

II. LES OUTILS INFORMATIQUES POUR LA SYNTHÈSE SONORE

II.1. De Music I à Csound : les grands événements

II.1.1. Introduction

Dans les années 50, Max Mathews, travaillant aux laboratoires Bell (« Bell Telephone Laboratories ») aux États-Unis, orienta ses recherches vers la synthèse de sons complexes et musicaux produits par un ordinateur. Cette nouvelle approche stimula la production musicale en apportant de nouveaux moyens à l'expression artistique. Les recherches qu'il a entreprises n'ont cessé de connaître des développements et sont à l'origine de la plupart des outils actuellement utilisés pour produire des sons de synthèse avec des ordinateurs.

Entre 1956 et 1957, Max Mathews conçut et programma le compilateur « Music I ». Cet outil permettait de traduire des instructions informatiques simples en un code qui générerait une séquence de nombres binaires représentant les amplitudes successives d'une onde sonore.

« Le son peut donc être représenté comme une fonction $p(t)$, p indiquant la pression et t le temps.

...

Tous les sons ont une fonction $p(t)$ et tous les sons peuvent être produits en générant cette fonction. Ainsi, si on arrive à construire une source de pression capable de produire n'importe quelle fonction $p(t)$, il est alors possible de produire n'importe quel type de sons, incluant la parole, la musique et le bruit. Un ordinateur muni d'un programme, d'un convertisseur numérique/analogique et d'un haut-parleur est quasiment capable d'atteindre cette possibilité. »
[Max Mathews-1969, p. 2]

La première œuvre réalisée à partir des sons créés avec Music I fut « In the Silver Scale » écrite par le linguiste et acousticien Newman Guttman, à la demande de Max Mathews. La pièce fut donnée en audition en mai 1957 dans les laboratoires Bell, à Murray Hill, dans le New Jersey [Pierce-1995, p. 9].

Les premiers programmes, Music I et Music II, étaient limités à la production de formes d'onde simples. Le programme Music III, grâce à l'utilisation de générateurs, a donné de la flexibilité à la construction des sons en proposant une vision modulaire de la synthèse. Ce principe a été conservé sur tous les programmes qui l'ont suivi.

De nombreux chercheurs ont utilisé les versions successives des programmes de Max Mathews pour mettre au point de nouvelles techniques de synthèse des sons.

Leurs travaux ont largement contribué au développement des synthétiseurs, appareils spécialisés dans la production de sons de synthèse et ont influencé leurs architectures. Ainsi, le *Synclavier*, produit par Jon Appleton dans les entreprises New England Digital vers 1974 en dérive directement. De même, la synthèse par modulation de fréquence mise en évidence à la fin des années soixante par John Chowning a permis à la firme Yamaha de créer le synthétiseur *DX7* en 1983. Dix ans plus tard, le *VLI* de la même firme utilise la synthèse physique par guides d'ondes mise au point par l'équipe de Julius Smith à l'université de Stanford dans les années 80.

II.1.2. Le principe des compilateurs de Max Mathews

Pour produire un son en utilisant les langages de Max Mathews, il faut commencer par construire un « instrument ».

Un **instrument** est un assemblage de générateurs élémentaires ou « unit generators » réalisé pour décrire la façon dont le signal va être généré. Ces générateurs élémentaires portent chacun un nom et représentent une fonction.

Chaque générateur comporte des paramètres ou « p-fields » dont les valeurs peuvent être fournies lors de la programmation de l'instrument ou par l'écriture d'une « partition » (en anglais « score »).

Une partition est un ensemble d'instructions qui fournissent à l'instrument les valeurs numériques requises pour permettre la production d'un son. La partition est formée d'un ensemble de lignes qui indiquent chacune les paramètres d'une note : le nom ou le numéro de l'instrument utilisé, la date de début et la durée de la note ainsi que les différents paramètres acoustiques.

Dans la plupart des cas, le générateur qui sert à produire le son est l'oscillateur. Un oscillateur est contrôlé par plusieurs paramètres : sa forme d'onde, sa fréquence, son amplitude et éventuellement sa phase.

Pour effectuer des connexions entre les générateurs, des modules servant à additionner les signaux et à les multiplier sont disponibles.

Des formes de notation graphique ont été mises au point pour expliciter le fonctionnement des instruments. Les générateurs y sont représentés par des symboles et les connexions par des traits les reliant. La figure II-1 est l'exemple d'un synthétiseur formé d'un oscillateur dont l'amplitude est contrôlée par un générateur d'enveloppe. En général, sur un oscillateur la première entrée est l'amplitude et la seconde la fréquence.

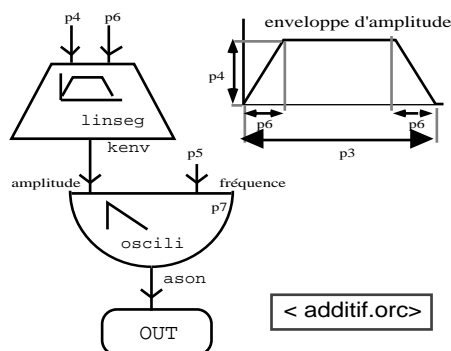


figure II-1 : notation graphique d'un instrument formé d'un oscillateur et d'une enveloppe d'amplitude

Pour décrire les variations d'un paramètre dans le temps, les programmes de Max Mathews utilisent des tables qui font généralement partie de la partition.

Ces tables peuvent être assimilées à des courbes. Elles peuvent n'être lues qu'une fois pendant la durée du son, ce qui est souvent le cas pour les enveloppes, ou être lues de façon périodique par un oscillateur qui les utilise comme formes d'onde.

En 1969, après une série d'articles relatant ses travaux, Max Mathews publia « The Technology of Computer Music » [Mathews-1969], ouvrage de référence du programme Music V, rédigé en collaboration avec Joan Miller, Richard Moore, John Pierce et Jean-Claude Risset. Dans cet ouvrage, il explique comment réaliser différents types d'instruments avec Music V. Il s'agit à la fois du premier texte de référence dans ce domaine et en même temps, on y trouve déjà pratiquement toutes

les informations de base sur les différentes techniques de synthèse numérique et les façons de les utiliser.

Max Mathews indique comment utiliser des fonctions délivrant des valeurs aléatoires pour créer des microvariations de l'amplitude et de la fréquence des oscillateurs. Ce procédé permet d'animer un son électronique et de le rendre moins artificiel.

Pour générer des variations de timbre en continu, Max Mathews montre la façon d'interpoler des formes d'onde en croisant deux oscillateurs. Ces oscillateurs produisent des signaux qui s'additionnent. L'amplitude du premier oscillateur décroît en fonction du temps alors que celle du second augmente.

Max Mathews y décrit le principe de la synthèse soustractive avec l'utilisation de filtres passe-bande du second ordre et souligne les problèmes relatifs à l'amplitude que pose l'utilisation des filtres. En effet, selon les caractéristiques spectrales du signal qui entre dans les filtres, le signal produit en sortie a une amplitude difficilement prévisible.

Max Mathews a introduit la notion de « routines », les « PLF », qui sont de petits programmes aidant à produire les partitions destinées à faire jouer les instruments. Jusqu'alors, pour faire jouer les instruments, il fallait entrer de longues listes de données constituant les partitions. Les routines ont permis de générer automatiquement des séries de « notes ». Elles ont également permis de produire des harmonies ou des mélodies à partir de processus algorithmiques. Cette notion fut un premier pas dans l'utilisation des programmes d'aide à la composition pour la synthèse sonore. Nous verrons plus précisément dans le chapitre IV des exemples de l'utilisation des PLF en étudiant la pièce « Passages » de Jean-Claude Risset, entièrement réalisée avec Music V.

Les premiers programmes, de Music I à Music IV, étaient écrits en langage assembleur — langage machine — et de ce fait étaient tributaires des machines leur ayant servi de support. Pour Music V, écrit en collaboration avec F. Richard Moore entre 1967 et 1968, Max Mathews utilisa le langage Fortran ce qui a permis le portage de ces programmes sur la plupart des machines.

Music V était beaucoup plus performant que les premiers programmes de Max Mathews. Il comportait une large variété de générateurs et des routines composites permettant de gérer des blocs de notes plutôt que des notes isolées. En outre, avec ce programme, les instruments et les partitions étaient écrits sur le même document. Les utilisateurs de Music V pouvaient ainsi faire évoluer conjointement les instruments et les partitions avec plus de facilité.

