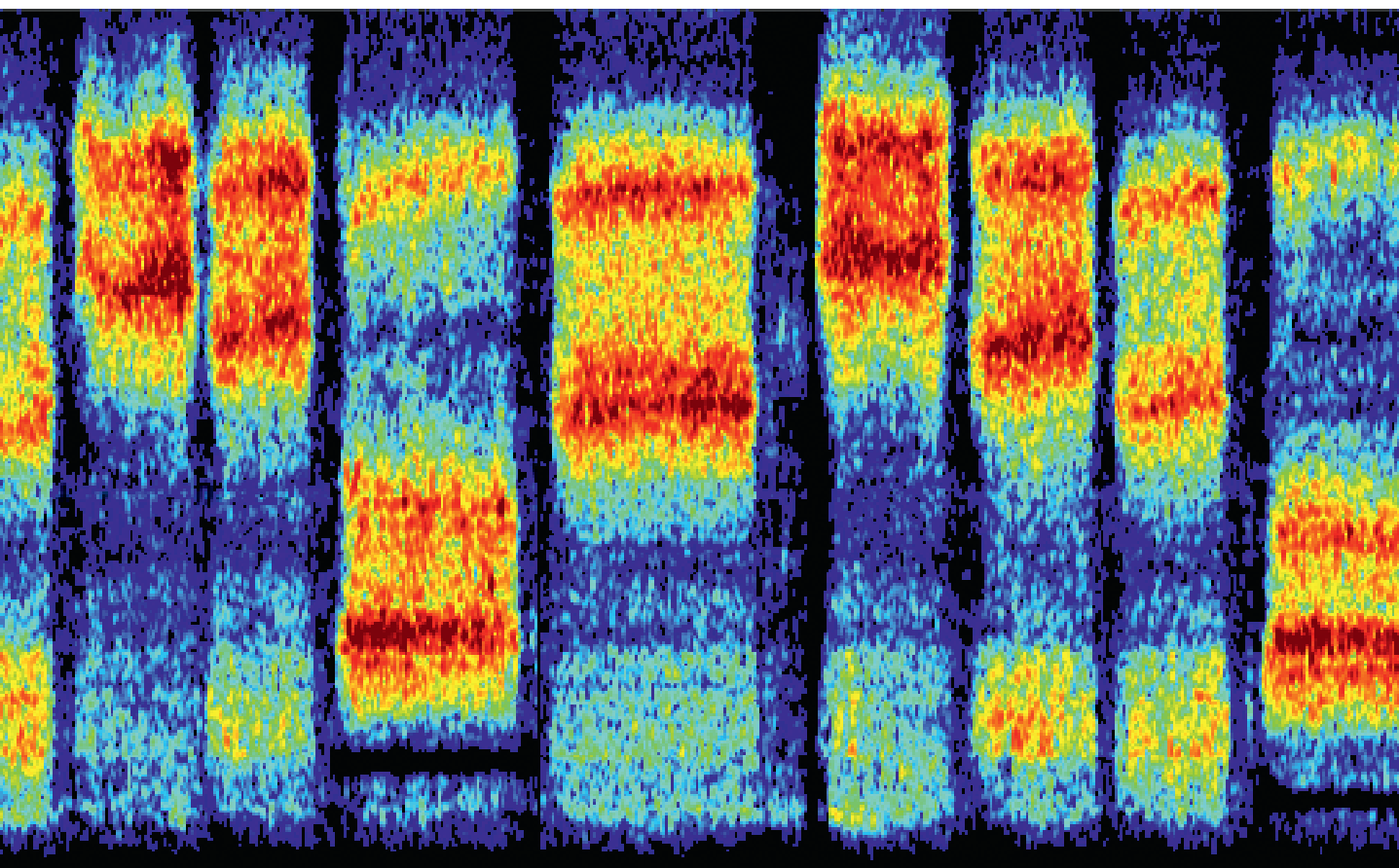


Michèle Castellengo

ÉCOUTE MUSICALE ET ACOUSTIQUE

Avec 420 sons et leurs sonagrammes décryptés



Sur le DVD-Rom d'accompagnement

- Des « livrets-sons » au format ePub pour l'écoute sur Smartphone
- Le livre complet en PDF avec les 420 sons intégrés

EYROLLES

Crédits iconographiques

Sauf mention particulière, tous les sonagrammes ont été réalisés par l'auteur à l'aide du logiciel AudioSculpt de l'Ircam.

Les sources des illustrations qui n'ont pas été réalisées par l'auteur elle-même sont mentionnées dans leur légende, à l'exception des schémas des figures 6, 7 et 1.1, réalisés par Antoine Moreau-Dusault.

L'éditeur a fait tout son possible pour identifier les ayants droit des visuels présentés. Si toutefois l'un d'eux avait été oublié, il est invité à se mettre en contact avec les Éditions Eyrolles.

Source et copyright des sons

Le concept de ce livre repose sur la fourniture de nombreux exemples choisis parmi des œuvres existantes ou réalisés spécialement pour permettre une écoute riche en contexte musical. La source des séquences sonores est indiquée entre crochets dans la section *Les sons du chapitre x* placée à la fin de chaque chapitre. Par exemple :

Son 6.27 – Guimbarde et chant harmonique de style sygyt. Successivement : jeu de la guimbarde (fondamental à 88,5 Hz) ; 13" guimbarde et voix (à l'octave supérieure de la guimbarde) ; 30" deuxième séquence voix et guimbarde ; 45" guimbarde seule. *Tuva, Voices from the Center of Asia* ; n° 16 ; Smithsonian Folkways Records, 1990. [SF 40017]

Toute reproduction ou représentation de ces sons est interdite sans l'accord de leurs ayants droit.

De nombreux sons proviennent de la base de données RWC Music Database. Les demandes d'autorisation de reproduction de ces sons peuvent être faites directement sur le site <https://staff.aist.go.jp/m.goto/RWC-MDB/>.

Les sons créés par l'auteur, référencés [M. C.], sont utilisables librement pour l'enseignement et la recherche (cours, conférences) à condition d'en citer la source sous la forme suivante :

Extrait du DVD-Rom d'accompagnement de l'ouvrage *Écoute musicale et acoustique* de Michèle Castellengo, Éditions Eyrolles, 2015.

Pour tout autre usage, il est nécessaire d'obtenir l'autorisation de l'auteur (michele.castellengo@upmc.fr).

Aux termes du Code de la propriété intellectuelle, toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle de la présente publication, faite par quelque procédé que ce soit (reprographie, microfilmage, scannérisation, numérisation...) sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. L'autorisation d'effectuer des reproductions par reprographie doit être obtenue auprès du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) – 20, rue des Grands-Augustins – 75006 Paris.

© Groupe Eyrolles, 2015
ISBN : 978-2-212-13872-6

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Extraits du CHAPITRE 6

pages 265-279

4. Les sons périodiques modulés : vibratos et trilles

4.1. Introduction : les instabilités de fréquence des sons réels

Jusqu'à présent nous avons analysé la perception de hauteur de toutes sortes de sons dont la fréquence était considérée comme stable. Du point de vue perceptif, un son stable est un son qui paraît dépourvu de variations à l'écoute. Pour y voir de plus près, nous avons demandé à plusieurs musiciens de produire des sons « droits », sans vibrato.

Le Son 6.50 fait entendre trois sons la_3 , joués successivement à la flûte à bec et au violon puis chanté, qui sont effectivement bien stables. Or nous sommes plutôt surpris de découvrir sur l'analyse des fluctuations de fréquence dont nous n'avions pas conscience (voir figure 6.41).



Son 6.50 (12'')

Sons « droits »,
note la_3

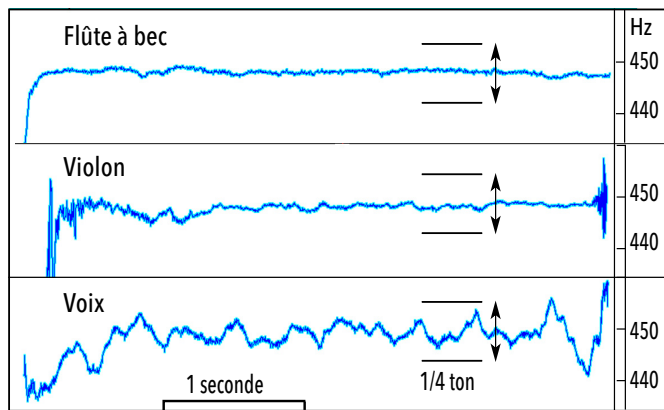


Figure 6.41 La stabilité en fréquence d'un son joué le plus « droit » possible à la flûte à bec ou au violon est toute relative : on observe des irrégularités, mais qui sont très faibles lorsqu'on les compare à celles de la voix humaine.

Il est intéressant de remarquer que les fluctuations, très faibles pour les deux instruments (de l'ordre de $4/1000$ de Hz), sont trois fois plus notables à la voix ($13/1000$), soit 3 % de la fréquence, ce qui est de l'ordre du $1/8$ de ton.

Il est plus facile de stabiliser la production d'un son de hauteur donnée lorsqu'existe un feedback entre l'excitation (archet, souffle) et la structure vibrante (corde ou tuyau). En ce qui concerne la voix chantée, la stabilité n'est assurée que par l'équilibre des contrôles musculaires du souffle et de l'appareil phonatoire.

