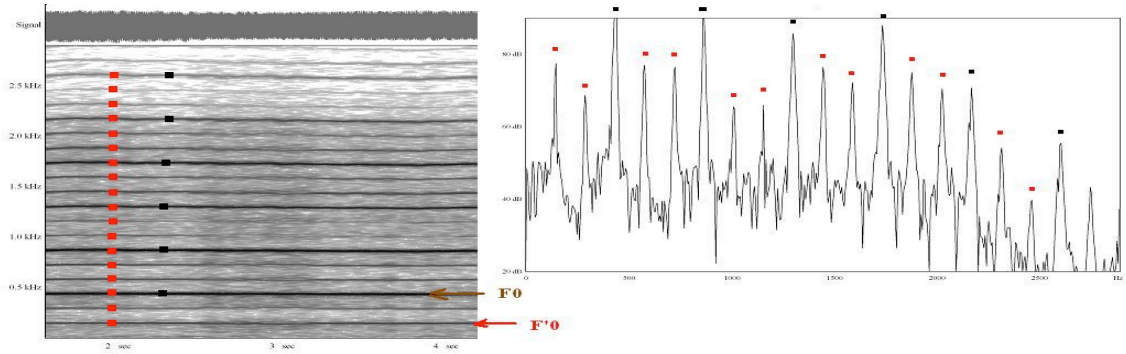


Figure 4 : Spectrogramme et spectre du glottogramme d'un la 3 produit par Dav, le professeur.

Flèche marron (gris foncé) : F°, Flèche rouge (gris clair) : F'°, Points noirs : harmoniques principaux, Points rouges (gris clair) : harmoniques secondaires

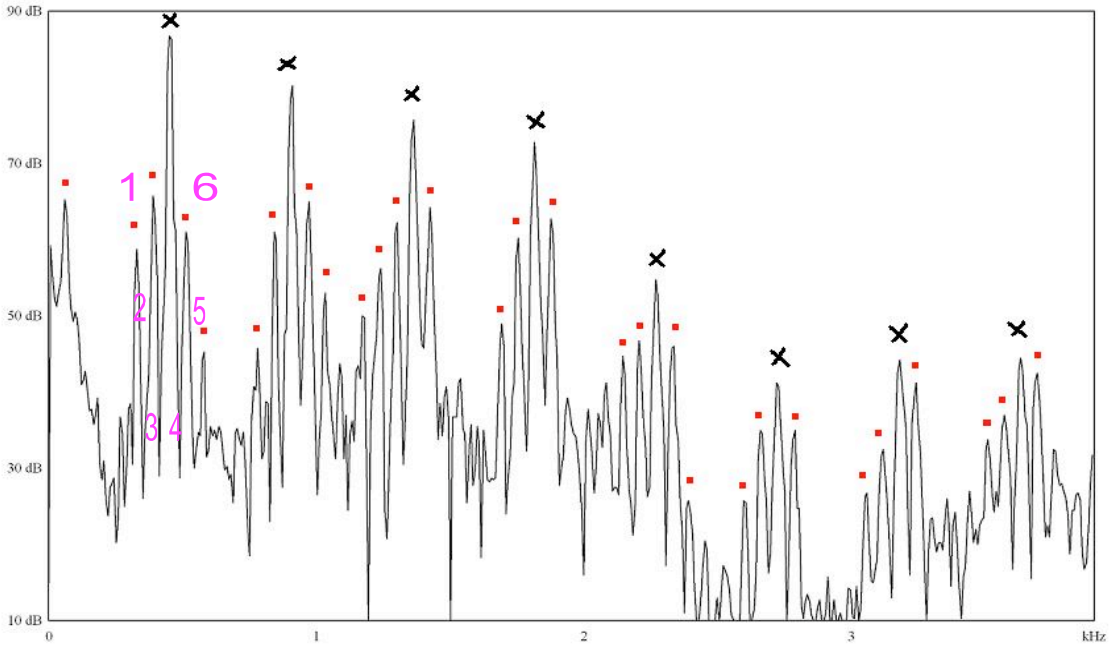


Figure 5 : Spectre du la#3 de la figure x à t= 1 sec.

Croix noires : harmoniques principaux - Carrés rouges (gris clair) : harmoniques secondaires

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

3. PHENOMENES D'INSTABILITE 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).

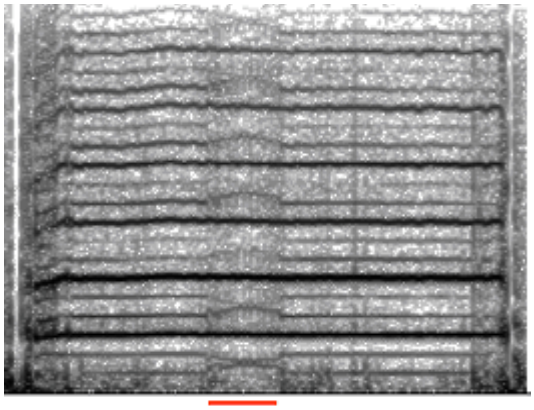


Figure 6 : Pincement des harmoniques secondaires (spectrogramme de glottogramme)

