

6 - PERCEPTION DE LA HAUTEUR- ETUDE PAR ANALYSE/ SYNTHESE DE PROBLEMES SINGULIERS.

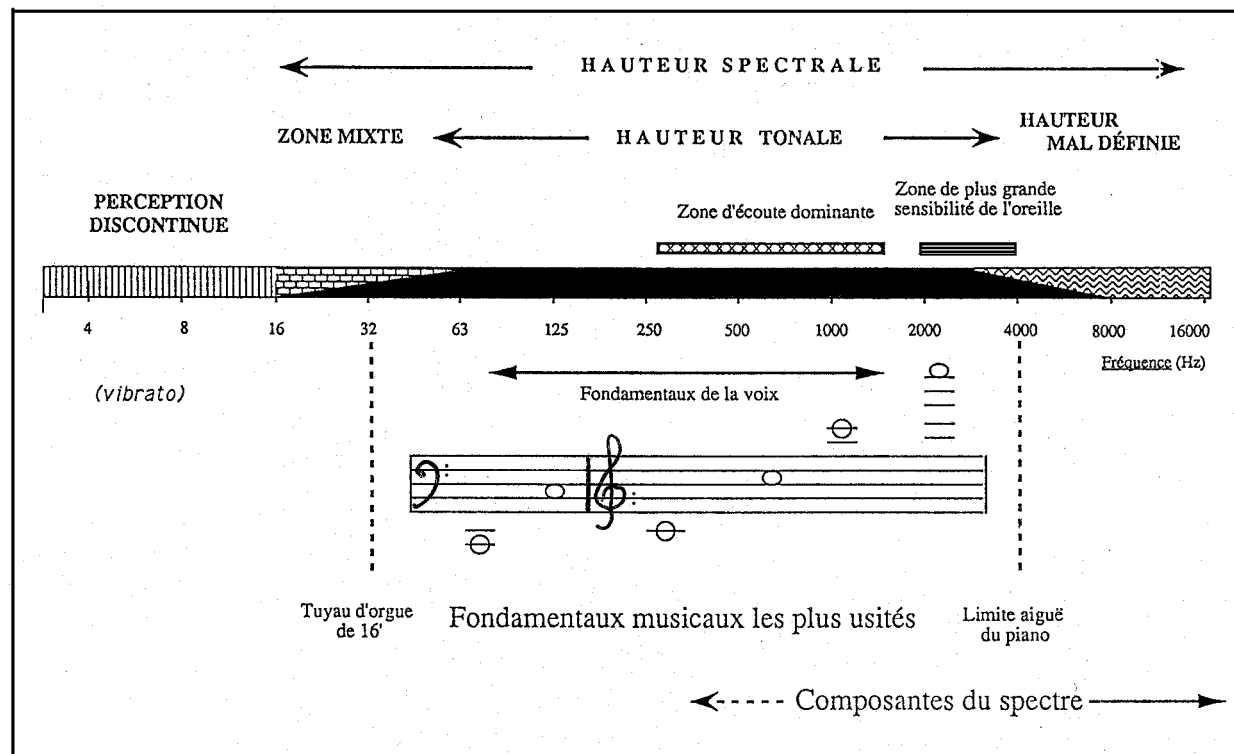


Figure 6.1 - Particularités de la perception de la hauteur sonore selon la tessiture.

1. Introduction

La hauteur sonore a eu pendant plusieurs siècles un statut privilégié dans la musique occidentale. Le développement des instruments de musique "à sons déterminés" et l'accent mis sur l'apprentissage des hauteurs dans l'éducation musicale de même que la valorisation de "l'oreille absolue" en témoignent. Parmi les propositions des jeunes compositeurs des années 70, l'emploi de nouveaux modes de jeu, et en particulier des sons multiphoniques, s'est heurté à quelques difficultés de description et de notation. En effet, un son "multiphonique" ne donne plus la sensation d'une hauteur unique, mais d'un accord plus ou moins complexe. Mais, ce qui est plus compliqué, les différents auditeurs ne sont pas d'accord sur les sons perçus ni sur leur place dans l'échelle des fréquences. Les musiciens se débattaient donc pour établir un catalogue des doigtés de ces sons et de leur notation. J'avais déjà eu l'occasion d'étudier avec P.Y Artaud et G. Geay les sons multiphoniques de la flûte traversière. Lorsque la question a été posée à l'IRCAM en 1977 par V. Globokar et D. Wessel, j'ai pu bénéficier d'un contrat de recherche, et surtout des nouvelles possibilités de l'informatique musicale pour l'analyse et la synthèse des sons.

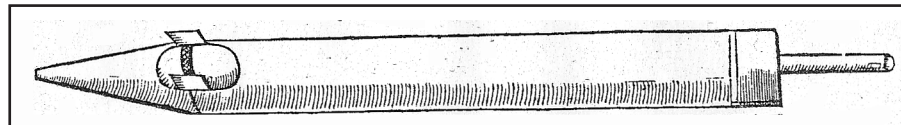
2. Sons multiphoniques des instruments à vent

Les sons multiphoniques, déjà qualifiés de "scandale acoustique" par Bouasse²⁴ en 1929, se produisent lorsque le tuyau entretient simultanément plusieurs modes vibratoires non harmoniques. Ce sont des "accidents" que l'on évite habituellement dans la facture et dans le jeu des instruments, mais que l'on rencontre dans le jeu d'instruments d'autres cultures.

Son 45

Emission sonore multiphonique d'un tuyau d'orgue à cheminée - MC; Lam; 1972

Figure 6.2 - Tuyau d'orgue à cheminée (Praetorius, 1618)



Les expériences systématiques de raccourcissement de la cheminée réalisées dans la thèse (§3.44 à 3.55), cf Ex **Son 45** sur les tuyaux d'orgue à cheminée, m'avaient permis de confirmer l'analyse de Bouasse, de même pour les sons des "doigtés de fourche" de la flûte à bec. En effet, les modes propres du tuyau, très inharmoniques pour ces doigtés

24. Tuyaux et résonateurs; Delagrave Paris, 1929, §167

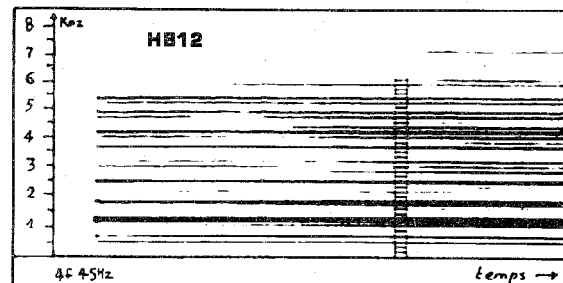
particuliers, sont présents dans le transitoire d'attaque (thèse §3.30). On les retrouve lors de la stabilisation en émission multiphonique.

Bul: 16. - Sons nouveaux sur les flûtes : le problème des sons multiples, Bulletin GAM 74 - Paris , Juin 1974.