En 1970, Max Mathews et Richard Moore réalisèrent le système GROOVE qui fut le premier système d'informatique musicale à fonctionner en temps réel. Richard Moore devint ensuite professeur de musique à l'université de San Diego où il fonda le projet « Computer Audio Research Laboratory » (CARL) dont furent issus de nombreux outils informatiques utilisés pour l'analyse, la synthèse et le traitement des sons. Vers 1979, Richard Moore écrivit Cmusic, en langage C, à partir de Music V.

Max Mathews poursuit toujours ses recherches dans le domaine de la synthèse sonore et de son contrôle. Dans un article récent [Verplank, Mathews, Shaw-2000], il décrit l'utilisation de son système de contrôle gestuel, le « Radio Baton » pour le contrôle d'un nouveau type de synthèse, la « scanned synthesis ». Ce mode de synthèse permet des transformations progressives du timbre sous l'influence d'un geste par variations de la forme d'onde générée par des modèles physiques. Par exemple, une baguette du Radio Baton permet de contrôler la raideur de la corde pendant que l'autre baguette indique la position d'un archet virtuel sur cette corde.

II.1.3. Le catalogue de sons de Jean-Claude Risset

Jean-Claude Risset effectua des recherches aux laboratoires Bell en 1964 et 1965 puis entre 1967 et 1969.

Les premiers travaux de Jean-Claude Risset aux Laboratoires Bell lui ont permis de montrer la complexité des sons de cuivres. L'étude de l'évolution de leurs partiels lui a permis d'envisager la synthèse comme un phénomène dynamique dans lequel les différents paramètres acoustiques du son sont corrélés — la largeur du spectre varie avec l'intensité du son¹.

Dans la seconde période de recherche qu'il entreprit aux Laboratoires Bell, Jean-Claude Risset étudia d'autres modèles instrumentaux : gong, cloches, percussions, flûte, clarinette.... Cette recherche sur l'analyse des sons a été effectuée parallèlement à l'élaboration de techniques de synthèse appropriées. Il réalisa également la synthèse de sons plus abstraits comme ceux qu'il appela les sons paradoxaux.

Il fit connaître le résultat de ses recherches en réalisant en 1969 le « catalogue de sons synthétisés par ordinateur »².

Ce catalogue, effectué dans un but pédagogique à la demande de Max Mathews en 1969, est un outil unique, très diversifié détaillant l'utilisation de Music V pour la production de sons de synthèse. De nombreuses techniques de synthèse originales y sont présentées ainsi que des modèles de production de divers sons instrumentaux. Ce catalogue est suffisamment documenté pour permettre la reconstitution des algorithmes et produire les mêmes sons soit en utilisant le même programme, soit dans d'autres environnements.

L'exemple de la **flûte** indique comment le contrôle des modulations périodiques et aléatoires de l'amplitude d'un oscillateur permet d'introduire un phrasé dans une suite de notes.

Avec l'exemple de la **clarinette**, il montre que la synthèse par distorsion non linéaire du signal est une technique qui permet d'exercer un contrôle global sur la richesse spectrale du son³.

L'exemple de la **trompette**, réalisé par synthèse additive, a ouvert la voie aux techniques de synthèse par règles. Cet exemple a démontré que l'identité d'un timbre dépend beaucoup plus des relations qui lient les différents paramètres de la synthèse entre eux, que des valeurs fixes de ces mêmes paramètres. Les travaux de Jean-Claude Risset ont mis en évidence des caractéristiques importantes du son de la trompette : le spectre est pratiquement harmonique ; l'attaque dure de 20 à 25 ms, les partiels les plus graves étant les plus rapides ; on observe des microfluctuations aléatoires de fréquence ; le spectre comporte un formant situé autour de 1500 Hz ; plus le son est joué fort, plus le spectre s'élargit et s'enrichit en hautes fréquences.

Dans son catalogue, Jean-Claude Risset a également exploré le domaine des **sons inharmoniques et bruités** à travers la synthèse de nombreux sons de cloches et de percussions. Il décrit comment utiliser des bandes de bruit blanc ajoutées à des oscillateurs ou comment produire des spectres inharmoniques à partir d'un oscillateur périodique de fréquence infra-sonique.

¹ Robert Moog, constructeur des premiers synthétiseurs analogiques, utilisa les résultats de Jean-Claude Risset pour construire des filtres pour ses instruments.

² Le catalogue a été réédité dans « The historical CD of Digital Sound Synthesis », Wergo 2033-2.

³ Par la suite, son collaborateur Daniel Arfib a exploré cette voie au cours de différents travaux de recherche [Arfib-1979].

Des sons abstraits sont également présentés dans le catalogue. Grâce à la synthèse de ses **sons paradoxaux**, Jean-Claude Risset a mis en évidence l'opposition entre hauteur spectrale et hauteur tonale. Il a reproduit les illusions de Shepard, en version continue, avec des sons qui semblent monter vers les aigus indéfiniment mais qui, en fait, restent toujours dans le même registre. Il a également réalisé des sons qui paraissent descendre d'un demi-ton lorsque leurs fréquences sont doublées. D'une façon similaire, il a réussi à produire des rythmes qui paraissent ralentir lorsque l'on double leur vitesse.

Le catalogue se termine par des exemples dans lesquels l'harmonie créée par un accord se prolonge en timbre. Ceci est obtenu en faisant évoluer les notes d'un accord vers les partiels d'un spectre.

Ultérieurement, des études réalisées en collaboration avec David Wessel lui ont permis de mettre en évidence certaines des caractéristiques des sons qui permettent de les classer en fonction de notre perception. Le problème des compositeurs vis-à-vis du timbre est dû au fait qu'il ne disposent pas d'échelle de notation, comme c'est le cas avec les autres paramètres musicaux (hauteur, intensité, durée). Les travaux de John Grey, David Wessel et Jean-Claude Risset ont permis de définir plusieurs paramètres fondamentaux du timbre : la brillance (liée à la distribution spectrale de l'énergie), les détails de l'attaque ou la synchronisation/désynchronisation des composantes spectrales [Risset, Wessel—1991].

Par ailleurs, Jean-Claude Risset a souvent dénoncé les faiblesses des techniques de synthèse fonctionnant en temps réel⁴, très à la mode dans les années 80-90. Il considère qu'il est très difficile de produire en temps réel des sons complexes dont les contrôles sont pertinents et que, par ailleurs, construire un dispositif temps réel pour une œuvre — ou une œuvre pour un dispositif temps réel — est un travail très long et délicat qui dépend beaucoup trop de la machine sur lequel il est mis au point.

Pour Jean-Claude Risset, il est encore trop tôt pour utiliser des dispositifs fonctionnant en temps réel dans les processus de synthèse et de traitement. Par contre, en ce qui concerne les processus de composition, il a lui-même fait diverses propositions que l'on peut retrouver dans les pièces qu'il a écrites pour pianiste et ordinateur. Dans « Duo pour un pianiste », l'ordinateur répond au jeu du pianiste. Plusieurs techniques sont utilisées : doublage (ornementations), miroirs (symétries), extensions (arpèges transposés), figures fractales, agrandissements, métronomes, proliférations, résonances.

II.1.4. Les travaux de John Chowning

John Chowning, de l'université Stanford, a commencé à travailler sur le programme Music IV de Max Mathews en 1964. Il disposait d'un ordinateur IBM 7094 connecté à un DEC PDP1 pour la conversion du son numérique vers le son analogique. Son laboratoire à l'université s'étant ensuite équipé de PDP6 puis de PDP10, un chercheur, Dave Poole, programma alors des versions de Music IV pour ces machines : Music 6 et Music 10 et Leland Smith, professeur de musique, écrivit SCORE, programme permettant de produire des listes de notes pour Music 10.

En 1975, John Chowning fonda avec ses collègues le « Center for Computer Research in Music and Acoustics » (CCRMA) à Stanford, devenu depuis l'un des principaux centres mondiaux pour les activités musicales rattachées à l'ordinateur

⁴ « Je considère que le temps réel a trop longtemps joué le rôle d'un miroir aux alouettes, amenant parfois à une régression musicale. On s'étonne de voir des compositeurs soucieux de rigueur formelle s'y abandonner à un empirisme débridé. Séduisant d'emblée par son apparente facilité, le temps réel est difficilement résistible : or il concerne plus l'interprétation et l'improvisation que la composition, laquelle est par nature hors temps. L'utilisation d'un système temps réel à un moment donné est plus fréquemment irréfléchie et stéréotypée, due plus à d'éventuelles possibilités qu'à une nécessité musicale » [Risset-1993, p. 54].