Si le son vocal de cet exemple paraît droit à nos oreilles, c'est parce que nous avons appris à ignorer les inévitables fluctuations d'une voix humaine de la catégorie « voix chantée ». On peut avancer l'hypothèse que le développement du vibrato de fréquence sur les notes tenues, dont on sait l'importance dans la musique occidentale, serait une façon de masquer ces variations, en imposant à la fréquence fondamentale une modulation périodique dont l'échelle temporelle est beaucoup plus grande.

4.2. Le vibrato musical : une modulation complexe

La perception des modulations d'amplitude et de fréquence de sons purs est exposée au § 3.2 du chapitre 3 (système auditif). Nous analyserons ici celle des techniques musicales de modulation, plus connues sous le nom de vibrato, qui sont en usage dans le chant et dans le jeu des instruments.

Le vibrato est une modulation lente du son, inférieure à huit modulations par seconde. Selon les instruments, cette modulation s'applique préférentiellement à l'amplitude ou à la fréquence. Dans tous les cas, le vibrato s'accompagne aussi d'une modulation du spectre.

4.2.1. Le vibrato d'amplitude

Quelques instruments ont pour moyen d'expression un vibrato d'amplitude, dû à un système mécanique ou à une registration particulière. Notre sensibilité aux variations d'amplitude est optimale à 4 Hz (voir chapitre 3, page 121). Dans le jeu du vibraphone, le vibrato d'amplitude est produit par la variation périodique du couplage (par résonance) d'un tuyau placé sous la lame et accordé à la fréquence du premier mode de celle-ci. À l'orgue, il existe un vibrato d'amplitude produit par le registre de tremblant doux qui provoque une modulation du débit d'air dans le conduit d'alimentation. En revanche, l'ondulation du jeu de voix céleste provient du fait qu'il est accordé 4 Hz plus haut que les autres jeux de l'instrument. Lorsqu'on tire simultanément un jeu de flûte et celui de voix céleste, le vibrato d'amplitude ainsi obtenu est dû aux battements qui se produisent entre deux tuyaux désaccordés, et non à la modulation d'amplitude d'une seule source. Il en est de même du registre dit de musette de l'accordéon.

Exceptionnel en technique vocale, le vibrato d'amplitude produit un effet expressif très particulier. Le Son 6.51 donne à entendre un magnifique exemple enregistré en 1940 au Liban. Le chanteur amorce un vibrato d'amplitude très visible sur la forme d'onde de la figure 6.42, qui commence lentement (2 modulations par seconde), va en s'accroissant et se transforme au bout de 12 secondes en vibrato de fréquence. Particulièrement large (271 cents), ce dernier s'accompagne également d'un vibrato d'amplitude.



Son 6.51 (31'')

Voix chantée :
vibrato
d'amplitude,
puis de
fréquence

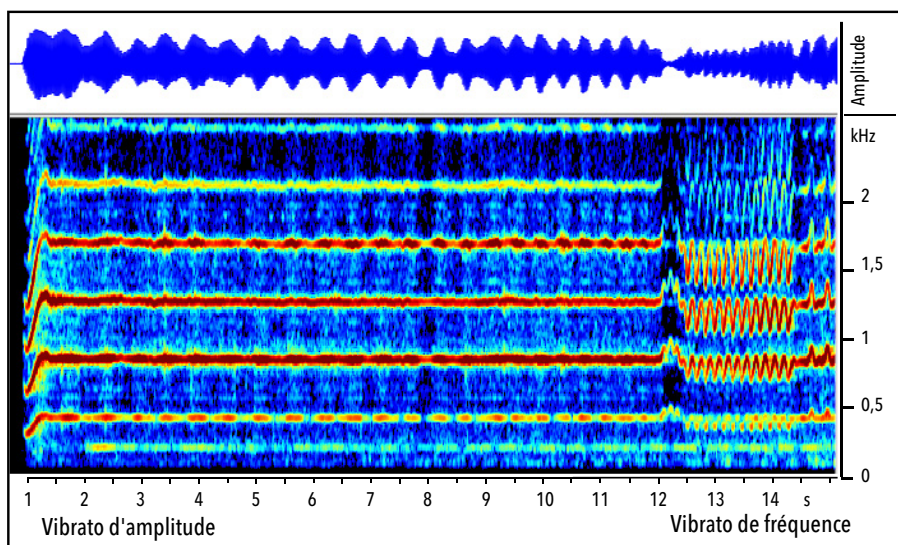


Figure 6.42 Analyse d'un chant syrio-libanais avec, successivement, un vibrato d'amplitude et un vibrato de fréquence.

De façon générale, les instruments à vent peuvent produire d'importantes modulations d'amplitude résultant des variations de débit aérien, toujours associées à des modulations de fréquence et de spectre. Le Son **6.52a**, un do_3 de flûte, est analysé figure 6.43. Il est animé d'une modulation d'amplitude, bien visible sur la courbe supérieure, dont la fréquence est de 5,5 par seconde. Dans le plan spectral, on constate d'importantes variations synchrones du spectre harmonique, associées à une faible modulation de la fréquence de jeu. Cet exemple est représentatif d'un style de jeu, et en particulier d'une technique de souffle qui n'est pas du goût de tous les flûtistes. D'autres préfèrent un vibrato où les variations de fréquence sont plus marquées.

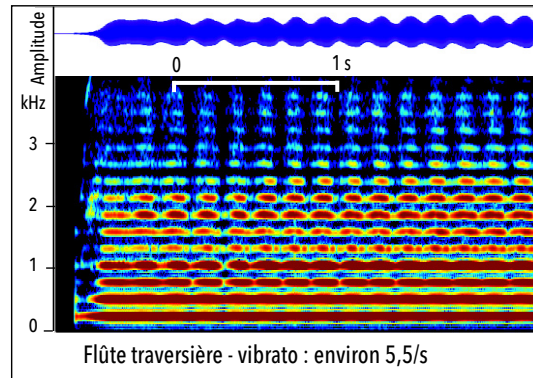


Figure 6.43 Exemple d'un vibrato d'amplitude à la flûte traversière. Note do_3 ; FFT : 1 024 pts.



Son 6.52a (4'')

Flûte traversière, vibrato (do_3).



Son 6.52b (4'')

Violon, vibrato (do_3).

4.2.2. Le vibrato de fréquence

Le vibrato de fréquence est caractéristique des instruments à archet (quatuor), du trombone à coulisse et principalement des chanteurs. Notre exemple de vibrato du violon combine des variations de fréquence (6 Hz), d'amplitude et de spectre (Son **6.52b** et figure 6.44). Le vibrato du chanteur (Son **6.52c** et figure 6.45) est avant tout un vibrato de fréquence, plus ample et plus irrégulier (pour cet interprète) que celui du violon.



Son 6.52c (4'')

Voix chantée vibrato (do_3).

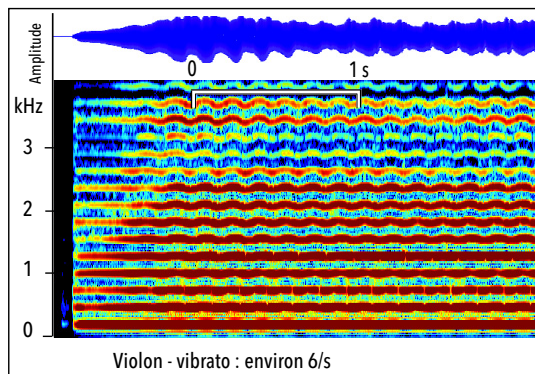


Figure 6.44 Son vibré joué au violon, note do_3 . Le vibrato affecte la fréquence, l'amplitude et le spectre ; FFT : 1 024 pts.

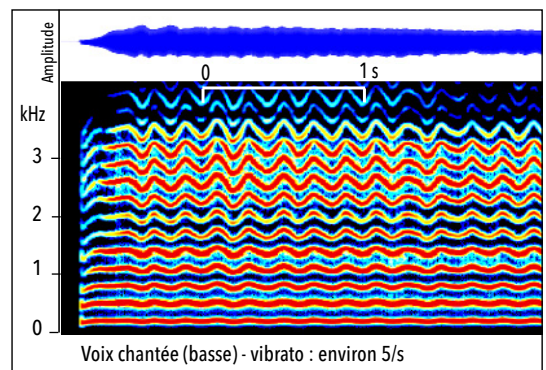


Figure 6.45 Son chanté avec vibrato, note do_3 . Notez l'amplitude des variations de la modulation en fréquence ; FFT : 1 024 pts.

Nous avons choisi de comparer ces trois exemples sur la même note, mais il faut garder présent à l'esprit le fait que le vibrato varie énormément d'une note à l'autre.

La cadence de modulation recherchée pour le vibrato de fréquence n'est pas celle du maximum de sensibilité au suivi de la variation, ce qui produirait l'impression désagréable d'un « pleurage », mais celle du seuil de fusion. L'optimum avoisine 6 Hz, avec une marge de variation (de 5 à 7,5 Hz) qui dépend de la tessiture, du tempo et principalement du goût des musiciens²⁷. L'appréciation du vibrato de fréquence s'acquiert, surtout s'il est ample comme en chant lyrique ; certains auditeurs y demeurent réticents malgré leurs efforts.