2.1. Inventaire, analyse, proposition d'une notation des sons multiphoniques.

N° de la composante	Amplitude	Fréquence (Hz)	Note musicale	N° de la composante	Amplitude	Fréquence (Hz)
1	---	----	FA ₂ -11)	26	0,12	4419
2	---	----		27	0,41	4584
3	0,38	510,4	DO ₄ -11	28	0,56	4754
4	0,51	678,3	FA ₄ -11	29	----	4932
5	----	840,5	LA ₄ -15	30	0,36	5092
6	0,49	1020		31	1,08	5264
7	6,64	1188	Mib ₅ -20/	32	0,27	5435
8	----	1346		33	0,17	5606
9	0,24	1528		34	0,44	5774
10	2,94	1698	LA ₅ -16/	35	----	5949
11	----	1869		36	----	6106
12	0,19	2030		37	----	6286
13	0,22	2203		38	----	6457
14	1,84	2377	Mib ₆ -20/	39	----	6616
15	----	2534		40	----	6789
16	0,32	2717				
17	0,54	2887				
18	0,42	3056				
19	0,19	3224				
20	----	3398				
21	0,60	3563				
22	0,10	3737				
23	0,30	3903				
24	1,64	4075	DO ₇ -11/			
25	0,40	4244				

Analyse FFT des composantes de HB 12



Sonogramme du son multiphonique HB12



Notation en dictée musicale (divers musiciens)

Son 46

Son multiphonique de hautbois, Hb12, et son analyse spectrale. MC, Ir-cam; 1980. Voir figure Figure 6.3 dans le texte.

Figure 6.3 Etude du son multiphonique HB12. analyse FFT; spectrogramme; notation musicale . *Ex Son 46*

Le travail effectué à l'IRCAM a comporté plusieurs aspects :

Description acoustique des sons multiphoniques proposés par plusieurs instrumentistes. Excepté la flûte, l'usage de cette technique de jeu était encore peu répandue en 1977 et donc mal maîtrisée par les instrumentistes. Il s'agissait d'une phase exploratoire au cours de laquelle nous avons enregistré des sons de flûte, clarinette, hautbois, clarinette basse. Le trombone, longuement étudié avec V. Globokar se présentait comme un cas particulier, repris ultérieurement avec B. Sluchin. L'analyse est faite au sonographe, complétée par les résultats numériques du Phase Vocoder (FFT glissante) calculés sur un PDP 10²⁵ (Digit. Equ. Corp.). Nous utiliserons également l'Analyse Spectrale Différentielle (ASD) développée par Péro. (C.36)

Cg: 41. - CASTELLENGO M., CHAINTREUL S., (1983) Analyses comparées de divers sons multiphoniques instrumentaux, C.R. du 11ème I.C.A., Paris.

Étude perceptive - "Dictées" musicales de sons et synthèses de sons modifiés par la technique du Phase Vocoder²⁶. Les expériences ont montré l'importance perceptive de la "zone de fréquence des fondamentaux musicaux", comprise entre 100 et environ 1200 Hz. La plupart des composantes aiguës, même d'intensité notable à l'analyse, n'étaient pas prise en compte comme sons de l'accord noté. L'étude de la perception des instabilités temporelles a été initiée grâce à la prise en main du nouveau programme de synthèse additive de Max Matthews (Music10)

Ct: 9. - CASTELLENGO M.,; Les sons multiphoniques aux instruments à vent, Rapport IRCAM/DGRST - Paris , Déc.1980.

25. Système de 192 ko de mémoire centrale et mémoire disques magnétiques de 30 Mo.

26. L'opération était lourde. Une analyse synthèse d'un son de 2 secondes immobilisait la machine pour environ 1h de calcul...quand tout se passait bien. L'ordinateur ne travaillant pas encore en multi-tache, il fallait attendre patiemment le moment propice pour lancer une analyse-synthèse.

Nous avons proposé de classer les sons multiphoniques selon quatre catégories perceptives.

- 1/ Les sons multiphoniques dits "harmoniques".
- 2/ Les sons stables admettant un fondamental de synchronisation dont la fréquence est le PGCD des composantes principales;
- 3/ Les sons dits de «roulement simples» (en rapport d'octave ou de quinte);
- 4/ Les «roulements complexes», instables.

Sur le trombone, le phénomène multiphonique découvert par V. Globokar, s'apparente à un roulement de très basse fréquence. Contrairement aux autres instruments, le résultat est très systématique et ne dépend que du rang du partiel émis. Il n'a toutefois pas reçu d'explication physique à ce jour. L'étude du trombone a été poursuivie avec B. Sluchin, et a permis de mettre en évidence deux autres productions multiphoniques (voir bitonalité vocale et instrumentale).

Cg: 40. - CASTELLENGO M., SLUCHIN B., CAUSSE R., (1983) Etude acoustique de l'émission multiphonique aux cuivres, C.R. 11ème I.C.A. , Paris.

La notation des sons multiphoniques stables, proposée dans la grille du PGCD²⁷, permet d'affecter aux composantes du spectre des numéros d'harmoniques de ce PGCD. Cette notation respecte la valeur réelle des intervalles entre composantes, non tempérée, qui troublait tant l'oreille des musiciens. L'idée a retenu l'attention de Gérard Grisey qui a composé une pièce sur ce principe (*Solo pour deux* pour clarinette et trombone - Création Mondiale à la Biennale de Venise, 1982) ainsi que celle de Claudy Malherbe et Gérard Assayag avec qui s'est engagée une recherche.

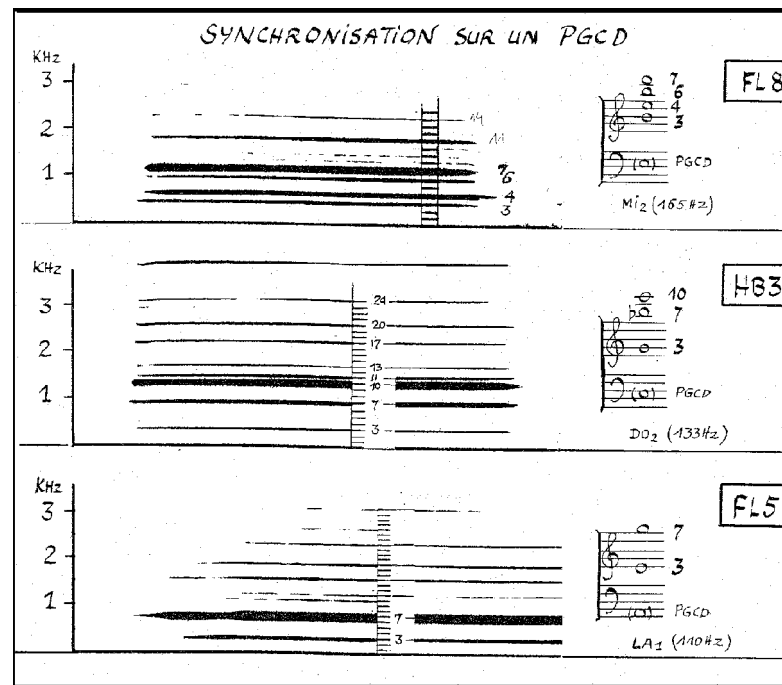


Figure 6.4 - Analyse spectrale de trois sons multiphoniques : flûte, hautbois, flûte, et notation sous forme de composantes d'un PGCD (hauteur fondamentale de synchronisation). *Ex Son 47*

Son 47

Trois sons multiphoniques : flûte traversière, FL8; Hautbois Hb3; Flûte traversière FL5. Voir figure Figure 6.4. MC, Ircam 1980

27. PGCD pour Plus Grand Commun Diviseur des fréquences des composantes du spectre.

2.2. Simulation sonore par synthèse des composantes principales.

Groupe de travail : C. Malherbe; G. Assayag

Le travail avec un compositeur pose d'emblée d'autres exigences. L'analyse à l'oreille est nécessaire mais imprécise; l'analyse acoustique fournit un ensemble exhaustif de données, difficilement manipulables par le compositeur. Il faut donc trouver un compromis permettant de réduire cet ensemble aux éléments nécessaires et suffisants à une exploitation musicale. Tout au long du travail que nous avons entrepris s'est établie une interaction permanente entre les données de la perception et celles de l'analyse acoustique; l'oreille s'affinait à cette comparaison. L'étude a été limitée aux "bois" de l'orchestre.