Les travaux de John Chowning aboutirent à la définition de la synthèse par modulation de fréquence⁵ ainsi qu'à la description des principaux algorithmes permettant la spatialisation du son.

A la fois chercheur et musicien, John Chowning écrivit au début des années 70 les pièces « Sabelithe » (1966 et 1971) et « Turenas » (1972) qui illustrent ces recherches. Par la suite, il réalisa « Stria » (1977) pièce dans laquelle il explore les notions d'inharmonicité, la consonance entre sons inharmoniques et l'utilisation du nombre d'or en musique. Chowning explora les possibilités de la synthèse par modulation de fréquence pour la simulation de sons instrumentaux et de la voix chantée. « Phoné » (1981) est l'aboutissement de ces recherches.

A) La synthèse par modulation de fréquence

La synthèse par modulation de fréquence, ou synthèse FM, provient de la formule mathématique suivante :

$$A(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi f_p t + I \cdot \sin(2\pi f_m t))$$

dans laquelle $A(t)$ est l'amplitude instantanée du signal résultant, A_0 l'amplitude de l'onde porteuse, f_p sa fréquence, f_m la fréquence de modulation et I l'indice de modulation, rapport entre la déviation et la fréquence de modulation.

Cette transformation de l'onde porteuse par modulation a pour effet de produire des bandes de fréquence latérale dans le spectre du signal. Le nombre de bandes augmente lorsque l'indice de modulation augmente.

On peut donc exprimer le signal $A(t)$ sous la forme d'une somme.

$$\begin{aligned} A(t) = A_0 \{ & J_0(I) \sin(2\pi f_p t) \\ & + J_1(I) [\sin(2\pi f_p + 2\pi f_m)t - \sin(2\pi f_p - 2\pi f_m)t] \\ & + J_2(I) [\sin(2\pi f_p + 4\pi f_m)t + \sin(2\pi f_p - 4\pi f_m)t] \\ & + J_3(I) [\sin(2\pi f_p + 6\pi f_m)t - \sin(2\pi f_p - 6\pi f_m)t] \\ & + \dots \} \end{aligned}$$

La figure II-2 illustre l'apparition des composants latéraux lorsque l'indice de modulation augmente

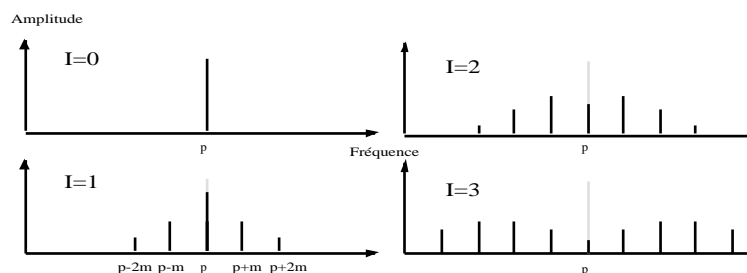


figure II-2 : spectres produits par la modulation de fréquence d'une onde porteuse de fréquence c par une modulante de fréquence m quand l'indice de modulation I augmente.

⁵ John Chowning et l'Université de Stanford vendirent le brevet de la synthèse FM à la firme Yamaha qui l'utilisa pour la construction de ses synthétiseurs de la série DX. Le DX7 est le synthétiseur qui fut le plus vendu dans le monde avec une production de plus de 200 000 exemplaires.

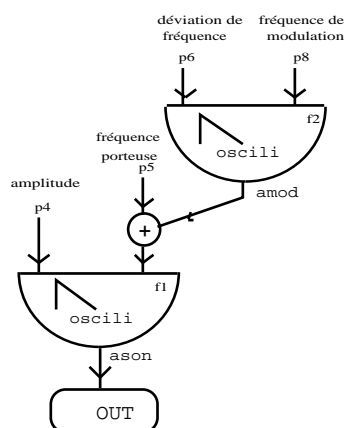


figure II-3 : schéma d'un instrument FM

En 1977, John Chowning a publié un article dans lequel il indique comment utiliser la synthèse FM pour la simulation des cuivres, des bois et des sons de percussions [Chowning-1977(a)]. Dans le cas des cuivres, il montre qu'avec la synthèse FM, il est possible de simuler les phénomènes mis en évidence par Jean-Claude Risset⁶. La modification d'un indice de modulation, couplé à l'intensité du son, permet d'augmenter l'énergie des partiels situés dans une bande de fréquence donnée.

Quelques années plus tard, John Chowning a publié un article décrivant la façon de modéliser une voix chantée par modulation de fréquence [Chowning-1989]. Il donne les valeurs des fréquences et des indices de modulation permettant de reconstruire des spectres comportant les formants de la voix.

B) La spatialisation

En utilisant une diffusion du son quadraphonique, la direction et la distance des sources sonores peuvent être simulées, donnant l'illusion d'une position dans un espace acoustique virtuel. John Chowning est à l'origine d'un des premiers algorithmes de spatialisation du son. Celui-ci prend en compte la diminution de l'intensité perçue lorsque le son s'éloigne, l'augmentation de la réverbération relative et l'effet Doppler [Chowning-1977b].

II.1.5. Le programme Csound de Barry Vercoe

En 1967, en visitant les laboratoires Bell, Barry Vercoe prit connaissance des travaux de Max Mathews. Travaillant au « Massachusetts Institute of Technology » (MIT), il écrivit Music 360 pour les ordinateurs IBM 360 en 1968 et Music 11 pour PDP11 en 1973. Music 11 se transforma en Csound en 1984. Actuellement, Csound, programmé par Barry Vercoe, est certainement le plus répandu des descendants des programmes de Max Mathews.

Csound est disponible sur des plateformes très diverses : Macintosh, compatibles PC, stations Unix.

⁶ Dexter Morrill travailla également dans cette direction [Morrill-1976] et proposa un instrument sophistiqué muni d'une trentaine de paramètres de contrôle. Avec cet instrument, il produisit des sons de cuivres variés ainsi que d'autres types de sons, allant des sons de tuba jusqu'aux sons de flûte en passant par divers sons de percussions. Cinq types de contrôles étaient privilégiés : le contrôle des temps d'attaque et de chute du son ; le contrôle du vibrato ; le contrôle des variations aléatoires à hautes fréquences ; le contrôle des indices de modulation produisant l'apparition de formants dans le spectre ; le contrôle de la déviation de la fréquence centrale.

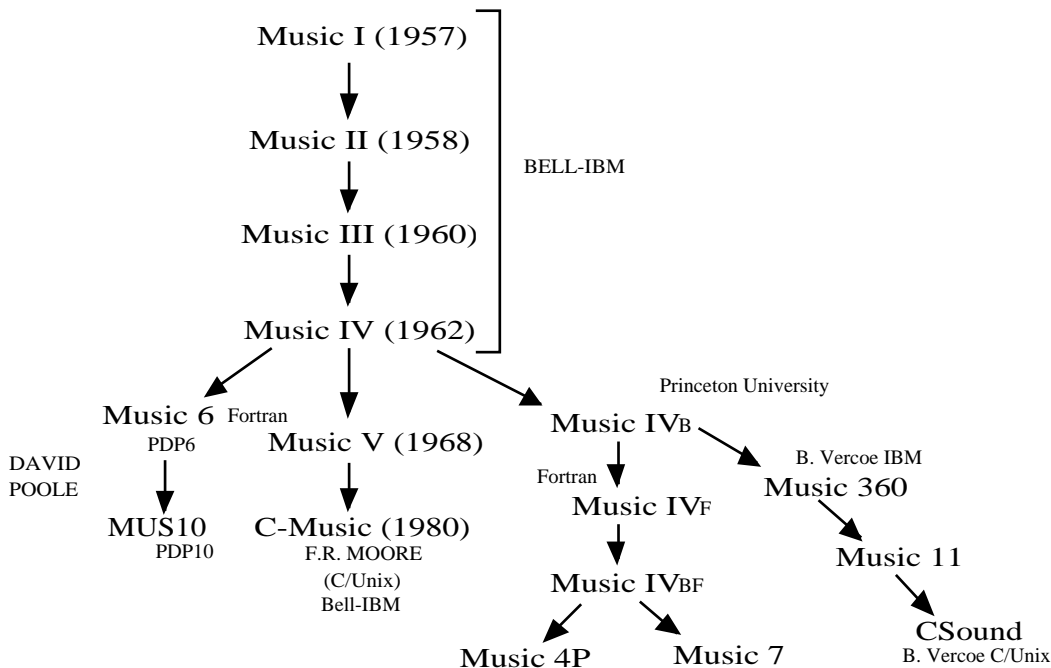


figure II-4 : généalogie des programmes issus de Music I.