La production d'un vibrato en fréquence résulte d'un mouvement de la main (violon), d'une oscillation du larynx (voix) ou des variations de pression de l'air fourni par le musicien (flûte, hautbois). La plage des valeurs observées est donc aussi à mettre en relation avec les fréquences d'oscillation des systèmes physiologiques moteurs mis en jeu dans sa réalisation.

4.3. Le vibrato de fréquence et la perception de la hauteur

4.3.1. Les incidences de la largeur du vibrato

La *largeur* du vibrato, ou intervalle d'excursion en fréquence, varie également beaucoup selon les instruments. Le vibrato le plus ample est celui des chanteurs et le plus faible est celui de la clarinette dans un style de jeu classique.

En musique, la largeur de modulation est définie par le rapport de l'intervalle de modulation Δf (mesuré en Hz) à la fréquence moyenne f_m ²⁸. Ce rapport, $\Delta f/f_m$ (figure 6.46), ne dépend pas du rang de l'harmonique. Les valeurs courantes de $\Delta f/f_m$ sont 0,03 (soit 3 % de la fréquence) pour un vibrato de violon et 0,06 à 0,12 pour un chanteur. Ces trois valeurs correspondent respectivement à 1/4, 1/2 et 1 ton tempéré.

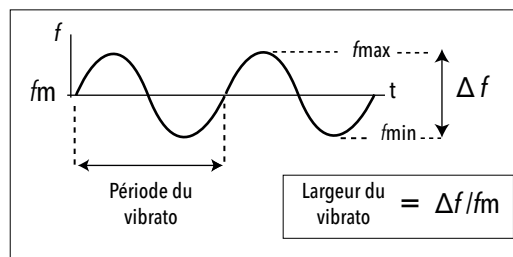


Figure 6.46 Schéma du vibrato de fréquence.



Son 6.53 (25'')

Différentes largeurs de vibrato : son de synthèse (voir page 285)

Le Son **6.53** réalisé en synthèse permet d'apprécier comment, pour chacun de nous, la hauteur perçue varie avec la largeur du vibrato (se reporter à la liste des sons pour le détail). On remarquera dans cet exemple que, pour la largeur maximale du vibrato (un ton), la hauteur perçue de la note vibrée n'est plus comparable à celle du son non vibré. Selon les auditeurs, elle paraît soit plus haute, soit plus basse !

27. Il est frappant de constater que les chanteurs lyriques de culture latine (Italie) apprécient des fréquences de vibrato plus rapides que ceux de culture anglo-saxonne.

28. Dans certains ouvrages, Δf est défini comme l'écart par rapport à la fréquence moyenne f_m ; cette pratique vaut pour une modulation symétrique de part et d'autre de la fréquence moyenne, ce qui est rarement le cas dans la réalité musicale. L'intervalle perçu correspond à l'excursion totale, pour laquelle il n'existe pas de terme bien défini : largeur, excursion ou amplitude du vibrato sont indifféremment employés.

Ce n'est donc plus la fréquence moyenne que nous percevons mais plutôt la limite supérieure ou inférieure de l'excursion en fréquence. Nous retrouverons ce mode de perception dans l'étude du trille vocal, page 272.

4.3.2. Les tolérances de justesse induites par le vibrato de fréquence

Les déplacements de la hauteur perçue, vécus dans l'expérience du son **6.53** indiquent que, dès qu'un son est vibré, l'auditeur devient beaucoup plus tolérant pour apprécier la justesse des intervalles musicaux. L'écoute du Son **6.54** est surprenante. La mélodie de trois notes, jouée avec vibrato sur un instrument électronique, est plutôt bien acceptée. Sans vibrato, l'écart de justesse n'est plus du tout supportable. On en conclut que le vibrato permet à l'auditeur d'interpréter la hauteur moyenne, à la baisse ou à la hausse, selon le contexte. Écoutez aussi le Son **6.55** : quel est l'intervalle entre les deux sons chantés ?

4.3.3. Le vibrato de fréquence dans les transitions mélodiques

Dans la pratique musicale, le vibrato affecte des sons de durées variables, liés ou détachés. Les interprètes s'arrangent, dans le jeu legato, pour effectuer un nombre entier d'oscillations pendant la durée d'une note. Que se passe-t-il lorsque le nombre de notes par seconde avoisine la fréquence du vibrato ? Le Son **6.56** permet de comparer la réalisation d'une gamme diatonique ascendante-descendante de do_3 à sol_4 , chantée puis jouée au piano. À l'écoute, il s'agit bien de la même mélodie.

Sur l'analyse spectrographique du piano (figure 6.47), il est aisé de repérer les différentes notes qui sont autant de traits horizontaux séparés par le bruit de la percussion. L'interprétation mélodique de la gamme chantée s'avère plus difficile.

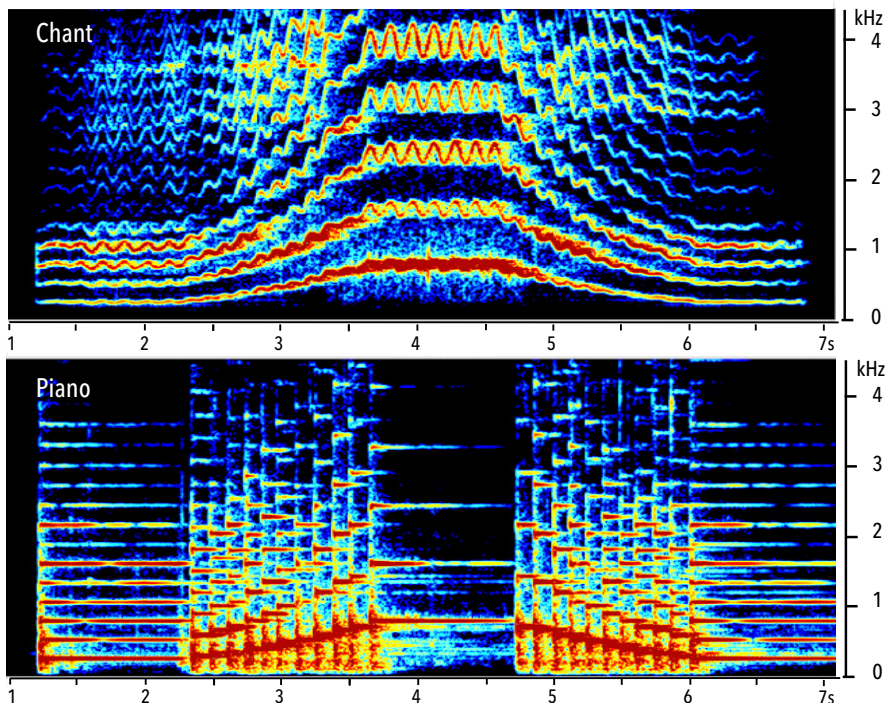


Figure 6.47 Gamme diatonique rapide chantée, puis jouée au piano. Son 6.56.



Son 6.54 (17'')

Vibrato
et tolérance
de justesse
(voir page 285)



Son 6.55 (9'')

Repérez
l'intervalle
chanté

Vibrato et tempo



Son 6.56 (15'')

Gamme
diatonique
chantée
(soprano) puis
jouée
au piano

Les deux notes extrêmes tenues ont plusieurs arches de vibrato (5 pour le *do* grave et 7 pour le *sol* aigu). Sur toutes les autres notes, la chanteuse « passe » par une seule arche (voir figure 6.48). L'enchaînement ne se fait pas au hasard. La transition à la note suivante s'opère dans la partie ascendante du vibrato, pour une note supérieure, et dans la partie descendante pour une note inférieure.

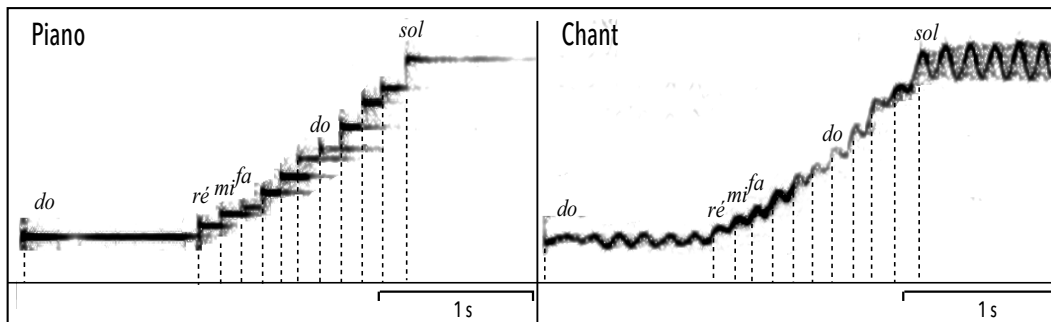


Figure 6.48 Ci-dessus, ligne mélodique de la gamme diatonique do_3 à sol_4 , jouée au piano et chantée avec un vibrato de fréquence. Le tracé est celui de l'harmonique 3 dans la partie ascendante de la gamme.