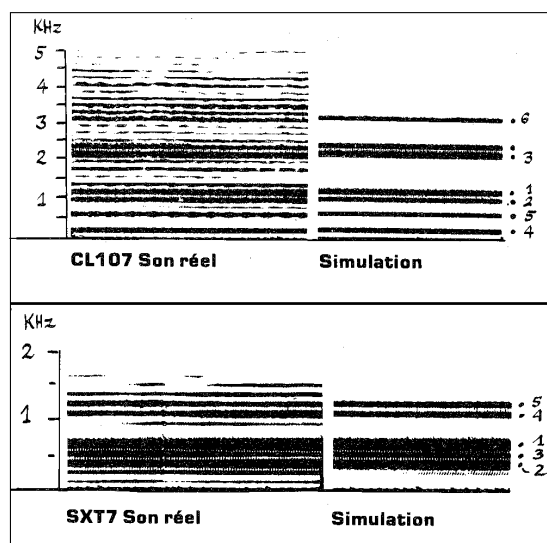


Figure 6.6 - Extraction des composantes essentielles pour la perception de sons multiphoniques, par analyse spectrale et simulation sonore. Ex *Son 48 et 49*.

Son 48

Son multiphonique de clarinette : C1107, suivi d'une synthèse additive des composantes principales.

Son 49

Même séquence pour un son de saxophone, Sx7. MC, C. Malherbe et G.

Un catalogue complet des sons multiphoniques a été réalisé avec 2 flûtistes, 2 hautboïstes, 2 bassonistes, 2 clarinettes (sib et basse) et 1 saxophoniste. Les sons, transférés sur ordinateur ont été analysés systématiquement par FFT, et les composantes classées par ordre d'importance perceptive selon l'algorithme de Terhardt. Cette opération a réduit de façon considérable les opérations à traiter en nous autorisant à ne conserver, selon les sons, que 5 à 10 composantes significatives. Une synthèse de ces composantes permettait de valider les résultats, par comparaison auditive du son original et de la simulation.

La modélisation des sons multiphoniques en termes de numéros de composantes d'un spectre harmonique a permis d'utiliser un ensemble de programmes conçu comme outil de composition (construction d'échelles; cribles; algorithme du peigne, construction de graphes figurant les relations entre ces sons) afin de construire des espaces de transition musicalement cohérents entre multiphoniques. Avec ce formalisme Claudy Malherbe a écrit deux pièces : "Non sun" pour quintette à vent (créé en 1984 à l'Ircam) et "Color" pour 15 instruments (créé en 1986 à Darmstadt). Ce travail a donné lieu à plusieurs conférences présentées à l'IRCAM, au cours d'été de Darmstadt, ainsi qu'à deux communications écrites.

Cg: 37. - MALHERBE C., ASSAYAG G., CASTELLENGO M., (1985) Functional integration of complex instrumental sounds in musical writing, C.R. International Computer Music Conferences, Vancouver.

Au: 20. - MALHERBE C., ASSAYAG G., CASTELLENGO M., (1985), Nouvelles techniques instrumentales : composition et formalisation, Rapport de recherche IRCAM, Paris.

3. Justesse, accordage, oreille absolue, diapason.

Nous rassemblons sous ce titre plusieurs études relevant de la sensation de hauteur dans la pratique musicale.

Le diapason, question régulièrement soulevée par les musiciens fait l'objet de discussions et de conflits récurrents. Restitué dans son contexte historique le problème apparaît beaucoup plus complexe et ne peut être ramené au simple contrôle d'une fréquence de référence. **Le diapason.**

Au: 34. - LEIPP E., CASTELLENGO M., (1969), La normalisation du diapason, Revue d'Acoustique N°6 – Paris

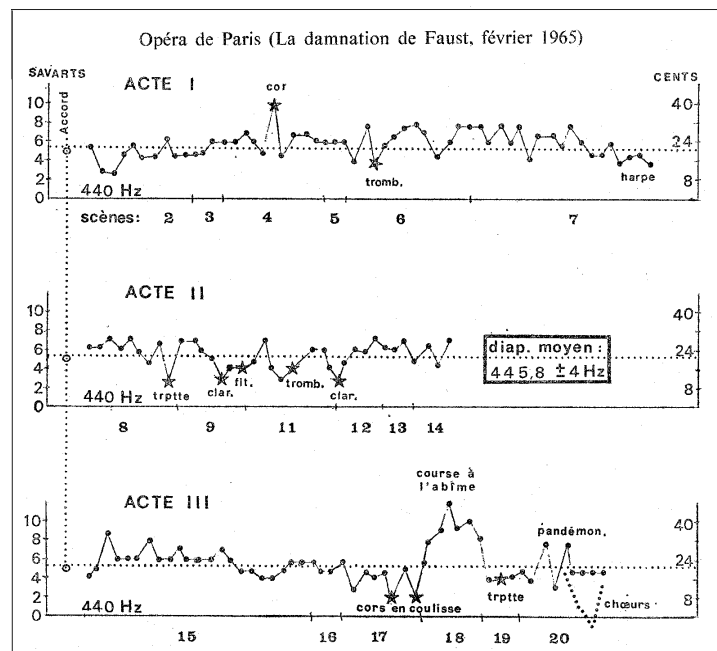


Figure 6.8 - Relevé de la mesure des fluctuations du diapason pendant l'interprétation d'une œuvre. Opéra de Paris, la Damnation de Faust de Berlioz.

Sollicités par le responsable des chœurs de l'Opéra de Paris puis par le Conseil de l'Europe qui devait procéder à une "énième" normalisation du diapason, nous avons effectué des enregistrements d'exécutions musicales "in vivo", pendant une représentation musicale. La fréquence moyenne d'accord d'un orchestre fluctue selon la température ambiante, mais aussi en fonction de la "tension" dramatique de l'œuvre. Comme pour le justesse des instruments de musique il y a lieu de considérer les marges de fluctuation de cette fréquence.

Au: 31. - LEIPP E., CASTELLENGO M., (1977), Du diapason et de sa relativité la Revue Musicale, N° 294, Paris.

Mettant à profit le fait d'avoir l'oreille "absolue", j'ai effectué des centaines de mesures au cours d'enregistrements, en prenant pour règle de mesurer la tonique et la dominante de la tonalité, et non simplement le "la" dont la fréquence peut varier en fonction de sa position dans l'échelle tonale. Un diapason électronique variable en température a été réalisé pour l'Opéra de Paris.

Au: 33. - LEIPP E., CASTELLENGO M., AGOSTINI L., (1971), Un diapason électronique nouveau à l'opéra de Paris, Revue d'Acoustique N°16 – Paris.

Justesse et accordage.