A) Les fonctions pour créer des « instruments »

Pour créer des instruments dans Csound, on dispose de fonctions réparties en plusieurs types : conversion de données, entrées et sorties MIDI, génération du signal, transformation du signal, utilisation de données spectrales, entrées et sorties audio et visualisation des données.

Parmi les fonctions de génération du signal, Csound dispose de divers types d'oscillateurs fonctionnant généralement par lecture de tables. La lecture de tables est faite soit périodiquement soit une fois pendant la durée du son. Certaines fonctions, adaptées à des techniques de synthèse particulières, sont plus spécifiques : la fonction « buzz » sert à la production de spectres harmoniques ; la fonction « fof » permet la synthèse par Fof ; la fonction « pluck » est utilisée pour la synthèse de sons percussifs selon la méthode de Karplus-Strong ; la fonction « foscil » utilise deux oscillateurs pour réaliser la synthèse par modulation de fréquence. Des fonctions de génération aléatoire du signal sont également disponibles. Elles permettent entre autres de produire du bruit blanc ou de réaliser des modulations aléatoires.

Csound dispose de nombreuses fonctions de traitement du signal comme les filtres, les retards, les réverbérations et les enveloppes.

Csound permet de réaliser des traitements ou des analyses de fichiers-son. Différentes techniques d'analyses sont disponibles. Par exemple, l'analyse « hetro » décompose un son en une somme de partiels harmoniques qu'elle représente sous forme de fonctions par segments décrivant les fréquences et les amplitudes de ces partiels. Les données obtenues peuvent ensuite être réutilisées par Csound à l'aide du module « adsyn » pour effectuer une resynthèse. L'analyse « lpanal » effectue une analyse par LPC sur le son. Les données obtenues peuvent ensuite être utilisées pour une resynthèse en utilisant le module « lpread ». Le module « pvanal » effectue une analyse en FFT sur le son, dans ce cas, les données obtenues peuvent être utilisées par le module « pvoc » pour une resynthèse.

B) Les tables de données

Les tables sont des tableaux de valeurs construites par le programme lors de la compilation, c'est-à-dire lors de la synthèse d'un son. Le programme va lire dans

les tables les valeurs dont il a besoin pour le calcul du son. Les tableaux peuvent par exemple contenir des listes de fréquences d'harmoniques ou les pas successifs d'une enveloppe ou encore la description d'une forme d'onde.

Une vingtaine de types de tables peuvent être programmés dans les partitions de Csound. Parmi ceux-ci, les types 5 et 7 qui permettent de construire des tables formées d'une succession de segments de courbes respectivement linéaires et exponentielles et les tables de type 9, 10 et 19 qui permettent de construire des formes d'onde d'après la description de leurs caractéristiques spectrales.

C) L'apprentissage de Csound

Le programme Csound dispose d'une documentation rédigée par Barry Vercoe qui est mise à jour au fur et à mesure de l'évolution et de l'enrichissement du logiciel [Vercoe-1994].

Les exemples d'utilisation de ce programme regroupent des travaux de référence ayant été réalisés par des chercheurs et des compositeurs venus d'horizons différents. On y trouve, en particulier, les instruments initialement réalisés sur Music V par Jean-Claude Risset et les principaux instruments de synthèse FM mis au point par John Chowning et codés par Richard Boulanger au Berklee College of Music.

Un catalogue complet, le « Amsterdam Catalogue of Csound Computer Instruments » regroupe tous ces exemples [Gather—1995]. Il s'agit là d'une sorte d'encyclopédie des instruments ayant été réalisés avec Csound.

II.1.6. Les programmes pour le contrôle des partitions Csound

Plusieurs programmes existent pour aider à la programmation des partitions. Ceux-ci adoptent un type d'écriture plus proche de celui de la partition musicale traditionnelle.

Le programme SCORE de Leland Smith permet de créer des partitions en employant des hauteurs et des figures de notes plutôt que des fréquences et des secondes. Il permet également de créer des variations de tempo.

Pour Csound, le programme SCOT permet l'écriture de notes à partir d'une écriture qui s'inspire également de la notation traditionnelle. Il permet de programmer des macro-instructions destinées à contrôler des paramètres dans l'orchestre. Ces paramètres sont choisis à partir des informations contenues dans la partition et relatives aux nuances ou aux modes de jeu.

Ces programmes privilégient une démarche correspond à la programmation d'instruments sophistiqués mais auxquels on ne peut fournir qu'un nombre de paramètres de contrôle limités, ceux qui proviennent de la partition. Ils ne prennent pas en compte le contrôle dynamique des paramètres évoluant avec le temps à l'intérieur de la note.

Dans le chapitre suivant, nous détaillerons une bibliothèque du programme PatchWork servant à produire des partitions pour Csound. Celle-ci permet à la fois d'utiliser des données provenant de partitions musicales traditionnelles ou générées par des courbes, par divers algorithmes ou par des analyses de sons.

II.2. Le projet Chant

Le programme Chant est un outil de synthèse par règles. Il a été construit pour réaliser la synthèse de la voix chantée sur ordinateur à partir de l'étude des phénomènes acoustiques mis en œuvre lors de sa production.

Chant est à la fois une **technique de synthèse** originale et un **modèle de production** sonore.

Chant est conçu pour réaliser la synthèse de sons à partir de dispositifs de contrôle modelés sur le jeu instrumental c'est-à-dire reproduisant l'expressivité, la qualité du timbre, les intonations et les nuances de la voix chantée. Chant permet d'effectuer des corrélations entre les paramètres de la synthèse et d'exercer des contrôles qui dépassent la durée de la note pour s'articuler autour de phrases musicales.

Au-delà de la simulation, le modèle de synthèse de Chant est d'une grande richesse et permet des ouvertures vers d'autres modèles de production de sons.

II.2.1. Historique

Le programme Chant a été mis en œuvre à l'Ircam par l'équipe de Xavier Rodet dans les années 1978-79 [Rodet, Bennett—1980]. Il a été écrit en SAIL sur Dec-PDP10 par Xavier Rodet et Yves Potard en 1979 et a ensuite été traduit en Fortran par Jean Holleville en 1981. La version écrite en Fortran a ensuite été codée sous environnement UNIX sur Dec-VAX780 par Yves Potard et Jan Vandenheede. Le programme « Formes » servait à son contrôle [Rodet, Cointe-1984]. Formes est un système interactif conçu pour la Composition et la Synthèse Musicale qui comprend un langage de programmation « orienté-processus », des algorithmes servant à l'aide à la composition et à la synthèse ainsi que des bibliothèques d'exemples.

En 1989, le synthétiseur Chant a été réécrit en C sous environnement UNIX par Francisco Iovino. Cette nouvelle version apporta la polytimbralité et la polyphonie avec la possibilité de contrôler le synthétiseur par Formes, par Scheme ou par Common Lisp. Chant a alors été porté sur Macintosh où il bénéficie du contrôle par PatchWork.

Pierre François Baisnée a écrit en langage C la méthode d'analyse par « modèle de résonance ». Cette technique permet de décomposer un son percussif en une série moyenne de 50 à 100 résonances. Chaque résonance est qualifiée par sa fréquence, son amplitude et sa largeur de bande, « bandwidth ». Ces données sont directement utilisables pour des synthèses par filtres du second ordre [Potard, Baisnée, Barrière-1986].

Mikaël Laurson a construit une bibliothèque dans PatchWork qui reporte l'essentiel des fonctions de Chant-Formes dans un environnement graphique et modulaire : Chant-PW [Iovino, Laurson, Pottier-1994]. Le portage des fonctions d'interpolation de Chant-Formes dans Chant-PW a été réalisé en 1992 [Pottier-1993].