En comparant les traits précis de la fréquence fondamentale de chacune des notes du piano et les larges ondulations de la ligne mélodique vibrée, on ne peut qu'insister sur la part importante que prend l'interprétation cognitive dans la perception de hauteur des sons vibrés. Toutefois, plusieurs expériences de synthèse ont permis de montrer que la marge est réduite et qu'il est tout à fait possible d'ajuster de façon précise des sons vibrés (Castellengo & coll., 1989).



Son 6.57 (30")

Vibrato dans le portando

Lorsque la transition se fait entre deux notes liées séparées par un très grand intervalle, comme dans le Son 6.57 où il est d'une octave + une quinte diminuée (du $ré_3$ au lab_4) la durée de transition peut atteindre des valeurs importantes : ici 400 ms. Un simple raccordement glissé entre les deux notes serait alors perçu comme un portamento peu agréable.

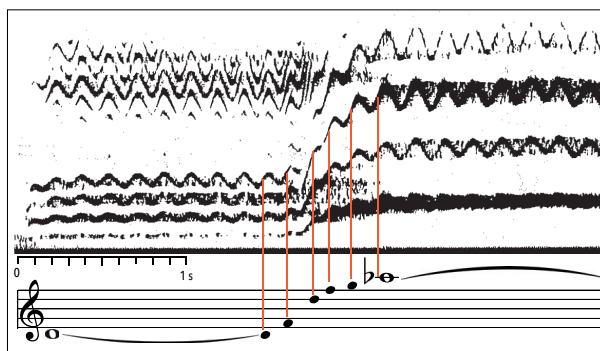


Figure 6.49 Transition vibrée entre deux notes liées, séparées par un grand intervalle (Son 6.57).

Dans notre exemple la chanteuse réalise une transition très élaborée dont nous n'avons pas conscience à l'écoute. L'analyse (figure 6.49) révèle qu'elle effectue un

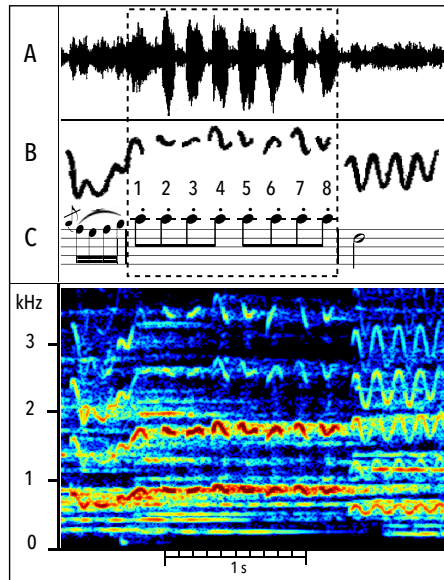
arpège de trois oscillations intermédiaires sur fa_3 , $ré_4$, fa_4 , qui sont les notes de l'accord de quinte diminuée. Ces notes intermédiaires ne sont pas perçues à la première audition et, d'ailleurs, ne sont pas écrites sur la partition. Un simple calcul montre que pendant la transition la période des oscillations se réduit : elle passe de 160 ms (vibrato de 6, 25/s) à 133 ms. L'habileté musicale de la chanteuse, qui ne doit pas arrêter l'oscillation de sa voix pendant cette liaison, consiste à effleurer des degrés s'inscrivant dans l'harmonie de l'accord.

4.3.4. La perception de hauteur des notes courtes vibrées

L'exemple le plus célèbre est celui de l'air de la Reine de la nuit de *La Flûte enchantée* de Mozart qu'on peut entendre dans le Son 6.58. La figure 6.50 montre (ligne B), la transcription mélodique extraite de l'analyse spectrale des huit notes piquées sur la_4 .

Chaque note est une portion d'arche de vibrato d'une durée moyenne de 80 ms, soit une demi-période de vibrato. Des expériences systématiques d'ajustement de la hauteur perçue pour ces brèves modulations, telles qu'elles se présentent dans l'interprétation chantée, ont montré que la hauteur perçue n'est plus assimilable à la fréquence moyenne (f_m), mais varie avec le sens ascendant ou descendant de l'inflexion et en particulier avec sa forme terminale²⁹.

Figure 6.50 Analyse acoustique d'un extrait de l'air de la Reine de la nuit (Mozart) montrant la diversité des réalisations de la note « piquée » répétée 8 fois (note la_4). De haut en bas : A, courbe d'amplitude ; B, tracé de l'harmonique 4 ; C, notation musicale ; sonagramme.



Son 6.58 (18")

Les notes « piquées » de la Reine de la nuit



Son 6.59 (4")

Synthèse des formes a à d de la figure 6.51



Son 6.60a (12")

Test des notes courtes vibrées (voir page 285)

Test 1



Son 6.60b (5")

Test 2

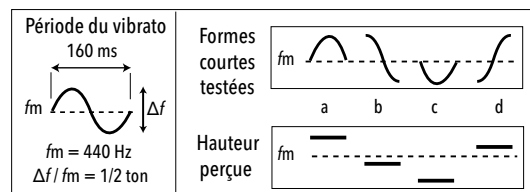


Figure 6.51 Schémas des portions de vibrato (a, b, c, d) qui ont fait l'objet de tests et figuration de la hauteur perçue par rapport à la fréquence moyenne.

29. Voir d'Alessandro C., Castellengo M., *The pitch of short-duration vibrato tones* (1993) et (1994).

4.4. Du vibrato au trille : le rôle du contexte musical

Le cas étrange
du trille vocal

Le trille est un ornement mélodique commun à tous les instruments, constitué de l'alternance de deux notes conjointes à intervalle d'un demi-ton ou d'un ton. Il se distingue nettement du vibrato par la netteté des deux degrés en présence. La cadence du trille est approximativement celle du vibrato : autour de six à huit alternances par seconde.

C'est le trille vocal, difficile à bien réaliser, qui va retenir notre attention. Comment un chanteur peut-il effectivement produire l'alternance rapide de deux notes ? Comparons tout d'abord un trille instrumental et un trille vocal.

Le Son 6.61 propose successivement un trille vocal et un trille joué en écho à la flûte, une octave plus haut. L'écoute en est très claire. Nous avons effectué l'analyse sonographique et extrait l'harmonique 2 de la voix pour le comparer au fondamental de la flûte, afin de positionner les deux tracés en vis-à-vis (figure 6.52).



Son 6.61 (18")

Trille vocal
et trille
instrumental

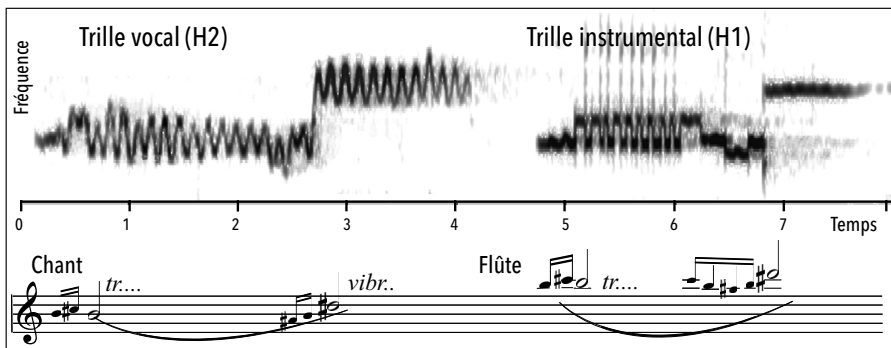


Figure 6.52 Un trille vocal suivi d'un trille joué à la flûte. Les deux trilles étant à une octave de distance dans le Son 6.61, nous avons sélectionné l'harmonique 2 de la voix et l'harmonique 1 de la flûte pour les comparer à la même fréquence moyenne.



Son 6.62 (5")

Trois sons vibrés
(figure 6.53
à gauche)



Son 6.63 (5")

Trille avec pré-
paration (figure
6.53 à droite)



Son 6.64 (5")

Extraits (1) et (2)
de la figure 6.53

Le tracé du trille de la flûte, dont les deux notes (*si* et *do#*) sont séparées temporairement par le bruit de fermeture des clés du *si* (on en compte 9 par seconde), est clairement lisible sur l'analyse. En revanche, il n'est pas facile de s'y retrouver dans la lecture du trille vocal. La figure montre les ondulations de deux sons vibrés de largeur équivalente, correspondant au *si*₃ et au *ré#*₄ : comment se fait-il que le premier soit perçu comme un trille et le deuxième comme une note vibrée ? Cette observation nous a suggéré l'idée de réaliser une expérience de synthèse.

Dans le Son 6.62, la voix que nous entendons chante trois notes vibrées ; dans le Son 6.63, la voix chante un trille. Or nous sommes bien étonnés d'apprendre que le signal synthétisé pour la dernière note vibrée, *do#*₄, est le même que celui de la note trillée, ce que l'on peut constater sur l'analyse de la figure 6.53. Il suffit pour s'en convaincre d'écouter les sons (1) et (2) de la figure 6.53, isolés du contexte (Son 6.64). Comment s'opère le changement de perception entre la hauteur unique d'une note vibrée et l'alternance des deux notes distinctes d'un trille ?