De nombreux ouvrages paraissent sur l'accordage des instruments à sons fixes, en réduisant le problème au seul calcul des fréquences des notes de la gamme. Initiée dans la pratique de l'accord du clavecin par P.Y. Asselin qui a préparé une thèse au laboratoire en travaillant avec le Cantor²⁸, j'ai réalisé un grand nombre d'exemples sonores dans divers tempéraments, qui ont été utilisés dans le cadre du cours d'acoustique musicale. En 1984, la découverte d'un «*Poikilorgue*», instrument à anches libres du XIX^{ème} siècle construit par A. Cavaillé-Coll, et resté dans son accord d'origine, a montré que le tempérament mésotonique était encore en usage à cette époque.

Au: 22. - CASTELLENGO M., (1984), Un témoin insoupçonné du tempérament chez Cavaillé-Coll, La flûte harmonique, 30, Paris.

Par ailleurs, la distorsion de sensation d'intervalle qui se manifeste à partir de 1000Hz et qui explique l'agrandissement des octaves dans l'aigu des instruments de musique a pu être explorée au cours d'expériences systématiques faites avec des musiciens. (Bu.17).

Bul: 17. - Un problème de perception des hauteurs : la justesse des octaves mélodiques, Bulletin GAM 76 - Paris 1974

Oreille absolue

Plusieurs des expériences portant sur la sensation de hauteur, dont celles qui concernent le vibrato, ont été présentées au colloque de Marseille. A cette occasion s'est confirmée l'idée que la sensation de hauteur des sons se construit à partir de repères propres à chaque catégorie de sons. Nous apprenons à reconnaître la hauteur sonore du son d'un instrument donné : le piano, la flûte, le violon. Le comportement curieux d'une possible adaptation de l'oreille absolue à un diapason différent, exclusivement pour des timbres particuliers (clavecin, flûte à une clé) semble bien montrer que la «hauteur» mémorisée par les musiciens qui ont l'oreille absolue, s'ancre dans la matière sonore du timbre et ne peut-être réduite à la seule expression numérique d'une fréquence fondamentale!

Au: 13. - CASTELLENGO M., (1991) Quelques aspects de la perception de la hauteur et du timbre dans un contexte musical, Genèse et perception des sons, Actes du Cinquantenaire du L.M.A.,

28. le Cantor, orgue électronique construit au Laboratoire de St Cyr l'Ecole sur la demande d'Emile Leipp comportait 64 générateurs de fréquence réglables de façon indépendante. Il permettait la pratique de toutes sortes d'accordages, et, muni de trois claviers, offrait la possibilité de jouer des musiques dans un tempérament donné et avec trois sonorités différentes.

4. Perception de la hauteur des cloches.

Les cloches produisent des partiels fortement inharmoniques, dont la répartition spectrale, conditionnée par la forme géométrique du corps (profils externe et interne) s'approche au mieux d'un "accord" musical donnant la sensation d'une note fondamentale dominante.

L'attention que j'ai portée à l'étude des cloches provient à la fois de la demande des professionnels (fonderies Paccard, Cazaré et Bergamo, Guilde des carillonneurs) et de l'intérêt suscité par les questions de perception de la hauteur qu'elles posent.

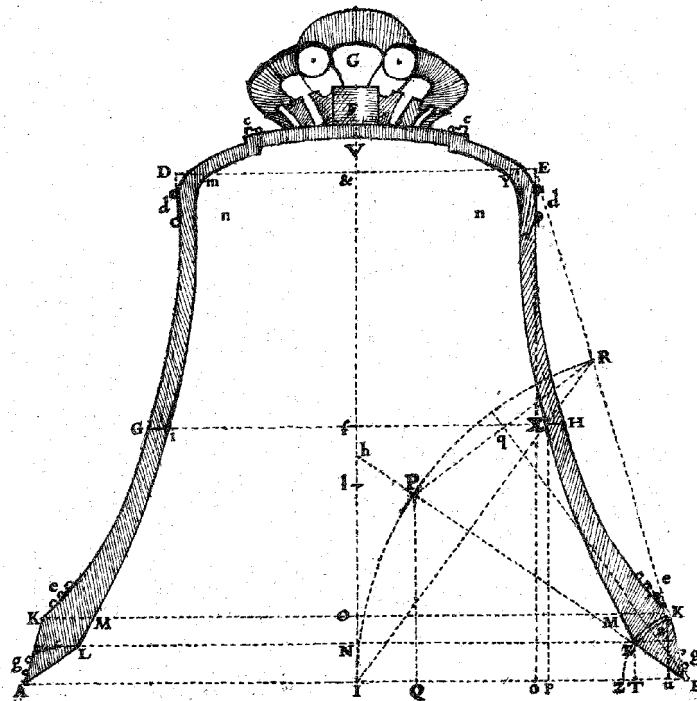


Figure 6.9 - Tracé du profil d'une cloche d'église. (Mersenne, 1636)

Le travail a démarré en 1971 à la faveur de la première mission Malraux (Inventaire général des monuments et richesses artistiques de la France; canton de Lyons-La-Forêt) qui nous a permis de constituer une base de données de 11 cloches. Il a été repris pour être présenté au Congrès de Campanologie de Châlons/Marne en 1989.

La simulation d'une cloche réelle par synthèse additive (programme écrit par B. Fabre) a permis de confirmer les observations suivantes :

- le rôle prépondérant du partiel 5 dans la justesse de la "note au coup".
- la participation des partiels supérieurs (8 à 12) dans la perception d'une deuxième note au coup des grosses cloches, à la quarte supérieure de la première. Ex *Son 50, 51, et 52.*
- le rôle des partiels du groupe I dans la perception du fondamental de 3^{ce} mineure dont la production est tout à fait spécifique des cloches de Normandie. Ce son est produit par un deuxième marteau roulant externe, excitant la cloche vers le milieu du profil, de sorte que les partiels du groupe I sont considérablement atténués

Son 50

Hauteur d'une cloche : la deuxième note au coup : la quarte. Cloche de Hochfelden (Alsace); Mission 1981.

Son 51

Synthèse additive du son de la cloche, sans les partiels de la «quarte» (2 fois)

Son 52

Synthèse additive du son de la cloche, avec les partiels de la «quarte» (2 fois) MC; lam 1992.

alors que ceux du groupe III sont sollicités. Une seule cloche produit donc deux fondamentaux successifs (sonnerie du glas). L'alternance ainsi produite trouve explication dans le cadre de la théorie cognitive des flux. Un phénomène similaire a été récemment signalé lors de la redécouverte des cloches chinoises anciennes, de forme ovale, qui possèdent deux points de frappe donnant chacun un fondamental différent.

Au: 9. - CASTELLENGO M., La perception de la hauteur des cloches. (1992). 1ères journées nationales de campanologie organisées par le Ministère de la Culture, pp. 97-104, Châlons sur Marne.

Cg: 55. - LEIPP E., CASTELLENGO M., (1965); L'acoustique des cloches, Comptes rendus du 5ème ICA, Liège.

Bul: 4. - Les cloches, Bulletin GAM 18, Paris 1966.

5. Le vibrato vocal et le trille 1987-1994

Groupe de travail G. Richard; Ch. d'Alessandro; D. Colas;

5.1. Introduction

Ce thème de recherche, issu de la voix chantée, s'est rapidement constitué en thème de recherche sur la perception de la hauteur. Son développement a bénéficié du nouvel outil de synthèse vocale développé par X. Rodet et porté sur ordinateur individuel (le premier IBM/PC du labo + TMS 320 20) par F. Dechelle et Ch. D'Alessandro.