Chant existe sur de nombreuses plates-formes, y compris sur des plates-formes où il peut être contrôlé en temps réel. Des versions fonctionnant en temps réel ont été implémentées en 1981 sur la machine 4C par Xavier Rodet et Yves Potard, puis en 1987 sur un processeur Mercury en périphérique UNIX sur ordinateur SUN par Xavier Rodet et Gerhard Eckel.

En 1995, une version a été mise au point par Gerhard Eckel et Francisco Iovino sur la Station d'Informatique Musicale de l'Ircam. En 1998, cette version a

été portée sur Max/MSP par Francisco Iovino ce qui permet à Chant de fonctionner à nouveau sur le Macintosh.

En 1999, le programme Chant ainsi que l'analyse par Modèle de Résonance ont été portés sur le logiciel Diphone [Dudas—1997] fonctionnant sur ordinateur Macintosh.

Adrian Freed et Tristan Jehan ont réalisé au CNMAT sous Max/MSP un ensemble de modules intitulé « Resonator », permettant de réaliser la synthèse par résonance et pouvant lire des modèles de résonances. Ces modules sont l'adaptation d'un travail réalisé par Adrian Freed avec Jean-Baptiste Barrière et Pierre-François Baisnée en 1989 à San Diego et Berkeley pour le synthétiseur « Reson8 » (multi-dsp à base de processeurs 56000) qui implémentait les modèles de résonance en temps-réel et qui était contrôlé alors par le programme Max. Cette version a été utilisée pour la première fois dans le ballet « Maa » (1991) de Kaija Saariaho.

II.2.2. Le modèle de production

Le synthétiseur Chant repose sur la modélisation des processus de transformation par le conduit vocal des sons émis par la glotte.

A) Les résonateurs

L'ensemble des résonateurs auquel on peut assimiler le conduit vocal peut être décrit par une fonction de transfert. Celle-ci correspond au spectre qu'on obtiendrait en envoyant du bruit blanc dans les résonateurs.

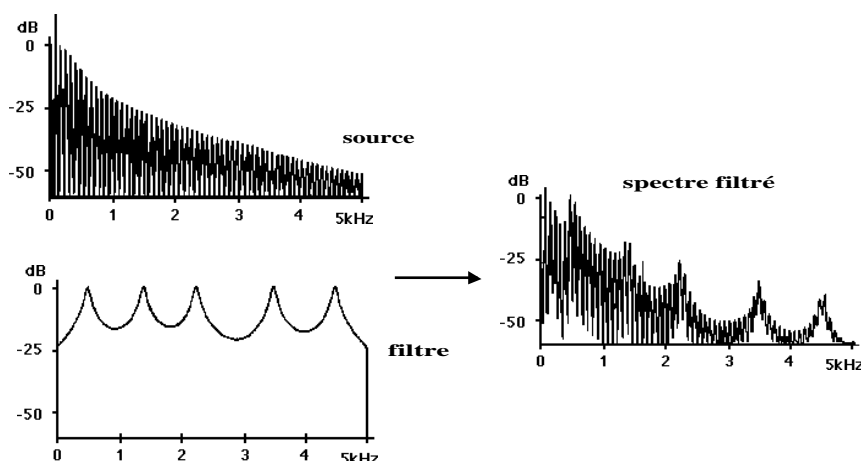


figure II-5 : spectre du son à filtrer - source - et fonction de transfert du filtre (à gauche), spectre du son filtré (à droite).

Cette fonction de transfert est caractéristique de la voix utilisée ainsi que de la voyelle prononcée. Les fonctions de transfert des voyelles de la langue française sont décrites dans Chant par cinq formants, correspondant aux maxima de la fonction de transfert du conduit vocal. Les principaux paramètres d'un formant sont sa fréquence centrale, son amplitude et sa largeur de bande. La figure II-6 représente les fréquences centrales des différents formants des voyelles de la base de données standard du synthétiseur Chant.

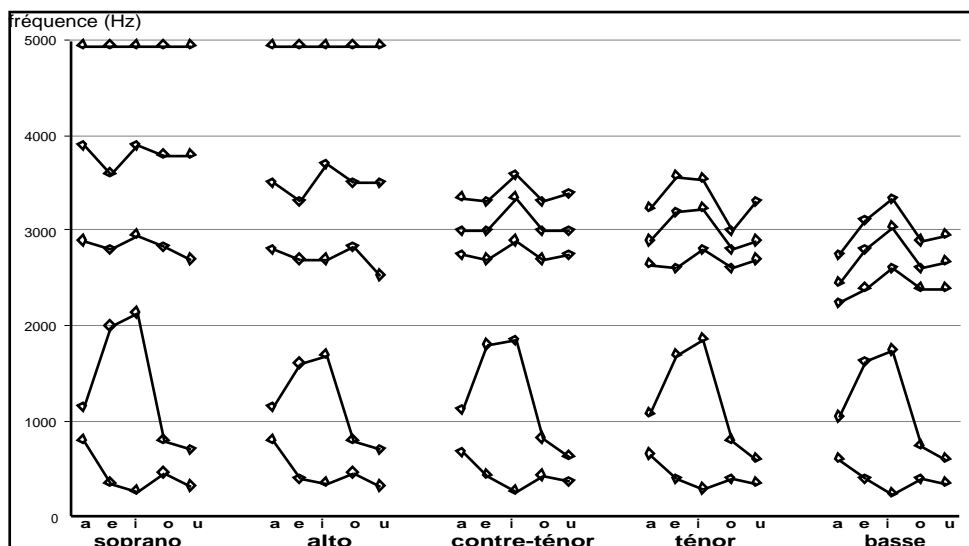


figure II-6 : fréquences des cinq formants pour les voyelles de différents types de voix chantée (base de données de Chant)

B) Les sources sonores vocales

Lors de la production de sons vocaux, trois types de perturbations acoustiques peuvent être à l'origine de la production du son : pour les sons voisés, la vibration des cordes vocales produit un son pratiquement périodique ; pour les fricatives, ce sont les rétrécissements de la cavité buccale qui provoquent des turbulences et produisent un son non-périodique bruité ; pour les plosives, une interruption suivie d'un brusque relâchement du flot d'air provoque un bruit d'explosion.

Les sons voisés sont les plus simples à modéliser car ils peuvent être simulés à l'aide d'un train d'impulsions. Les autres sons peuvent être modélisés en utilisant un générateur de bruit muni d'une enveloppe d'amplitude.

II.2.3. La synthèse par Filtrés

La technique de synthèse la plus proche du modèle « excitation-résonance » est la synthèse soustractive. Elle est réalisée en utilisant des filtres, de façon à modifier le spectre des fréquences d'un son-source.

Un filtre complexe peut être représenté par sa fonction de transfert dite « transformée en z » qui reproduit les effets des retards produits par les filtres dans une représentation du domaine des fréquences à deux dimensions appelée le plan complexe z . La transformée en z d'un signal discret $x(n)$ est définie par :

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}$$

où z est une variable complexe.

L'équation du filtre peut s'écrire sous la forme suivante :

$$H(z) = \frac{\beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_q z^{-q}}{1 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_p z^{-p}} = \sum_{i=1}^n c_i \frac{1 + d_i z^{-1}}{1 + a_i z^{-1} + b_i z^{-2}}$$

p est le nombre de pôles de la fonction de transfert, q son nombre de zéros, a et b déterminent la fréquence centrale du filtre et sa largeur de bande, c donne l'amplitude du filtre et d son inclinaison.

Dans le dernier terme de l'équation, la fonction de transfert est égale à la somme de n filtres du second ordre disposés en parallèle. Cette représentation

permet de contrôler de façon simple les caractéristiques intéressantes de l'enveloppe du spectre.

Lorsque la source à filtrer est une succession d'impulsions, la réponse du filtre complexe est égale à la somme des réponses des filtres individuels.

$$S(k) = \sum_{i=1}^n s_i(k)$$

Les fonctions $s_i(k)$ sont appelées « fonctions d'ondes formantiques partielles » ou Fof. Une Fof est une fonction temporelle délivrant un signal dont le spectre possède un maximum local correspondant à un formant. Il s'agit en fait d'une onde sinusoïdale à décroissance exponentielle.

II.2.4. La synthèse par Fof

Plutôt que d'employer des filtres, Chant utilise la synthèse par Fof qui consiste à additionner des signaux élémentaires correspondant à la réponse impulsionnelle de filtres du second ordre.