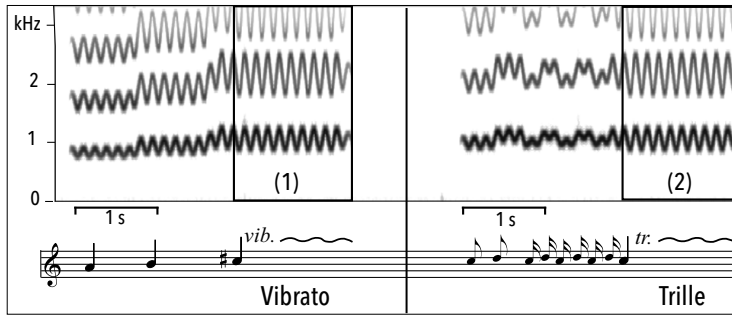
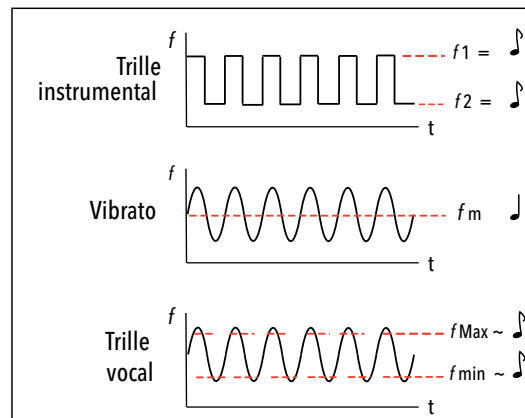


Figure 6.53 Un même signal vibré (encadré), peut être perçu soit comme une seule note avec un vibrato, soit comme un trille de deux notes.

Nous avons déjà remarqué (page 268) que la hauteur perçue d'un son vibré largement pouvait se déplacer, les limites supérieures ou inférieures de l'excursion pouvant notamment devenir de nouveaux repères. C'est exactement ce qui se passe lorsque nous entendons un trille vocal. Le schéma de la figure 6.54 permet de comprendre comment un son vibré largement s'entend, tantôt comme une seule note, tantôt comme les deux notes d'un trille. C'est donc seulement dans un contexte musical donné que le signal prend sens, qu'il est interprété comme vibrato ou comme trille³⁰.

Figure 6.54 Le trille instrumental est dû à l'alternance de deux notes distinctes. Le trille vocal n'est qu'un grand vibrato. Lorsque la largeur de l'excursion a des valeurs comprises entre 0,12 et 0,18, la perception est totalement ambiguë et ne dépend que du contexte musical.



Les exemples sonores suivants confirment le rôle important du contexte musical. Dans le Son 6.65, l'intervalle exact d'un trille isolé n'est pas facile à appréhender : est-ce un ton ou demi-ton ? Il est difficile de se prononcer. Avec la préparation, tout s'éclaire. Dans le Son 6.66, les deux notes de préparation du trille et la formule conclusive tonale sont la clé d'écoute musicale du trille vocal.

Le trille vocal est peut-être la plus belle illusion auditive, musicalement partagée. En la comparant à la parabole du cheveu de la Vierge (voir annexe D) Stéphen de la Madelaine, éminent chanteur et pédagogue écrit :

Je me suis cent fois remémoré cette fraude pieuse en écoutant en fort bons lieux des trilles qui escamotaient si habilement la note supérieure, que le public croyait entendre un pianissimo de la plus exquise délicatesse, tandis qu'en réalité l'artiste faisait sautiller sa voix sur une seule note.



Son 6.65 (8'')

Deux trilles chantés hors contexte musical



Son 6.66 (25'')

Les mêmes trilles chantés en contexte

30. Voir Castellengo, M. (1993), *Fusion or separation : from vibrato to vocal trill*, Comptes-rendus du SMAC93 (Stockholm Musical Acoustics Conference) Stockholm.

D'autres chanteurs se bornent à soulever la première note du trille, de manière à obtenir une seconde diminuée, d'une justesse équivoque, et le rapide martellement du trait (quand il y a martellement) produit encore, dans cette circonstance, une illusion qui satisfait beaucoup d'oreilles. Mais le seul trille régulier, tel que le battent madame Damoreau et Ponchard, est celui qui produit nettement et vigoureusement les deux notes qui le composent.



Son 6.67 (21")

Trille vocal avec préparation et terminaison

Madelaine, S. (de la), vers 1851, p. 119-121.

Le Son 6.67 associé à l'analyse de la figure 6.55 offre l'exemple d'une très belle réalisation de trille vocal, digne de la « Damoreau », par la chanteuse Joan Sutherland.

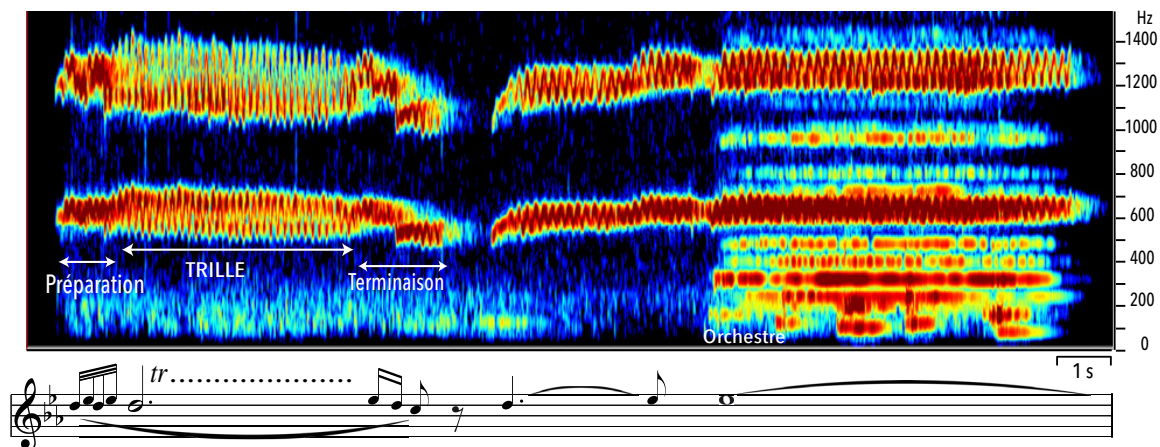


Figure 6.55 Analyse spectrographique d'un trille chanté avec préparation et terminaison.

4.5. À propos des ornements

Le vibrato de fréquence, aujourd'hui omniprésent dans l'interprétation de la musique classique et romantique, a supplanté la grande variété d'ornementations mélodiques qui se pratiquaient au temps de la monodie et que l'on peut apprécier dans les musiques traditionnelles, dans la musique dite populaire ou dans la variété.

Un grand nombre des ornements instrumentales décrites dans les méthodes de musique de la Renaissance et de l'époque baroque sont, en quelque sorte, des adaptations instrumentales de la diversité des effets possibles à la voix.

Dans son traité sur la flûte traversière (1707), Hotteterre fait une grande place aux ornements du jeu. Le fait de boucher les trous de l'instrument avec les doigts offre une grande liberté dans la combinaison des trous ouverts ou fermés. À côté des « coulés, accents et ports-de voix » l'auteur décrit le flatterment ou tremblement mineur et le battement de caractère plus énergique. Ce que nous nommons trille est appelé *cadence ou tremblement* – ce qui dit assez la délicatesse de l'ornement.

Quelques ornements ont été remis au goût du jour à la faveur de la redécouverte des musiques dites anciennes et traditionnelles. En témoigne le *bisbigliando* de la musique contemporaine, très répandu dans la pratique de la flûte *shakuhachi* japonaise. Produit par l'alternance rapide de la même note jouée avec des doigts différents, il donne l'effet d'un tremblement de timbre.

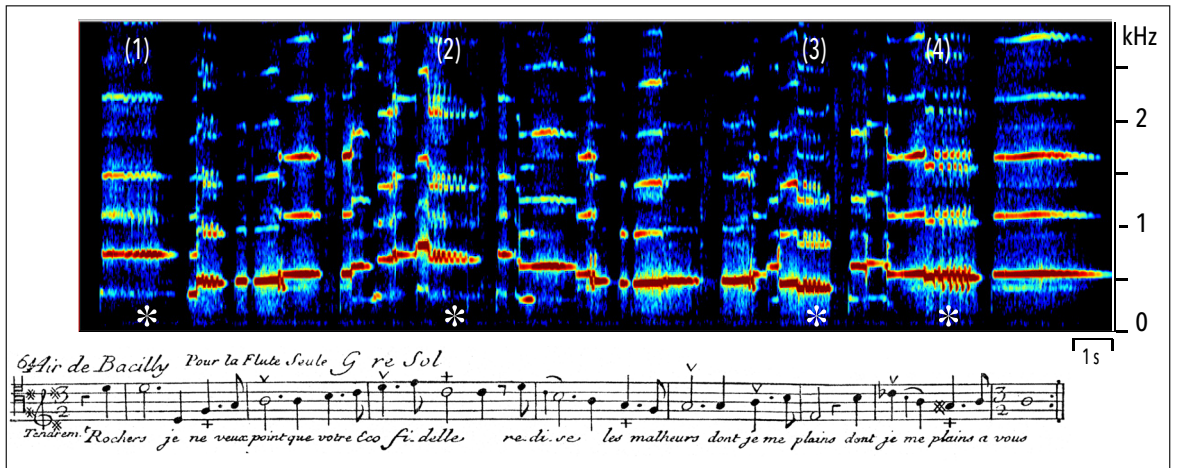


Figure 6.56 Analyse spectrographique d'une phrase musicale jouée à la flûte traversière à une clé. Notation musicale originale avec l'indication schématique des notes à orner (la croix pour le trille (ou cadence) ; le « v » pour un port-de-voix et battement).