Le vibrato de fréquence, présent dans la quasi totalité des productions musicales occidentales, pose d'intéressants problèmes de perception de hauteur. La plupart des études psychoacoustiques existantes ne portaient que sur des sons modulés de façon stable (vibrato régulier, durée 2 à 3 secondes) alors que l'analyse de la pratique instrumentale et vocale fait apparaître des événements transitoires brefs pour lesquels l'appréciation de justesse est très précise de la part des musiciens. C'est le cas des sons vibrés de transition entre deux notes enchaînées en legato, ou encore des "notes" piquées vibrées, extrêmement courtes, des chanteuses colorature. Par ailleurs le trille vocal qui est un vibrato de très grande excursion en fréquence, n'avait encore fait l'objet d'aucune recherche approfondie.

Pour cette recherche des tests systématiques ont été réalisés à l'aide de sons vocaux synthétiques d'excellente qualité. Une pré-étude du vibrato de sons stables de synthèse (C. Marin 1982) avait déjà montré qu'à l'écoute, les auditeurs n'étaient pas seulement sensibles à des variations de hauteur, mais décrivaient aussi des changements de timbre et d'intensité. Nous avons donc été convaincue de la nécessité de travailler avec des sons vocaux synthétiques d'excellente qualité.

5.2. Etude des transitions vibrées en chant legato par synthèse vocale.

Le vibrato d'un chanteur est principalement une modulation de fréquence dont la "rapidité" est comprise entre 5 et 8 oscillations par seconde. L'excursion en fréquence, $\Delta f/f_m$, varie selon les interprètes, et selon le contexte musical. Sa valeur est comprise entre 3 et 6% de la fréquence moyenne f_m , c'est à dire entre le demi-ton et le ton tempéré. Les problèmes liés aux transitions entre sons successifs liés, avaient déjà été explorés par C. Seashore en 1938.

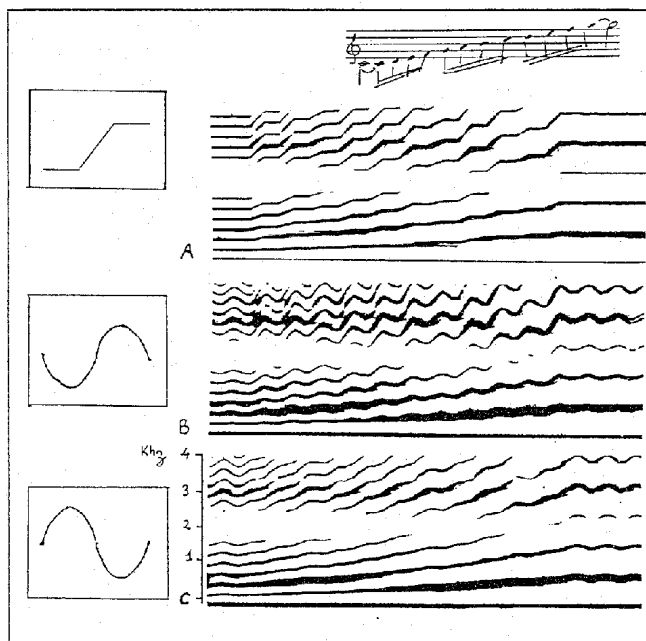


Figure 6.10 - Gammes diatoniques synthétiques. A - transition en phase avec le vibrato; B - Transition sans vibrato; C - Transition en opposition de phase avec le vibrato.

Nous avons étudié systématiquement la manière dont se faisait la transition d'une note à l'autre et dans quelle mesure le chanteur pouvait modifier la rapidité de son vibrato pour l'adapter à des changements de tempo. L'étude s'est déroulée avec la participation de M.A. Faure, médecin-spécialiste en phoniatrie, ainsi qu'avec ses élèves chanteurs.

Si la transition d'une note à la note supérieure peut se faire à divers moments de la phase du vibrato, les analyses des chanteurs et les tests ont montré que le début de la transition ascendante devait être synchronisée avec la phase descendante du vibrato.

Les résultats, obtenus par G.Richard dans le cadre de son mémoire d'informatique (1988) ont été présentés aux congrès d'audiophonologie de Besançon et à l'ICA de Belgrade.

Cg: 36. - CASTELLENGO M., D'ALESSANDRO C., RICHARD G., (1989) Study of vocal pitch vibrato perception using synthesis, C.R. du 13ème Congrès international d'Acoustique, Belgrade.

Au: 14. - CASTELLENGO M., D'ALESSANDRO C., (1991). Etude par la synthèse de la perception du vibrato vocal dans les transitions de notes, Bulletin d'Audiophonologie, VII N.S., p.551-564

5.3. Perception des notes courtes vibrées : tests psychoacoustiques d'ajustement.

Son 53

Chant; Notes courtes vibrées : air de la Reine de la nuit (Mozart).

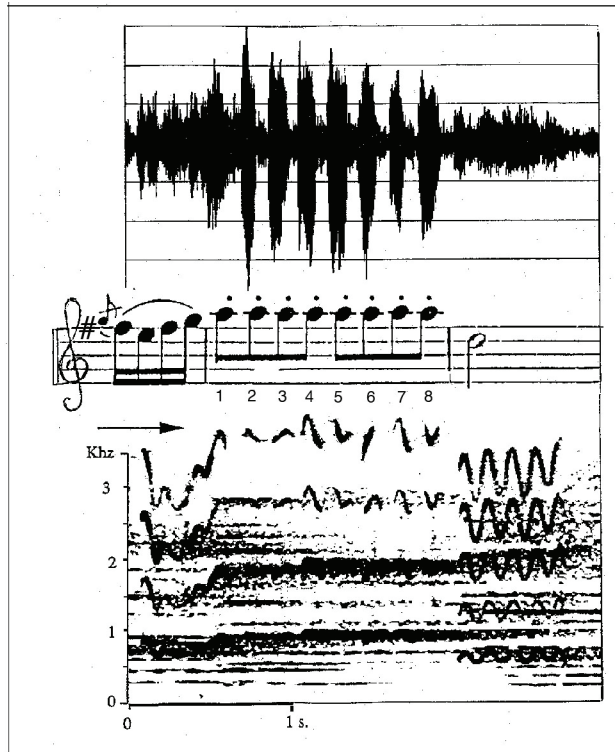


Figure 6.11 - Analyse de la séquence chantée en notes «piquées». Air de la Reine de la nuit de la Flûte enchantée (Mozart)/ En haut : amplitude; en bas, sonagramme. La ligne mélodique de l'harmonique 4, dégagée de la réverbération, montre les formes variées des «la» chantés en notes piquées (numéros 1 à 8). Ex (son 53). L'étude de ces portions de vibrato a fait l'objet de tests d'écoute systématiques.

De nombreuses études avaient montré que la hauteur perçue d'un son vibré "stable" (durée 1s) est assimilable à celle de la fréquence moyenne, fm. Lors de passages de virtuosité, comme dans le célèbre air de la «Reine de la Nuit» de la Flûte enchantée de Mozart, les chanteurs produisent des notes piquées très courtes dont la durée est très inférieure à une seule période de vibrato (160 ms environ). Ex *Son 53*

Comment, dans ce cas, relier la hauteur perçue au signal acoustique ? Cette recherche, déjà présentée à l'ICA de Belgrade en 1989, a fait l'objet d'une série de tests d'ajustement systématiques qui ont permis d'établir des relations entre la hauteur perçue et respectivement la durée, la phase terminale et la forme de la variations de fréquence (ascendante ou descendante). cf Ex sonore N°46.