Les Fof utilisées pour le synthétiseur Chant correspondent à la réponse des filtres à une impulsion en forme d'arche. Elles sont décrites par la formule suivante :

$$s(t) = 0 \text{ pour } k < 0$$

$$s(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\Pi t}{tex}\right) e^{-\alpha k} \sin(2\Pi f t + \varphi) \text{ pour } 0 < k < tex$$

$$s(t) = e^{-\alpha k} \sin(2\Pi f t + \varphi) \text{ pour } k > tex$$

f donne la fréquence de la Fof ou fréquence centrale du formant, α est la largeur de bande du formant, mesurée pour une amplitude de -6 dB sous l'amplitude maximale du formant et tex donne la largeur du formant à -40 dB sous l'amplitude maximale du formant (largeur des jupes).

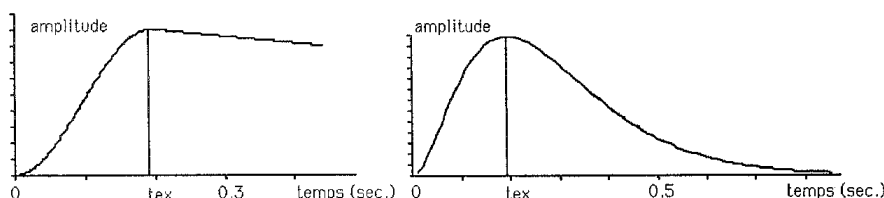


figure II-7 : enveloppes d'amplitude d'une Fof ; à gauche, $\alpha = 0,1$, à droite, $\alpha = 10$

Pour produire un son continu de fréquence fondamentale f_0 , les différentes Fof sont déclenchées périodiquement, à la fréquence f_0 .

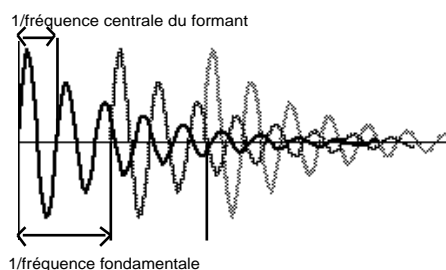


figure II-8 : déclenchement périodique d'une Fof

En théorie la durée d'une Fof est infinie. En pratique, dans Chant, les Fof sont soumises à une atténuation linéaire dont la durée est donnée par le paramètre « atten ». Cette atténuation survient après un temps donné par le paramètre « debatt » pour éviter des recouvrements trop importants des Fof successives. Par

défaut, les valeurs de « tex », « atten » et « debatt », exprimées en seconde, prennent respectivement les valeurs 0,002, 0,002 et 0,01.

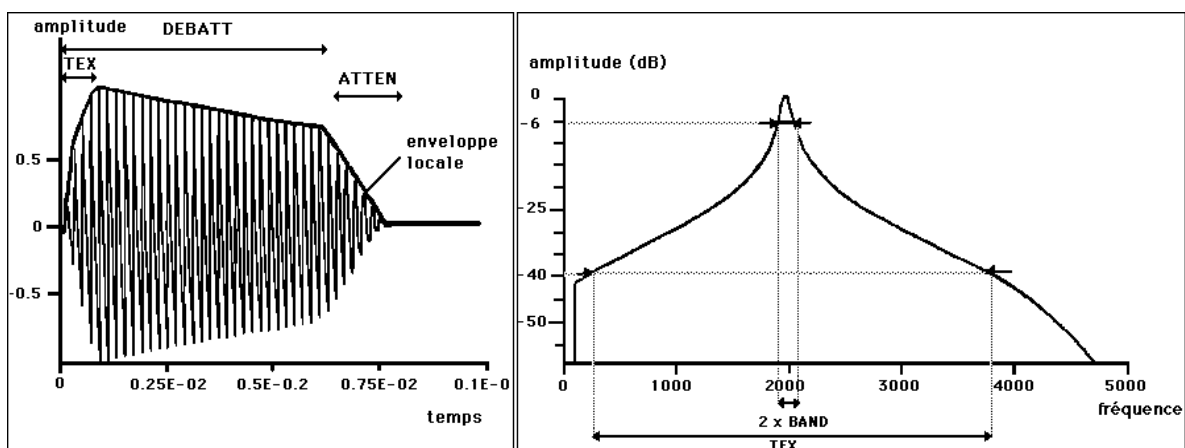


figure II-9 : représentation temporelle (à gauche) et spectrale (à droite) d'une Fof

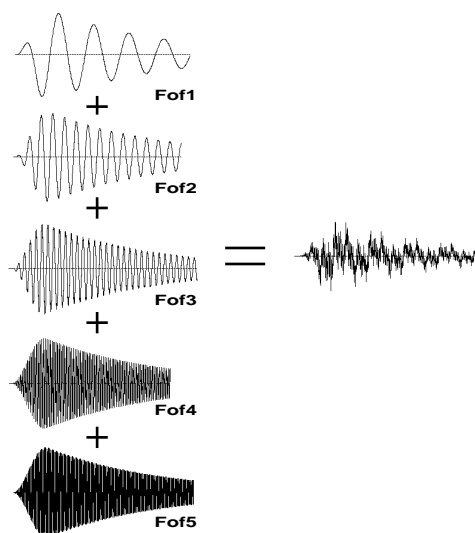


figure II-10 : addition de 5 Fof produisant un signal complexe

II.2.5. Les règles de synthèse de Chant

Chant est « le synthétiseur le plus simple à manier qui soit » [Baisnée-1985, p. 1]. En effet, il permet de produire un son complexe imitant une voix chantée en validant simplement un ensemble d'instructions. Les différentes règles de contrôle de Chant sont automatiques ou disposent par défaut de valeurs cohérentes pour la production de sons vocaux. Pour produire un son musical, il suffit d'indiquer le type de voix souhaité ainsi que la liste des notes à produire, spécifiées chacune par leur hauteur, leur durée et leur intensité.

Autour d'un synthétiseur par Fof, Chant regroupe tout un dispositif de contrôle de la synthèse. Ce dispositif est formé d'un assemblage de règles contrôlant l'enveloppe spectrale du son, l'enveloppe d'amplitude et les variations de la fondamentale. Les différentes règles, décrites ci-dessous, ont été établies d'après des études théoriques et expérimentales. Parmi ces règles, il faut faire une distinction entre les règles automatiques et les autres algorithmes de contrôle.

Les règles automatiques évitent à l'utilisateur d'effectuer le calcul des paramètres des formants et leur fournissent automatiquement des valeurs cohérentes qui sont calculées en fonction de la partition fournie au synthétiseur.

Les autres algorithmes concernent le vibrato, les microvariations du son et les enchaînements de notes. Ces outils de contrôle du son contiennent des valeurs par défaut, satisfaisantes pour des synthèses réalistes, qui peuvent être modifiées par l'utilisateur selon le résultat souhaité.

L'utilisateur peut également programmer ses propres règles de contrôle des paramètres.

Chant dispose d'une base de données provenant de l'analyse de la voix chantée. Elle contient les différentes voyelles correspondant aux principaux types de voix chantées (cf. figure II-6).

II.2.5.1. Contrôle du timbre

Le contrôle du timbre s'effectue en exerçant des variations sur l'enveloppe spectrale par modification des fréquences centrales, des largeurs de bande et des amplitudes des différents formants dont elle est constituée.

A) Fréquences des premiers formants

Pour des notes situées dans des registres aigus, principalement dans le cas des voix féminines, on peut observer que les fréquences des deux premiers formants sont modifiées et suivent les mouvements de la fréquence fondamentale lorsque celle-ci monte et pourrait dépasser la fréquence du premier formant [Sunberg-1987].

La fréquence du premier formant est placée automatiquement un demi-ton au-dessus de la fondamentale lorsque celle-ci prend des valeurs qui pourraient lui être supérieures.

Pour les voyelles « a », « o » et « u » le deuxième formant a une fréquence centrale peu élevée. Lorsque la fondamentale dépasse un certain seuil, la fréquence de ce formant se place une octave et un ton au-dessus de la fondamentale. Pour « e » et « i » dont le deuxième formant est théoriquement supérieur à 1300Hz, la fréquence du second formant décroît linéairement quand la fondamentale dépasse 200Hz.

$$freq_2 = freq_2 - \frac{2}{3}(f_0 - 200) \frac{(freq_2 - 1300)}{700} \text{ pour } freq_2 \geq 1300 \text{ et } f_0 \geq 200$$

Dans Chant, les corrections des fréquences des deux premiers formants effectuées en fonction de la valeur de la fondamentale sont réalisées par la fonction « auto-bend ».