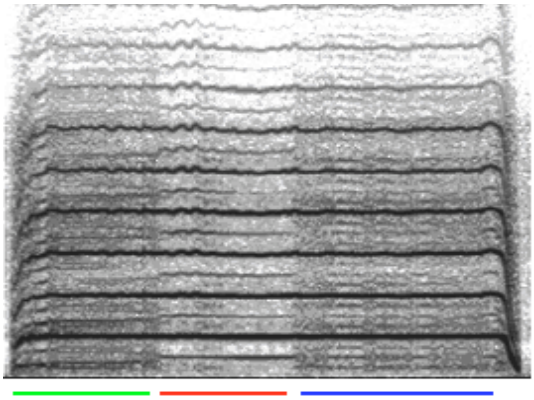


Figure 7 : Variation du nombre d'harmoniques secondaires (spectrogramme de glottogramme) en vert (gris très clair) : 2 harmoniques secondaires - en rouge (gris clair) : 1 harmonique secondaire - en bleu (gris foncé) : 3 harmoniques secondaires

III. CINEMATOGRAPHIE ULTRA RAPIDE ET KYMOGRAPHIE

Chez la plupart des chanteurs nous avons pu observer à la lecture des vidéos en CUR d'une part une vibration des cordes vocales couplée à une vibration supra glottique de période plus longue mais en rapport harmonique avec la fréquence des cordes. Ce phénomène est bien connu et a été décrit sous le nom de "period doubling ou tripling". Le son perçu est à l'octave inférieure lorsque les bandes vibrent deux fois moins vite, (Figure 8) et à la quinte inférieure lorsque les bandes vibrent trois fois moins vite que les cordes vocales (Figure 9).

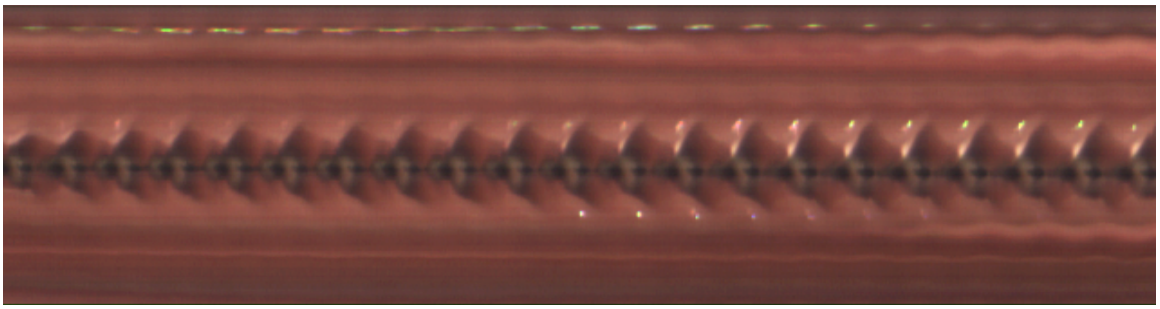


Figure 8 : Kymogramme, period doubling

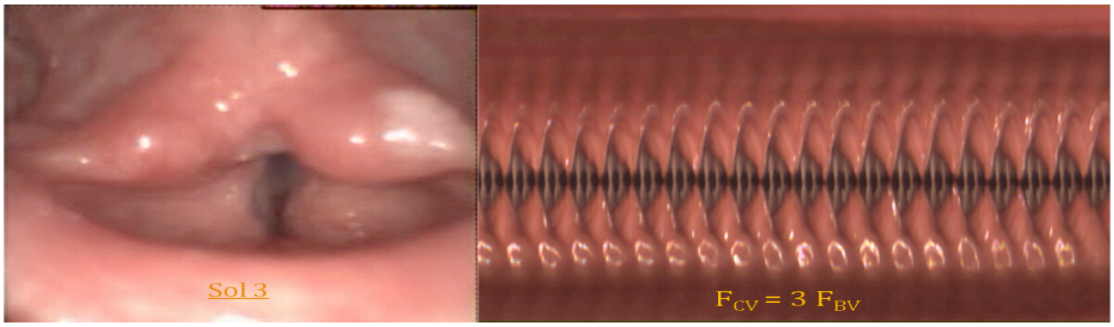


Figure 9 : CUR et Kymogramme, period tripling

La fermeture des bandes ventriculaires prédomine à l'avant, elle peut parfois à peine osciller dans les cas ou la contraction supra glottique est très prononcée. Plus les sujets montent dans l'aigu plus ce phénomène s'accentue comme chez ce sujet masculin qui est capable de faire vibrer ses cordes vocales cinq fois plus vite que ses bandes ventriculaires (Figure 10).