L'auditeur doit apparier à l'oreille la hauteur perçue d'un son vibré, avec celle d'un son stable choisi parmi une collection de sons voisins différant entre eux par des intervalles inférieurs au seuil différentiel de hauteur. Dans une première expérience ($F_0 = 440$ Hz, $F_{vib} = 6$ Hz; larg.= 100 cents soit 1/2 ton), nous avons fait varier la durée des sons (de 0.5 à 2 cycles de vibrato), et la phase initiale du vibrato. Les résultats ont montré clairement l'importance de la forme de la phase terminale du vibrato sur la perception de la hauteur.

Plusieurs séries de tests ont ensuite été conduites en prenant pour paramètre la fréquence fondamentale (de 220 à 1500 Hz), la rapidité du vibrato (de 4 à 8 Hz) et son étendue en fréquence (de 50 à 200 cents). Nous avons ainsi pu établir des relations systématiques entre la hauteur perçue et les différents paramètres. Ex *Son 54*

Un modèle numérique simple prenant en compte la pondération temporelle mise en évidence par les résultats des tests a été proposé par Ch. d'Alessandro. Le travail, qui s'est déroulé sur 4 ans, a fait l'objet de présentations à divers congrès, au fur et à mesure du développement des expériences (123ème Meeting de l'ASA, Salt Lake City Mai 1992; SMAC 93, Stockholm); CoMeT93, Utrecht et de trois publications, dont la dernière dans le JASA.

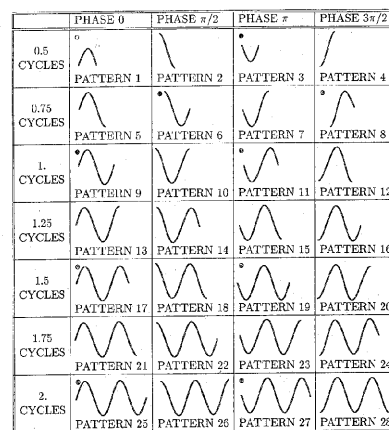
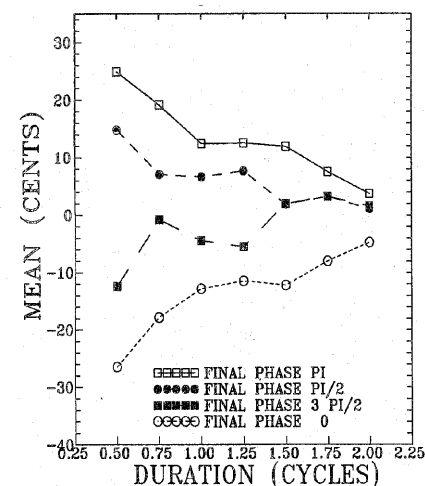


Figure 6.12 - Perception de notes courtes vibrées en fonction de la durée (gauche) et pour une durée donnée, en fonction de la phase finale du vibrato (droite)



Average settings for the main experiment. X axis: Pattern duration, in number of cycles. Y axis: Difference between the mean pitch perceived and center frequency. Patterns sharing the same final phase are connected by a line. center frequency: 440 Hz, vibrato extent: 100 cents, vibrato rate: 6 Hz.

Son 54

Perception de hauteur de notes courtes vibrées. Extrait du test d'ajustement (synthèse par FOF). Le son testé est suivi d'un son réglable à des hauteurs diverses. La dernière paire est ajustée. 1993; MC et C. d'Alessandro.

- Cg: 33. - CASTELLENGO M., D'ALESSANDRO C., (1991) Perception of vocal pitch vibrato in short tones, Résumé dans J. Acoust. Soc. Am. 89 (4 Pt. 2), p. 1987, Baltimore.
- Cg: 34. - CASTELLENGO M., D'ALESSANDRO C., (1991). Etude de la perception des notes courtes chantées en présence de vibrato, XIIIth International Congress of Phonetic Sciences, Aix en Provence.
- Cg: 31. - CASTELLENGO M., COLAS D., (1992). Making and hearing the vocal trill : An acoustical study. Résumé publié dans J. Acoust. Soc. Am. 91 (4, Pt. 2), p. 2434, Salt Lake City.
- Cg: 27. - d'ALESSANDRO Ch., CASTELLENGO M., (1993), Pitch of very short vocal tones: a parametric study, XIX^e International CoMeT Congress, Utrecht
- Cg: 28. - d'ALESSANDRO Ch., CASTELLENGO M., (1993), The pitch of short-duration vibrato tones: experimental data and numerical model, Stockholm Music Acoustics Conference, Stockholm pp. 25-30
- P3. - d'ALESSANDRO Ch., CASTELLENGO M., (1994), The pitch of short-duration vibrato tones ; J. Acous. Soc. Am., 95 (3), pp. 1617-1630.
- O 2. - d'ALESSANDRO C., CASTELLENGO M., (1995), Pitch of very short vocal tones : a parametric study, in Vibrato, édité par P.H. Dejonkere, Singular Publishing Group Inc., Sant Diego.

5.4. Perception du trille vocal

L'étude du trille vocal, amorcée dans le cadre d'un mémoire de la classe d'Acoustique Musicale du CNSMDP (D. Colas, 1989), illustre très bien l'intérêt, mais aussi les difficultés d'un travail portant sur un problème musical réel.

Contrairement au trille instrumental, constitué de l'alternance discontinue de deux "notes" de fréquences définies, l'analyse acoustique d'un trille vocal révèle que celui-ci n'est autre qu'une modulation de fréquence, analogue au vibrato, mais de plus grande excursion. Figure 6.13 et Ex *Son 55*.

Une modulation peut être caractérisée par deux paramètres : l'étendue ou excursion en fréquence de la modulation ($E = \Delta f/F_m$) et la rapidité de modulation.

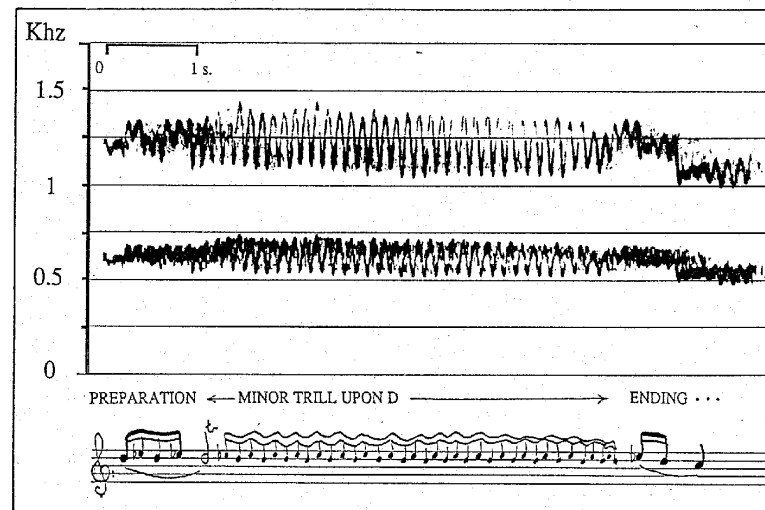


Figure 6.13 - tracé sonographique de la première partie d'un trille vocal chanté par Joan Sutherland, et notation musicale. Ex *Son 55*

Son 55

Bel exemple de trille vocal chanté par J. Sutherland (La somnambule, Bellini).