B) Largeurs de bande des formants

Les largeurs de bande des formants varient en fonction de leur fréquence centrale suivant une courbe parabolique [Baisnée-1985, p. 33].

La fonction « auto-bw » est une règle de calcul qui permet de calculer ces largeurs de bande selon la loi suivante :

$$bw_i = 471 - 138,6 \ln(freq_i) + 12,04 \ln(freq_i)^2$$

Les paramètres de cette règle peuvent être modifiés par l'utilisateur.

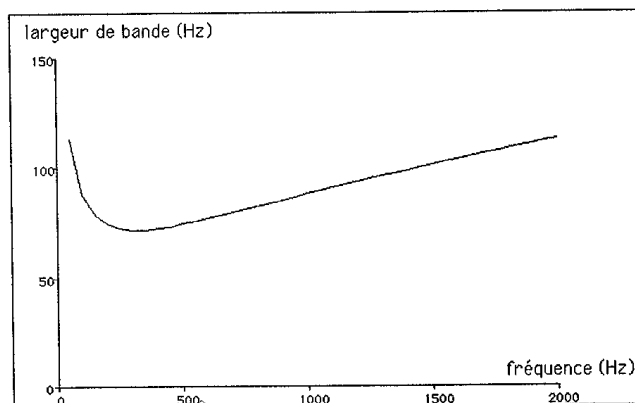


figure II-11 : calcul automatique des largeurs de bande des formants en fonction de leur fréquence

C) Amplitudes des formants

Les amplitudes des différents formants déterminent le timbre de façon prépondérante. Plusieurs règles sont impliquées dans le contrôle de ces paramètres.

La règle « auto-amp » peut être utilisée pour calculer les amplitudes des formants en fonction de leur fréquence, de leur largeur de bande et des caractéristiques des autres formants.

Elle calcule les amplitudes des formants selon une loi inversement proportionnelle à leur fréquence et prend en compte les interactions qui peuvent exister entre les formants qui se renforcent mutuellement quand ils sont proches les uns des autres.

Selon l'intensité avec laquelle le chanteur émet un son, la qualité du signal produit par les cordes vocales est différente. Lorsque le son est fort, il est beaucoup plus riche en hautes fréquences. Un phénomène similaire est observé dans les aigus. Dans ces deux cas, les fonctions automatiques contrôlent les amplitudes des formants.

Une seconde règle, « amp-corr », décrit l'effort vocal. Elle est appliquée pour corriger les valeurs des amplitudes des formants en prenant en compte les paramètres suivants : le type de voix, la fréquence fondamentale moyenne du registre de la voix, la fréquence fondamentale et l'amplitude de la note jouée.

Un formant complémentaire peut être ajouté pour renforcer le premier formant et donner au son plus de puissance dans les fréquences graves.

II.2.5.2. Fluctuations de la fondamentale

Le vibrato a un effet d'une importance capitale dans la synthèse par formant. Il agit sur la fondamentale de la voix qu'il modifie de façon indépendante des mouvements des formants. Cela crée une sorte de balayage des formants et renforce leur identité pour la perception auditive (exemple sonore n°11).⁷

Dans Chant, on peut appliquer deux sortes de vibratos sur la fondamentale.

Habituellement, le vibrato est produit par une oscillation sinusoïdale de la fréquence fondamentale autour d'une valeur centrale. Les paramètres du vibrato sont sa fréquence d'oscillation, généralement comprise entre 4 et 8 Hz et son

⁷ Ce phénomène distingue la synthèse par Fof de la synthèse par forme d'onde et de la synthèse additive. Ces deux dernières techniques permettent également de produire des sons présentant des formants mais lorsqu'un vibrato est ajouté sur la fondamentale, il affecte aussi les fréquences des formants ce qui ne permet pas de simuler un système « source-filtre » de façon cohérente.

amplitude, généralement située entre 1 et 10 % de la fréquence de la fondamentale.

Le vibrato « voice-vibra » est plus élaboré. Il dispose de deux doubles « jitters » qui produisent des variations aléatoires de son amplitude et de sa fréquence.

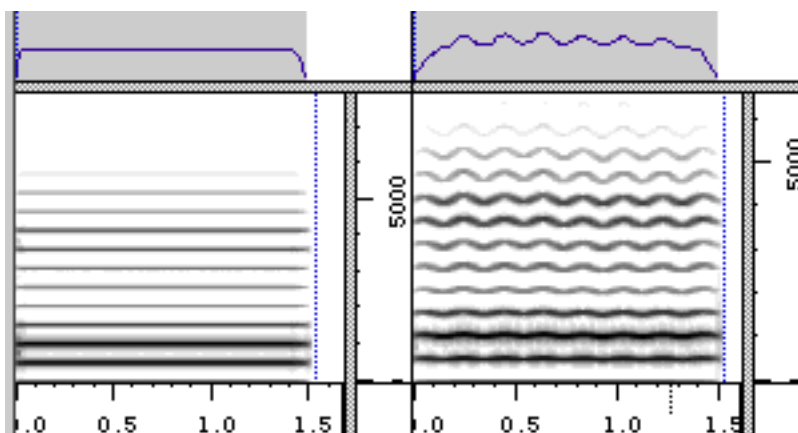


figure II-12 : sonagrammes de deux sons de synthèse reproduisant une voix de soprano, à gauche sans vibrato, à droite avec vibrato.

II.2.5.3. L'enveloppe d'amplitude du son

La fonction « enveloppe » génère des valeurs qui décrivent l'enveloppe temporelle d'une note isolée de voix chantée. Cette enveloppe est formée de trois parties : une attaque, une partie stable et une chute. Chaque partie est produite par une portion de fonction sinusoïdale.

Cette fonction comporte 8 paramètres : *dstac*, *datt*, *dext*, *rapport*, *ampini*, *ampfin*, *offset*, *durnote*.

La durée totale de l'enveloppe, intitulée *durenv*, est définie par rapport à la durée de la note, *durnote*. Elle varie en fonction du paramètre *dstac* de la façon suivante :

$$durenv = dstac * durnote$$

dstac indique la durée relative de l'enveloppe par rapport à la figure rythmique de la note écrite dans la partition. Si la valeur de *dstac* est inférieure à 1, un silence interviendra entre la fin de l'enveloppe et la fin de la note. *datt* donne le rapport entre la durée de l'attaque et la durée de l'enveloppe. Le paramètre *dext* donne le rapport entre la durée de la chute et la durée de l'enveloppe.

A la fin de l'attaque débute la phase stable qui est en fait une phase croissante puis décroissante. Les variations en amplitude de cette partie de l'enveloppe sont déterminées par *ampini* et *ampfin*. Si ces deux valeurs sont nulles, l'amplitude de cette partie est constante.

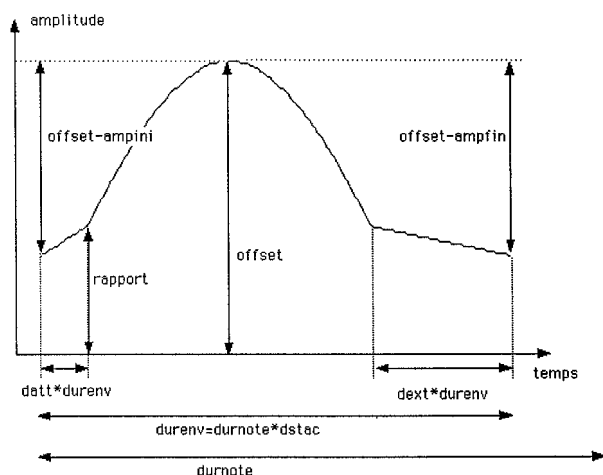


figure II-13 : enveloppe d'un son produit par le module « enveloppe ».

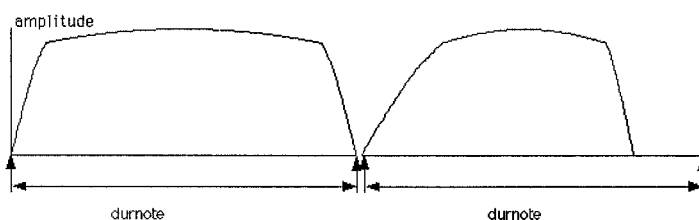


figure II-14 : exemples d'enveloppes produites par le module « enveloppe ».
A gauche : enveloppe par défaut, à droite : diminution de la durée de l'enveloppe (*dstac*) et augmentation de la durée de l'attaque (*datt*).