Musique de Jacques Hotteterre, *Airs et brunettes*, s.d., p. 64 (collection privée).

La figure 6.56 présente l'analyse du jeu de la première phrase d'une mélodie de Bacilly (Son 6.68a) transcrite par Hotteterre pour la flûte traversière à une clé. Quatre ornements sont repérés par un astérisque blanc. Le premier est un « flattement » de faible excursion (1/8 de ton). Les trois autres sont des « tremblements » dont l'effet change selon les notes affectées. La figure 6.57 montre l'analyse de deux d'entre eux plus en détail.

Flûte traversière
à une clé
(diapason la_3
= 415 Hz)



Son 6.68a (26"')

La première
phrase de
l'air « Rochers »
de Bacilly
(voir page 286)

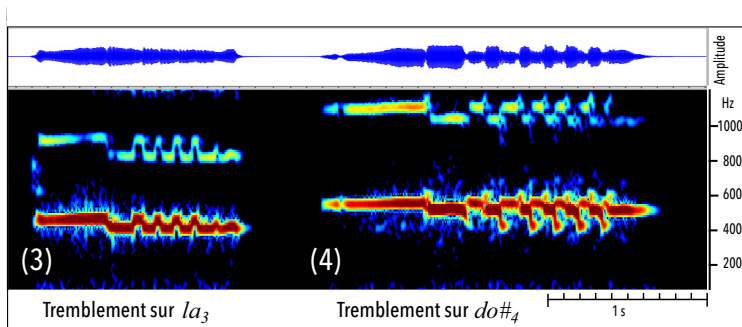


Figure 6.57 Exemples d'ornements à la flûte à une clé. (3) trille simple si_3-la_3 . (4) trille $ré_4-do\#_3$ avec alternance de deux modes vibratoires différents : on entend – et on observe – des discontinuités mélodiques à chaque alternance de sons, accentuées par le contraste d'amplitude.

Le tremblement sur la_3 (3), alterne deux sons du même mode vibratoire dans une modulation continue. Le second (4) est caractéristique des effets sonores de ce type d'instrument (Son 6.68b). Le $do\#_3$ et le $ré_4$ relevant de deux modes vibratoires différents, leur alternance rapide ne peut se faire sans une rupture de fréquence et des inflexions mélodiques qui changent selon le rang harmonique ; les discontinuités sont accentuées par les changements d'amplitude visibles sur la courbe supérieure.



Son 6.68b (7"')

Cadence (ou
tremblement)
sur la_3 et sur
 $do\#_4$

On voit que les modulations sonores produites par les techniques d'ornementation développées dans le jeu des instruments réels sont toujours complexes et infiniment variables. Les ornements possibles sur une flûte de facture baroque ont disparu avec les modifications de la perce et de la clérierie apportés par Boehm, au profit d'autres effets introduits par les modes de jeu contemporains (voir chapitre 7, page 337).

5. Bilan

À travers l'écoute et l'analyse des sons réels, la perception de la hauteur sonore, classiquement rapportée à la seule fréquence fondamentale des sons musicaux, apparaît d'une grande richesse et d'une grande diversité, tout en s'inscrivant dans les processus physiologiques présentés au chapitre 3.

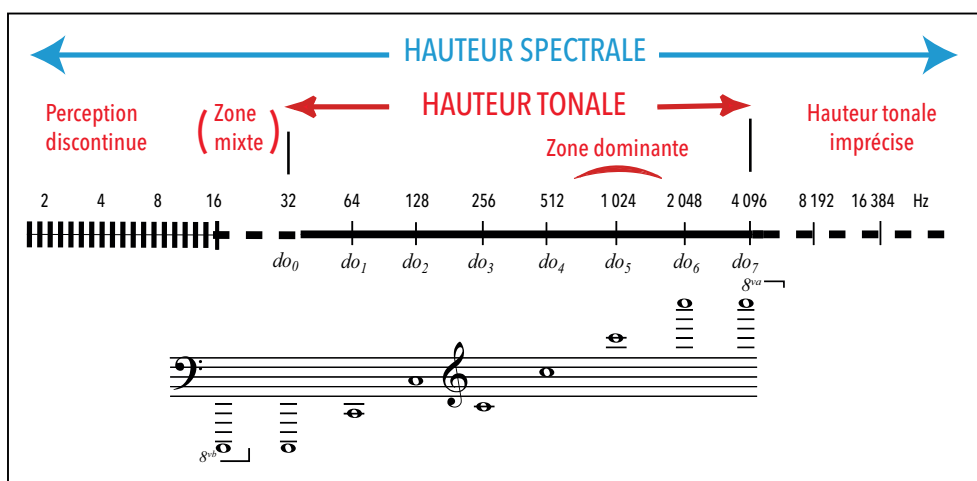


Figure 6.58 Tableau synthétique des capacités d'appréhension de la hauteur selon les fréquences. La zone d'écoute dominante, qui s'étend environ entre 800 et 1800 Hz est distincte de la zone de la plus grande sensibilité de l'oreille (3000 Hz), non indiquée sur la figure.

5.1. La hauteur spectrale et la hauteur tonale

Les sons instrumentaux et vocaux ayant tous un spectre complexe, sollicitent simultanément les deux modalités de sensation de hauteur, la hauteur spectrale et la hauteur tonale.

Hauteur spectrale

La hauteur spectrale, due principalement au codage tonotopique, fournit une information globale sur la position des maxima énergétiques du spectre. Cette capacité primordiale de l'analyse auditive est active sur toute l'étendue du spectre des fréquences. De la succession de deux bruits dont les maxima de spectre diffèrent surgit une mélodie spectrale plus ou moins bien définie : mélodies de tambours, mélodies de ruisseaux (Son 6.2). Dans le cas où il s'agit de sons périodiques pourvus d'une structure formantique, la mélodie suscitée par les variations spectrales est indépendante de celle qui naît des relations entre les hauteurs tonales (ou fréquences fondamentales) et peut donc entrer en conflit perceptif avec elle. Nous en avons donné de nombreux exemples (voir § 2.7). Toutefois, même lorsqu'elle s'impose perceptivement au point d'occulter la hauteur tonale, comme dans

l'exemple du contrebasson (Son **6.16**), la mélodie spectrale est imprécise : il est très difficile de la noter musicalement. Dans ce mode d'écoute, plus que la position précise des hauteurs, c'est la direction des variations spectrales qui attire notre attention, leur enveloppe temporelle ou contour mélodique.

La sensibilité au contour mélodique procurée par la hauteur spectrale est très commune et se développe vraisemblablement lors de l'apprentissage de la parole. On sait que les bébés sont sensibles au contour mélodique de la parole humaine qui est l'intonation, bien avant qu'ils soient capables d'en saisir le sens, et souvent les jeunes enfants chantent une comptine sans reproduire précisément les intervalles : seul le contour mélodique en est conservé.

Contour
mélodique

Il est troublant également de remarquer que la zone de fréquences qui s'étend globalement de 700 à 1800 Hz, que nous avons appelée zone d'écoute dominante (figure 6.58) et qui correspond à peu de choses près à la zone d'existence des partiels dominants définie par Ritsma pour la sensation de hauteur (voir chapitre 3, figure 3.30), est aussi celle dans laquelle se produisent les variations du deuxième formant vocalique. Elle joue un rôle majeur dans l'appréciation de la hauteur des sons apériodiques (tubes, cloches).

Zone d'écoute
dominante

Le fait que la hauteur spectrale ne donne pas d'information précise sur la grandeur des intervalles ne doit pas nous détourner de l'idée que cette compétence peut être cultivée à un point dont nous n'avons peut-être pas conscience, en particulier dans des traditions musicales qui paraissent, selon nos critères, dépourvues d'une échelle musicale repérable. La hauteur spectrale interviendrait aussi dans la discrimination mélodique des langues à tons et bien sûr dans l'écoute des musiques de rythmes.

La hauteur tonale, principalement due au codage temporel, est celle qui permet d'apprécier de façon précise la hauteur de composantes périodiques stables, que les sons possèdent ou non de l'énergie à la fréquence fondamentale. Elle est aussi à invoquer pour la saisie de composantes isolées de certains sons apériodiques tels ceux des cloches. La hauteur tonale fonctionne dans un intervalle de fréquence limité, grossièrement entre 30 et 4000 Hz, zone qui correspond à la tessiture des fondamentaux musicaux, ce qui n'est pas surprenant si l'on songe que les instruments se sont adaptés au fil des siècles pour exploiter au mieux les capacités de l'oreille humaine. Au-delà de 4000 Hz, nous percevons toujours une hauteur, mais sans pouvoir précisément définir les intervalles de variation. Du côté des basses fréquences, la sensibilité aux variations temporelles quitte le domaine des hauteurs pour celui des rythmes. Nous sommes extrêmement sensibles aux variations lentes de la fréquence des sons, aux ornements de toute sorte qui donnent la vie aux sons produits par les gestes humains. Dans la zone intermédiaire 10-30 Hz, les sensations varient selon les auditeurs, mêlant les aspects discontinus et continus de la vibration (voir aussi chapitre 3, § 3.2).