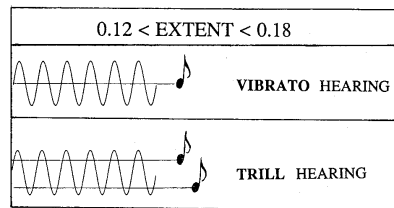


Figure 6.14 - Vibrato ou trille ?

Son 56

Vibrato et trille – Trois exemples successifs : 1) phrase de trois sons vibrés; 2) Début d'un trille; 3) trille complet. L'étendue $\Delta f/f_0$ de la 3ème note vibrée est la même que celle du trille. Synthèse vocale par FOF. MC; 1992

Le trille vocal nous place devant un curieux paradoxe perceptif : **pourquoi une modulation de fréquence donne-t-elle lieu, dans le cas du vibrato, à la sensation d'une hauteur unique assimilable à la fréquence moyenne, et, dans le cas du trille à celle de l'alternance de deux "notes" correspondant respectivement aux limites supérieure et inférieure de la variation de fréquence?** (fig. 6.14). Quelles sont les valeurs de la fréquence et de sa modulation qui font passer d'un type de perception à l'autre?

Un grand nombre de mesures ont été effectuées sur des enregistrements d'artistes de haut niveau. En ne considérant que l'étendue E , nous avons montré l'existence d'une zone critique ($0,12 < \Delta f/F_0 < 0,18$) pour laquelle le contexte musical, et en particulier les éléments de préparation et de terminaison du trille, jouent un rôle décisif dans la reconnaissance de l'ornement (trille plutôt que vibrato) ainsi que dans l'appréciation de l'intervalle musical (trille mineur au 1/2 ton ou majeur). Dans l'exemple sonore du *Son 56* on peut entendre la même modulation de fréquence interprétée comme un vibrato dans la 1ère présentation, et comme un trille dans la deuxième.

Pour une largeur de modulation supérieure à 0,18, la fusion ne s'opère plus et apparaît une "fission mélodique" donnant la sensation du trille, quel que soit le contexte. Les premiers résultats de cette recherche ont été présentés au 123ème congrès de l'ASA à Salt Lake City, au SMAC93 de Stockholm et au CoMeT à Utrecht.

Cg: 29. - CASTELLENGO M., (1993), The vocal trill, an auditive illusion, XIX° International CoMeT Congress, Utrecht.

Cg: 31. - CASTELLENGO M., COLAS D., (1992). Making and hearing the vocal trill : An acoustical study. Résumé publié dans J. Acoust. Soc. Am. 91 (4, Pt. 2), p. 2434, Salt Lake City.

O2. - d'ALESSANDRO C., CASTELLENGO M., (1995), Pitch of very short vocal tones : a parametric study, in *Vibrato*, édité par P.H.Dejonkere, Singular Publishing Group Inc., Sant Diego.

Une série de tests paramétriques, analogues à ceux mis en oeuvre pour l'étude des notes courtes vibrées a été définie pour apporter des réponses aux questions suivantes :

- - Pour quelles valeurs de E (intervalle d'Excursion en fréquence) passe-t-on de la perception d'une note unique, moyenne des variations de fréquence, à celle de deux hauteurs successives alternées ?
- - Quel est le degré de précision perçu dans l'intervalle du trille ?
- - Quel rôle jouent les éléments du contexte musical tels que la préparation et la terminaison du trille ?

Le travail mené dans le cadre d'un mémoire de maîtrise de Musicologie (Verteneuil-1996) a permis une exploration très fructueuse. L'importance de la préparation a été confirmée. Par contre, l'hypothèse que nous avons formulée quand à la perception de l'intervalle s'est trouvée invalidée. **La difficulté de cette étude tient à son aspect plus "cognitif" que psychoacoustique. Le trille est un ornement vocal appris, codé dans un contexte musical donné.** La justesse de l'intervalle est fortement dépendante du contexte tonal ainsi que des réalisations de la préparation et de la terminaison. L'étude doit être reprise dans un cadre musicologique bien défini.

5.5. Bitonalité vocale et labiale.

Collaborations : B. Sluchin; R. Causse; V. Gibiat.

L'analogie entre les vibrations des lèvres d'un tromboniste et celles des cordes vocales a été soulignée par de nombreux chercheurs.

En collaboration avec B. Sluchin soliste à l'E.I.C., nous avons réalisé une embouchure de trombone transparente (de façon à permettre une prise de vue cinématographique) munie de deux électrodes raccordables à un électroglottographe. Le tracé obtenu rend compte des moments d'ouverture et de fermeture des lèvres pendant l'émission.

Ce dispositif a permis d'étudier un 2ème type de multiphonique qui s'est révélé très proche acoustiquement de ceux que l'on rencontre en phonation. Communication des résultats à l'ICA (83), au SMAC (83) et à la Société Française de Phoniatrie (83).

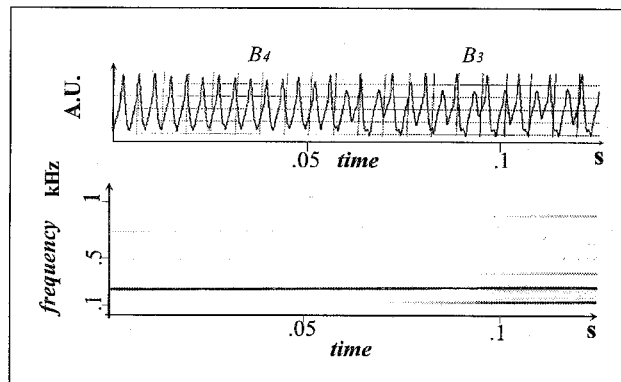
Dans le même temps nous avons mené à l'instigation d'une orthophoniste une recherche parallèle sur la bitonalité vocale. Il s'agit, comme pour la 2ème sorte de multiphonique au trombone d'une multiphonie de la source, laquelle fonctionne simultanément sur le fondamental et sur un sous-multiple F/2 ou F/3. Communication à la Société Française de Phoniatrie.

Son 57

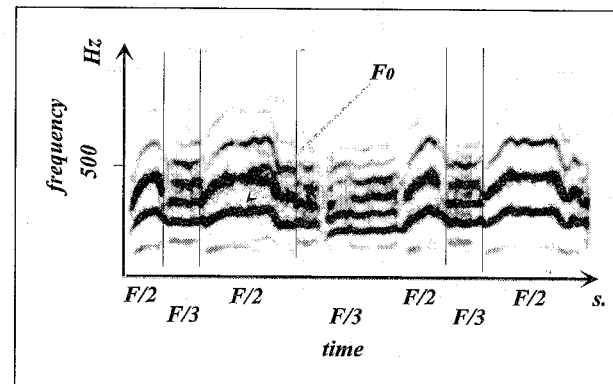
Doublement de Période.
Ex vocal, voix féminine
(voir figure). MC; Lam;
1985

Son 58

Doublement de Période.
Chanteuse Xhosa d'Afrique
du Sud, (voir figure).



Time domain and sonographic representation of a period doubling obtained on a voice signal recorded by electroglottography. The bifurcation is clearly visible on the two representations.



Various bifurcations in a recording of South African singers. The initial period is divided by two and even by three. The normal fundamental frequency is marked on the figure. Using period divisions the women can sing lower than 100 Hz.