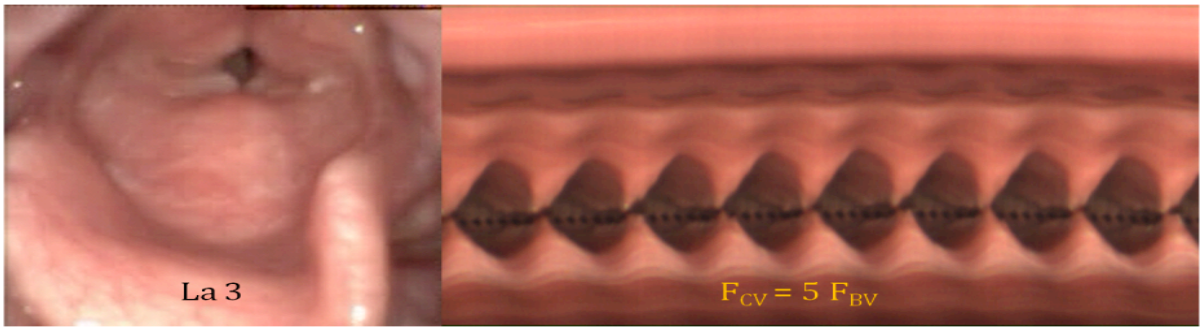


Figure 10 :CUR et Kymogramme, period quintupling

Là encore la kymographie permet de bien différencier les deux phénomènes et précise que la fermeture supraglottique prédomine à l'avant de la supraglotte. Chez d'autres sujets le caractère apériodique est plus présent tant sur les cordes que sur les bandes ventriculaires ; cet aspect est bien corrélé avec les courbes de glottographie. Dans certains cas nous avons trouvé des oscillations transmises à l'épiglotte et aux ligaments ary-épiglottiques, donnant l'aspect que nous avons appelé la "danse des corniculés". Enfin, parfois la contraction supraglottique est telle qu'on ne peut voir les cordes vocales ; seules les bandes oscillent à la manière des bulles précédemment décrites dans le fry.

DISCUSSION

Svec et coll. (1996) 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 n'est pas le cas du phénomène observé dans notre étude, néanmoins ils décrivent bien un phénomène de "detuning" avec passage à la quinte.
D'autres auteurs Jianget coll. (2003), Neubauer et coll. (2001) 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 vibrateur. Ce système est composé : d'un vibrateur principal (les cordes vocales) qui assure le régime principal de vibration et donne la fréquence fondamentale du son, et d'un vibrateur secondaire (les bandes ventriculaires). Le vibrateur secondaire produit un deuxième son avec sa fréquence propre. Superposé au son du vibrateur principal, le son du vibrateur secondaire donne au timbre un aspect granuleux, bruité, rauque. Ce son est perçu à l'octave inférieure lorsque les bandes vibrent deux fois moins vite, et à la quinte inférieure lorsque les bandes vibrent trois 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 vibrateur chez nos trois chanteurs. Bailly et coll (2007) décrit le vibrateur laryngé comme un système à dynamique non linéaire avec naissance de bifurcations et de phases de *period doubling* pouvant aller jusqu'au chaos si le phénomène est poussé à l'extrême. Il existe manifestement une interaction de la fermeture des bandes ventriculaires sur la fermeture glottique. En effet, deux périodes consécutives n'ont pas la même durée alors que leur somme donne bien la valeur de deux périodes. La période avant chaque fermeture des bandes est toujours plus longue. L'analyse kymographique ainsi que l'analyse de la dérivée de l'EGG permettent de constater que la fermeture des bandes suit celle des cordes et que celles-ci restent ouvertes pendant une bonne part de la phase fermée des bandes ventriculaires. Enfin la vitesse de fermeture des cordes est diminuée.

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 de 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.
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 vibrateur principal et secondaire. Selon Bailly et coll. (2006), Bailly et col. (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.
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 fausse de ce point de vue. Le timbre obtenu ne résulte pas d'un régime de distorsion du vibrateur, mais de l'utilisation d'un système à double vibrateur. 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.

CONCLUSION

La voix dite saturée est produite par une source vibrante mettant en jeu plusieurs "co-vibrateurs". Pour les sons graves et médium, il s'agit d'un mécanisme supralaryngé dans lequel les bandes ventriculaires vibrent à l'octave ou à la quinte inférieure par rapport à la fréquence des cordes vocales. Dans l'aigu, d'autres structures peuvent aussi participer à la vibration, en particulier l'épiglotte et les aryténoïdes. Ce mécanisme est tout à fait similaire à celui décrit dans d'autres techniques vocales sous le terme de *period doubling*. 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 vibrateur autorise plus facilement ce type de performances, que le système traditionnel à vibrateur 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 comme à tous chanteurs d'avoir une action de contrôle, elles participent donc à la création d'une technique vocale dont le but est de préserver la voix du chanteur tout en lui apportant efficacité et sécurité.

Gérard Chevaillier
gerard.chevaillier@lrb.aphp.fr

Cet article a été publié dans *Le Journal de l'AFPC-EVTA-France* N° 18 (2011) p. 37-44