Hauteur tonale

Développée à l'écoute des sons d'instruments de musique entretenus, riches en harmoniques, la hauteur tonale permet d'atteindre une très grande précision dans la discrimination des hauteurs, comme le révèlent les seuils différentiels (voir chapitre 3, § 2.5) : jusqu'au 1/1000 de la fréquence pour un son de 1000 Hz ! Contrairement à la hauteur spectrale, la hauteur tonale est une capacité qu'il faut acquérir et entraîner. Spécifique de la musique, l'évaluation des intervalles fait appel à des traitements très précis et suppose des apprentissages complexes pour l'écoute de la polyphonie et de l'harmonie. Le cas particulier du vibrato

(voir l'exemple du Son **6.54**) et son expansion en musique vocale montrent l'importance de la part culturelle et éducative dans l'appréciation de la hauteur des sons.

Apprendre à repérer la hauteur tonale liée à la périodicité du signal, c'est apprendre à repérer ce qui est commun à deux sons produits sur des instruments différents, quelles que soient les variations de hauteur spectrale. De ce point de vue, hauteur spectrale et hauteur tonale seraient donc antagonistes et souvent conflictuelles (sons **6.18** à **6.21**).

La précision qu'offre la hauteur tonale pour apprécier la hauteur des sons périodiques porte sur l'évaluation des rapports entre les sons et non sur la mesure d'une fréquence. Un son isolé n'est pas de la musique. C'est de la comparaison entre sons successifs ou sons simultanés que naît l'intervalle. Autrement dit, la hauteur tonale est l'aptitude que développent prioritairement les musiciens, et en particulier ceux qui ont l'oreille dite relative³¹.

5.2. La perception de la hauteur, la facture instrumentale et les modes vibratoires

Dans ce chapitre sur la perception de hauteur nous avons évoqué à plusieurs reprises les modes vibratoires des instruments de musique dont l'ajustement est sous le contrôle du facteur d'instrument. Voici une petite synthèse.

Sons périodiques

- Pour les sons périodiques, on utilise un seul mode, le plus souvent le premier sur les instruments à cordes (excepté les modes de jeu en sons « harmoniques »), les trois ou quatre premiers modes du tuyau pour les instruments à trous latéraux, selon le registre, et tous les modes jouables aux cuivres. De toute façon, comme le son est entretenu, la hauteur de la note jouée est parfaitement définie. La justesse des modes entre en ligne de compte pour l'extension de la tessiture (afin de pouvoir octavier, quintoyer) et elle a une incidence importante sur la richesse spectrale du son joué.
- Pour répondre au critère d'une hauteur bien définie, accordable, les sons apériodiques des instruments non entretenus requièrent des réglages spécifiques. Le premier groupe est celui des instruments à cordes libres. Les fréquences des modes propres doivent être très voisines de celles de la série harmonique du mode 1 pour que l'oreille s'en accommode et leur attribue une fondamentale. À l'opposé se situe le groupe des instruments pour lesquels un seul mode est favorisé (verges libres). Les autres modes sont neutralisés (point de frappe, point d'appui) ou accordés sur une partie aliquote du mode 1. Le troisième groupe (cloches, timbales) rassemble les instruments pour lesquels un groupe de modes propres consécutifs (2 ou 3) sont de bons candidats au modèle harmonique. L'accordage et le jeu (point de frappe) contribuent alors à favoriser la note désirée.
- Lorsqu'il est possible de sélectionner et de stabiliser plusieurs modes vibratoires – cas des sons multiphoniques – le son produit donne lieu à la perception de plusieurs hauteurs distinctes formant un accord complexe de timbres et de hauteurs (voir le chapitre 8, § 2.4.2).



Son 6.69 (10")

Musique jouée au marimba, dans le grave de la tessiture

Dans tous les cas, la perception de la hauteur des sons apériodiques dépend étroitement de la composition spectrale et donc varie fortement avec la tessiture. La note au coup des cloches n'est bien perçue que dans un intervalle d'une octave et demie. La note des claviers (marimba, vibraphone et xylophone) est difficile à percevoir dans le grave en raison des partiels supérieurs, très présents (Son **6.69**), mais la tessiture peut s'étendre sans problème dans l'aigu.

31. Voir le chapitre 8, page 435, pour quelques réflexions sur l'oreille dite absolue.

5.3. Perception de la hauteur et mesure acoustique

On voit qu'il est capital de connaître très précisément la structure acoustique des sons que l'on étudie sous l'angle de la hauteur, surtout si l'on souhaite y faire correspondre les résultats d'une mesure acoustique. Avant de procéder à une analyse de la hauteur fondamentale, deux questions préalables sont requises :

- s'agit-il d'un son périodique ? À titre de rappel, voici la même note, jouée sur un vibraphone, d'abord percutée, puis entretenue à l'archet (Son **6.70**) : à l'écoute, ces deux sons appartiennent bien à des mondes sonores radicalement différents (voir aussi l'exemple du verre frappé et frotté, chapitre 1, Sons **1.1** et **1.2**).
- dans quelle tessiture se trouve-t-il ? L'enveloppe spectrale pourra donner une indication sur la situation du maximum énergétique, c'est-à-dire l'interférence possible de la hauteur spectrale avec la hauteur fondamentale. S'il s'agit de sons apériodiques, l'analyse à l'oreille et le travail de transformation par synthèse sont nécessaires pour interpréter la perception de hauteur, sans oublier le contexte et les particularités individuelles qui ont une influence importante sur la perception.



Son 6.70 (6")

*Lame de
vibraphone
percutée
puis frottée
par un archet*

5.4. La hauteur comme qualité de sons connus et catégorisés

Seul l'apprentissage permet finalement de comprendre que nous puissions attribuer la même hauteur à des sons aussi différents que ceux du piano, de la cloche tube, du marimba ou de la flûte : lorsque cet apprentissage fait défaut nous sommes démunis (Son **6.6**). Ceci nous ramène à la caractéristique fondamentale de la perception humaine dont le premier réflexe est d'identifier la source sonore. Loin d'interférer, voire de contrecarrer la perception de la hauteur, nous pensons que « la reconnaissance du timbre identitaire est une étape primordiale permettant d'adapter efficacement les stratégies d'écoute en vue de l'interprétation de la hauteur musicale ».

Pour chaque catégorie de sons, nous mémorisons des critères spécifiques qui s'affinent au cours de la pratique musicale. Un exemple frappant est celui des cloches dont on « apprend » réellement à écouter la hauteur³². Un autre est celui des mélodies spectrales du chant harmonique, que plusieurs musiciens entraînés à la saisie des « notes » ne parviennent à entendre qu'après une adaptation de leur écoute afin d'ignorer la hauteur fondamentale et les voyelles.

C'est aussi la connaissance de la source et de ses caractéristiques qui permettent de comprendre que la moindre fluctuation de hauteur soit inacceptable pour un son de piano – car nous « savons » que cet instrument a une hauteur fixe – et qu'à l'opposé nous puissions entendre « une note » alors que le chanteur fait un vibrato balayant un intervalle de plus d'un demi-ton !

Le lecteur pourra croiser avec profit les résultats énoncés dans ce chapitre avec ceux que nous développons dans le cadre de l'étude du timbre (chapitre 7), ainsi que dans le chapitre 8 dans lequel nous abordons l'étude des intervalles musicaux et celle des phénomènes se produisant lors de l'émission de sons simultanés.

32. L'auteur se souvient avoir réagi vivement au désagrément procuré par l'écoute d'une pièce de musique classique de tonalité majeure interprétée sur un carillon réputé, alors qu'aujourd'hui cette audition lui procure un plaisir certain !

6.3.8. Exemple de filtrage d'une mélodie jouée sur des tom-tom : exemple à prendre en dictée

Son 6.49 – Écoute d'une formule mélodique jouée sur trois tom-tom. L'exemple propose sept présentations de la séquence musicale entendue au travers d'une suite de filtres passe-bande, de l'aigu au grave. Dans chaque bande, la mélodie est reproduite deux fois, puis après environ 6 secondes, on passe à la bande suivante. À chaque présentation, notez sommairement la mélodie perçue, ou tout au moins le début. La mélodie de 12 sons est jouée sur 3 « notes ». La dernière bande correspond au son global, c'est-à-dire au son non filtré. 1970. [E. Leipp]

6.4. Instabilités, vibrato, trille

Son 6.50 – Trois sons (la_3) joués *droits*, c'est-à-dire avec la plus grande stabilité possible. Successivement : flûte à bec, violon, voix. [M. C.]