Figure 6.15 - Bitonalité vocale. A gauche, analyse sonographique d'une émission vocale bitonale avec enregistrement électroglottographique. A droite, chant pratiqué par les femmes Xhosa d'Afrique du Sud. La bitonalité produit des doublements et des triplements de période (F/2 et F/3) Exemples sonores **57 et 58**.

Au: 21. - CASTELLENGO M., SLUCHIN B., CAUSSE R., GEOFFROY A., (1984), Bitonalité vocale et labiale, Bulletin d'audiophonologie, 17, N°5, Paris, p.510-520.

L'analyse de ces phénomènes, complétée par celle de productions vocales observées dans plusieurs cultures traditionnelles (Femmes Xhosa de l'Afrique du Sud et chant du Tibet) a été intégrée dans une étude des phénomènes non linéaires des systèmes excitateurs (doublement de période) développée par V.Gibiati. cf Exemples *Sons 57 et 58* .
 P1. - GIBIAT V., CASTELLENGO M., (2000),.Period doubling occurrences in wind instruments musical performance. Acta Acustica, 86, p.746-754

Il nous importait de montrer que ce type d'émission, généralement considéré comme "pathologique" dans notre culture, pouvait relever au contraire, de techniques intentionnellement pratiquées à des fins esthétiques.

6. La quintina des polyphonies Sardes : un fondamental virtuel formantique.

Bernard Lortat-Jacob, ethnomusicologue, a mené une étude approfondie d'un ensemble de chants polyphoniques sardes pratiqués dans le village de Castelsardo, qui présentent une curiosité acoustique restée énigmatique pendant plusieurs années. Lorsque les chanteurs, au nombre de quatre, sont en bon accord, une cinquième voix se fait entendre, plus aiguë. Nous avons pu montrer, en utilisant l'analyse synthèse du programme Audiosculpt de l'Ircam, que cette voix "féminine" clairement perceptible, dont la hauteur est notée en ronde sur la figure, disparaissait dès que l'on supprimait deux composantes du spectre, F1 et F2. Ex *Son 59*

L'explication perceptive du phénomène repose sur les faits suivants.

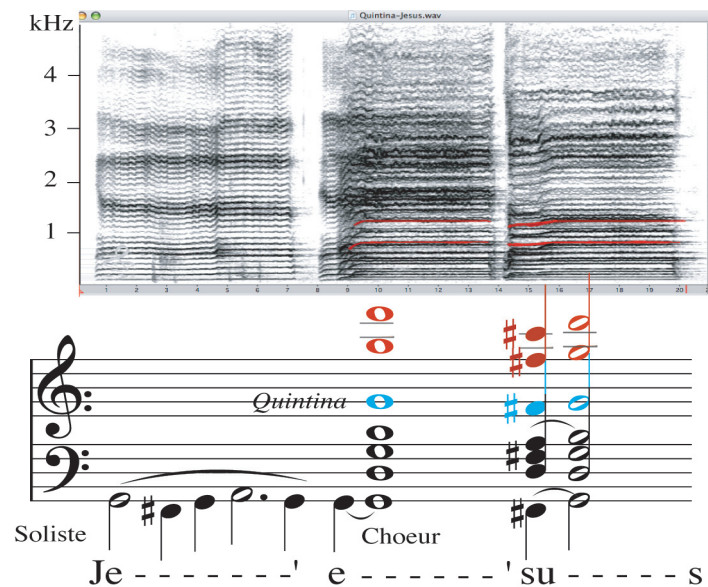


Figure 6.16 - Analyse d'un accord chanté faisant entendre la 5ème voix (quintina). De gauche à droite : sonagramme, spectre, notation musicale, harmoniques communs. Ex *Son 59*

Son 59

La quintina. 1) Un accord vocal extrait du chant Sarde (2 secondes); 2) même accord filtré; Enchaînement 2) et 1) en continu. Synthèse et filtrage avec Audiosculpt. MC; Lam 2000.

Les deux composantes responsables de la cinquième voix constituent les harmoniques 2 et 3 de cette voix. Il s'agit donc d'une hauteur fondamentale virtuelle ("virtual pitch" de Plomp).

La forte prégnance de ces deux composantes responsables de la hauteur perçue tient au fait qu'elles sont situées dans la zone dominante déjà signalée par Plomp (400-1500 Hz) et qu'elles ont une grande intensité. Nous avons montré que leur intensité résulte de l'ajustement soigneux des deux premiers formants vocaliques (principalement A et O ouvert), ajustement opéré par les chanteurs dans une pratique d'écoute extrêmement concentrée.

Le plus étonnant de cette recherche fut découvrir que, dans la complexité du spectre acoustique d'un chant polyphonique produisant plusieurs dizaines d'harmonique, 2 fréquences bien placées, suffisaient à produire une cinquième voix.

Cg: 1. - CASTELLENGO M., LORTAT-JACOB B., LEOTHAUD G., (2001); Pitch perception : five voices with four sardinian singers; ISMA, Perugia.

7. Conclusions

Tout au long de mes recherches j'ai porté un vif intérêt aux problèmes posés par la perception de la hauteur sonore, en raison de mes dispositions personnelles (oreille absolue et sensibilité à la justesse) et grâce aux nouvelles possibilités d'expérimentation objective qu'offrait la synthèse par ordinateur. Au fur et à mesure de leur parution j'ai pris en main les outils qui se sont présentés : phase vocoder sous Unix; synthèse par FOF²⁹ en C sur Bull; synthèse additive sous Unix (music 10) et en C (labo); et dernièrement le programme Audiosculpt (l'Ircam) sous Mac OS.

Les musiciens instrumentistes et les compositeurs sont constamment confrontés à des problèmes de perception de hauteur et les divers points abordés ont alimenté mon enseignement au CNSM. Il se confirme que pour expliquer la sensation de hauteur il faut toujours prendre en compte le contexte et l'identité des sons avec lesquels on travaille.

On peut mener des expériences sur la sensation de hauteur en laboratoire, avec des artefacts ne relevant d'aucune catégorie instrumentale, mais les résultats ne sont pas transposables aux sons réels. Notre apprentissage du monde sonore et plus particulièrement des sons musicaux se fait sur la base d'un corpus de sons réels liés aux sources qui les ont produits et que nous structurons en catégories. Les qualités de hauteur, d'intensité, sont ensuite codées par comparaison aux sons d'une même catégorie de source. La sensation de hauteur peut donc être liée aux modifications du

29. pour Formes d'Ondes Formantiques.

spectre (piano), à l'intensité (sifflet), à la sensation d'effort (voix). Et comme nous l'avons vu, la modulation de fréquence du vibrato produit des sensations de hauteur très différentes selon le contexte musical et selon l'esthétique.

Ces réflexions, déjà présentées à Marseille (1991) et exposées dans "Psychologie de la musique" (1994) se sont trouvées confortées par l'approche "catégorisation perceptive" développée avec Danièle Dubois.

O 4. - CASTELLENGO M., (1994), La perception auditive des sons musicaux, in Psychologie de la Musique, édité par A. Zenatti, P.U.F., pp.55-87, Paris.

Cg: 11. - CASTELLENGO M.; Hauteur et timbre des sons musicaux, in "Fisica, Matematica, Musica", Conférence plénière présentée au Congrès, Atti del Congresso, Locarno, 57-61.