6.4.1. Vibratos divers

Son 6.51 – Chanteur avec vibrato d'amplitude et différents vibratos de fréquence ; tradition syrio-libanaise. Disque *Les Voix du monde*, collection musée de l'Homme/CNRS ; Harmonia Mundi, CD III n° 19 ; 1996. [Document Laurent Aubert]

Son 6.52 – Trois sons vibrés sur la note do_3 . Son 6.52a : un vibrato joué à la flûte traversière ; Son 6.52b : un vibrato joué au violon ; Son 6.52c : un vibrato de voix chantée (basse). Base McGill (flûte, violon) ; base RWC (voix extraite du fichier 493BSE3M). [M. C.]

Son 6.53 – Synthèse d'un son vocal vibré sur la voyelle « o ». La rapidité du vibrato est constante, on varie l'intervalle ($\Delta f/fm$). Présentation alternée du son vibré (V) puis du son fixe (F) à la fréquence moyenne fm . Deux alternances « VFVF ». Trois largeurs de vibrato, successivement : a) $\Delta f/fm = 3\%$ (1/4 de ton) ; b) $\Delta f/fm = 6\%$ (1/2 ton) ; c) $\Delta f/fm = 12\%$ (1 ton). Dans l'exemple c), la hauteur moyenne perçue « bouge » avec le vibrato. Pour certains auditeurs, elle monte, pour d'autres, elle descend. [M. C.]

Son 6.54 – Vibrato et tolérance de justesse. Arpège ascendant (do_3, sol_3, do_4) dont les sons 2 et 3 sont vibrés (deux fois). Ensuite, même arpège sans vibrato, c'est-à-dire que les sons émis sont les fréquences centrales des sons précédemment vibrés ! La fausseté est soudain insupportable. [M. C.]

6.4.2. Vibrato vocal des chanteurs

Son 6.55 – Exemple d'un grand intervalle chanté avec vibrato. L'exemple commence sur $ré_3$. Quelle est la note aiguë ? Écoutez plusieurs fois pour noter par écrit l'intervalle musical³⁸. [Références du Son 6.57]

Son 6.56 – Vibrato vocal sur une gamme rapide (une « arche » de vibrato par note). La gamme diatonique do_3-sol_4 chantée par une soprano (sens ascendant et descendant), suivie de la même gamme jouée au piano. [LAM]

Son 6.57 – Transition liée et vibrée, sur un grand intervalle musical. L'extrait centré sur le grand intervalle de la transition analysée figure 6.49 se situe entre la 6^e et la 9^e seconde. Rossini, *La Donna del lago*, rondo final d'Elena, M. Horne. [Archives LAM]

Son 6.58 – Arpèges en notes piquées vibrées. Mozart, *La Flûte enchantée*, extrait de l'air de la Reine de la nuit, W Lipp. [Archives LAM]

Son 6.59 – Synthèse de notes courtes vibrées. On entend successivement les quatre portions différentes de vibrato, c'est-à-dire les formes a, b, c, d de la figure 6.51. Synthèse par FOF. [C. D'Alessandro, M. C.]

38. Les mesures (Praat) de la fréquence moyenne des sons vibrés sont : 297 Hz pour le grave ; 852 Hz pour l'aigu, soit un grand triton ou une petite quinte selon les auditeurs.

Son 6.60 – Exemples d'un test d'ajustement de la hauteur perçue. Son 6.60a : succession rapide de cinq paires de notes très courtes. Le 1^{er} son de chaque paire, X, est vibré (forme a), et le second, Y, est un son fixe de fréquence variable que le sujet ajuste pendant le test. Les fréquences des cinq sons fixes sont successivement : Y = 430, 438, 455, 446, 450 Hz. La fréquence moyenne de la forme a est 450 Hz (voir figure 6.51) ; Son 6.60b : son vibré (forme b) de durée croissante ; la hauteur perçue ne change pas. Les quatre durées sont successivement : 80 ms, 120 ms, 160 ms et 330 ms. [C. D'Alessandro, M. C.]

6.4.3. Le cas étrange du trille vocal

Son 6.61 – Exemple d'un trille vocal suivi d'un trille à la flûte traversière (octave supérieure). Donizetti, *Lucia di Lammermoor* ; Mado Robin, Decca, LXT 2898. [Archives LAM]

Son 6.62 – Synthèse d'une voix chantant les trois sons liés, la_3 , si_3 , $do\#_4$, avec un vibrato de largeur croissante. Synthèse par FOF. [M. C.]

Son 6.63 – Synthèse d'une voix chantant un trille avec la préparation (do_3 , $ré_3$). Synthèse par FOF. [M. C.]

Son 6.64 – Écoute des extraits (1) et (2) de la figure 6.53, qui sont acoustiquement identiques mais perçus différemment : tantôt comme un vibrato (Son 6.62), tantôt comme un trille (Son 6.63). [M. C.]

Son 6.65 – Deux trilles vocaux isolés du contexte musical : quel intervalle fait le premier ? le second ? [M. C.]

Son 6.66 – La phrase musicale du premier trille (1/2 ton) ; la phrase musicale du second trille (1 ton). [M. C.]

Son 6.67 – La séquence complète d'un trille vocal en contexte, avec préparation et finale. J. Sutherland. Bellini, *La Sonnambula*, air « Come per mer sereno ». Disque *The Voice of the Century*, London Records, STERO OSA 13107, 1962. [M. C.]

Son 6.68 – Ornaments spécifiques à la flûte traversière à une clé. Son 6.68a : jeu d'une mélodie ornée, « Rochers » de Bénigne de Bacilly ; Son 6.68b : détail de deux ornaments extraits de la phrase musicale : le trille si_3-la_3 et le trille $ré_4-do\#_3$. Flûte Martin Lot, musée du CNSM. Pierre Séchet, 1978. [Archives LAM]

Son 6.69 – Une petite mélodie jouée dans la première octave grave d'un marimba (fa_1-fa_2). Dans cette tessiture, les partiels des modes supérieurs deviennent dominants perceptivement, et perturbent l'écoute de la hauteur. Seule une reproduction sonore de qualité (enceintes graves) restitue la mélodie jouée. CNSM, 1997. [M. C.]

Son 6.70 – La lame d'un vibraphone (note sib_2) jouée successivement de deux façons différentes : percutée avec une baguette, entretenue avec un archet. Base McGill. [M. C.]

ÉCOUTE MUSICALE ET ACOUSTIQUE



Point d'entrée de cet ouvrage, les 420 exemples sonores fournis sur le DVD-Rom placent le lecteur dans une situation d'écoute attentive, à partir de laquelle il va découvrir au fil des chapitres comment analyser la structure acoustique des sons et évaluer leurs qualités musicales.

L'analyse s'appuie sur l'usage du sonagramme, représentation visuelle qui révèle la structure spectrale et temporelle des sons, et se lit à la manière d'une partition musicale, sans nécessiter de connaissances avancées en acoustique.

Mais l'analyse spectrotemporelle ne suffit pas pour rendre compte des qualités d'un son dont l'écoute diffère d'une personne à l'autre. L'auteur fournit ainsi une synthèse des données récentes sur le système auditif, la reconnaissance des formes et la catégorisation cognitive qui permettent ensuite d'aborder l'étude des qualités musicales des sons – intensité, hauteur, timbre –, les problèmes posés par l'accordage des sons instrumentaux et la grande diversité des écoutes de la voix humaine.

Après des études de musique et de musicologie, Michèle Castellengo rejoint le Laboratoire d'acoustique musicale (LAM) d'Émile Leipp où elle soutient une thèse sous sa direction. En 1982, elle entre au CNRS et prend la direction du LAM. Ses recherches portent sur l'acoustique des flûtes, de l'orgue, de la voix chantée et, plus généralement, sur la perception des sons musicaux. Elle crée en 1989 la classe d'acoustique musicale du Conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris et dirige le master Atiam (Paris 6/Ircam/SupTélécom) de 1999 à 2003. Elle est aujourd'hui directrice de recherche émérite au CNRS.

Contenu du DVD-Rom d'accompagnement

- Des « livrets-sons » au format ePub 3 (un par chapitre) pour écouter les sons sur son Smartphone ou sa tablette.
- Le livre complet au format PDF avec les 420 sons aux formats MP3 et WAV.

CONFIGURATION NÉCESSAIRE. Pour les livrets-sons au format ePub : Appli iBooks pour iPod (version 4 ou ultérieure), iPhone (version 3g ou ultérieure) ou iPad (version 2 ou ultérieure), avec iOS 6 ou version ultérieure – Appli Giden Reader (gratuite) ou Moon+ Reader (gratuite) pour Smartphones ou tablettes Android, avec Android 4 ou version ultérieure. Pour le livre au format PDF : sur Mac/PC : Adobe Acrobat Reader 6 ou version ultérieure, Mac OS X 10.0 ou version ultérieure, Windows XP ou version ultérieure – Sur iPad (version 2 ou ultérieure) : applis payantes PDF Expert (9,99 €) ou ezPDF Reader (3,99 €), iOS 6 ou version ultérieure – Sur tablettes Android : appli payante ezPDF Reader (3,22 €), Android 4 ou version ultérieure.



www.editions-eyrolles.com
Groupe Eyrolles | Diffusion Geodif

Studio Eyrolles © Éditions Eyrolles

Code éditeur : G13872
ISBN : 978-2-212-13872-6