II.2.5.4. Paramètres d'articulation

Certaines règles prennent en compte des informations concernant les notes qui encadrent la note concernée. Cela permet de réaliser des enchaînements de notes cohérents dans une phrase musicale.

A) Le portamento

Des règles permettent l'enchaînement des notes successives en réalisant des glissandos. Ces glissandos sont produits par des fragments de courbes sinusoïdales.

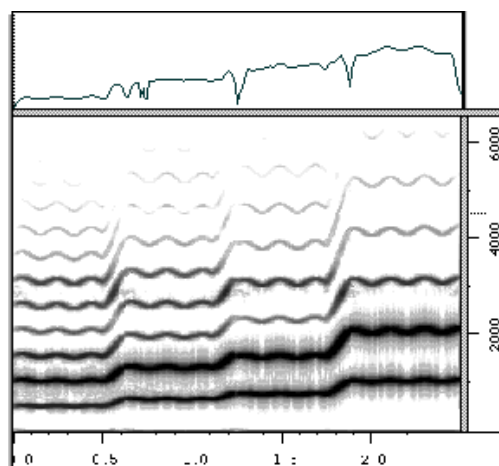


figure II-15 : sonagramme d'une mélodie de voix chantée synthétisée par Chant avec un portamento (exemple sonore n°12).

B) L'interpolation de voyelles

Des transitions entre les différentes voyelles peuvent être réalisées par l'interpolation des fréquences des formants.

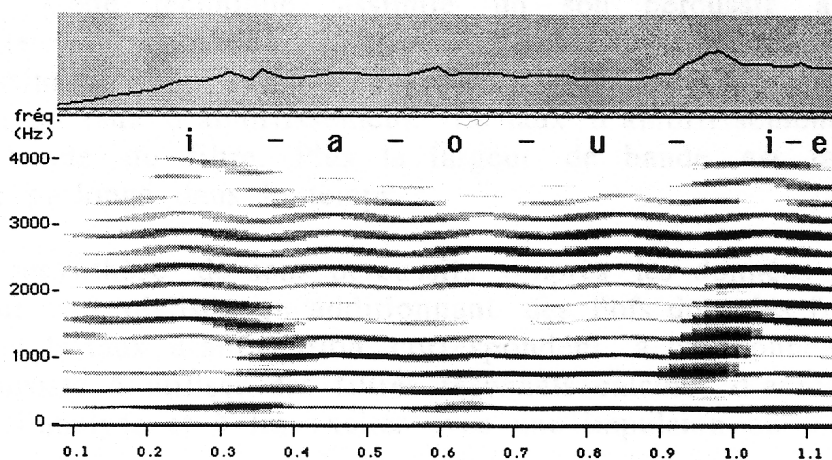


figure II-16 : transitions entre plusieurs voyelles par interpolation des fréquences des formants (exemple sonore n°13).

C) L'octavation

On dispose dans Chant d'une règle contrôlant une octavation du son en réalisant un contrôle séparé des amplitudes des harmoniques pairs et impairs. Cette règle permet un jeu sur la rugosité du son et crée des ambiguïtés sur sa hauteur.

II.2.6. La synthèse des consonnes

Pour la synthèse de sons bruités, comme ceux produits lors de l'émission de certaines consonnes, Chant a été pourvu d'une source de bruit blanc et d'une technique de synthèse par filtres. Il est ainsi possible de mélanger la technique de synthèse par Fof à la technique de synthèse par filtres. Par contre, aucune règle ne permet actuellement de produire des consonnes de façon automatique. Seule l'utilisation de techniques d'analyse sophistiquées donne accès aux informations permettant de telles resynthèses [d'Alessandro, Rodet-1989].

II.2.7. La synthèse par « modèle de résonance »

En dehors de la voix, de nombreux instruments de musique produisent des sons sur un modèle « excitation-résonance ». C'est bien sûr le cas des instruments de percussion mais c'est aussi celui de beaucoup d'autres instruments pour lesquels la caisse de résonance de l'instrument joue un rôle important dans la caractérisation du timbre.

Les travaux de l'équipe de Jean-Baptiste Barrière réalisés entre 1984 et 1986 ont mis en évidence de nouvelles potentialités du synthétiseur Chant pour la synthèse de sons à partir de modèles instrumentaux [Barrière, Potard, Baisnée—1985].

Cette utilisation du programme Chant correspond à un nouveau mode de synthèse, la synthèse par « modèle de résonance ».

II.2.7.1. La modélisation d'instruments percussifs

Dans le chapitre I, nous avons détaillé la technique d'analyse de sons instrumentaux percussifs par la méthode des « modèles de résonance ». Cette technique modélise un son percussif par la réponse impulsionnelle d'un ensemble de filtres résonants du second ordre. Chaque filtre représente une résonance caractérisée par une fréquence, une amplitude et un taux d'amortissement. Le taux d'amortissement est lié à la largeur de bande du filtre. Plus la largeur de bande est faible, plus la résonance se prolonge dans le temps.

La resynthèse de sons percussifs d'après les données extraites par l'analyse peut être réalisée en additionnant des Fof dont les fréquences, les amplitudes et le taux d'atténuation correspondent à ces données. Une autre technique consiste à utiliser des filtres résonants calculés d'après les données fournies par l'analyse et à les exciter avec une impulsion ou « dirac ».

II.2.7.2. La synthèse de sons entretenus

Dans le cas de la synthèse par Fof, si l'on répète les déclenchements des Fof à une fréquence de quelques Herzs, on peut obtenir des rythmes. Si la vitesse de répétition augmente, on passe du domaine du rythme au domaine des hauteurs. On peut réaliser des effets imitant ceux produits par un archet sur un instrument à corde ou ceux produits par les mouvements de la anche d'un instrument à vent. La vitesse de répétition, comme pour la synthèse de la voix, donne la hauteur de la note.

Pour la synthèse par filtrage, les possibilités sont plus étendues puisque n'importe quelle source sonore peut faire office d'excitateur et déclencher les filtres. Il peut s'agir d'une **excitation périodique**, comme une succession d'impulsions, d'une synthèse par Fof entretenues, d'un fichier-son de hauteur donnée ou d'une **excitation bruitée** comme une source de bruit blanc ou un fichier-son de nature complexe.

L'utilisation d'enveloppes modulées périodiquement en amplitude sur du bruit blanc permet, par exemple, de simuler un excitateur de type archet [Potard, Baisnée, Barrière-1991, p. 155].

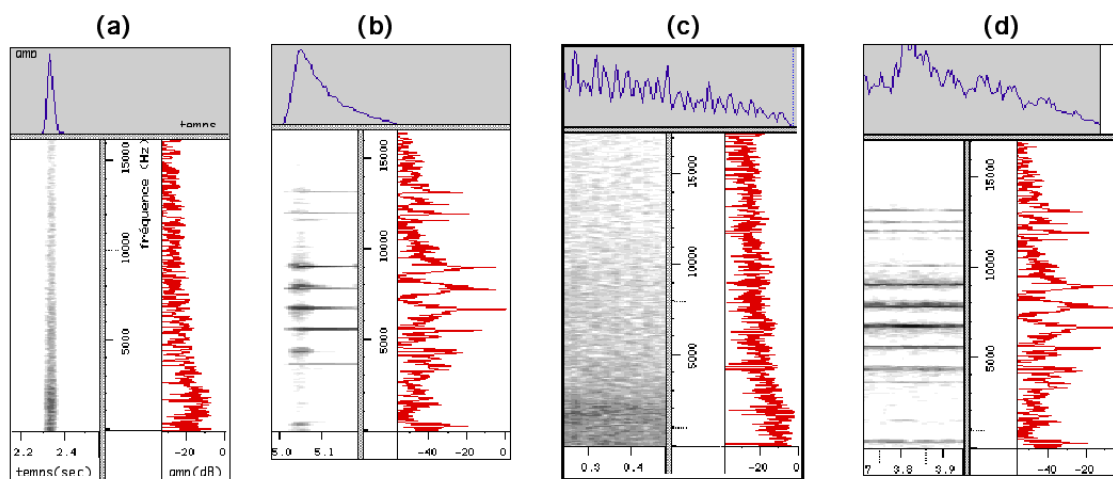


figure II-17 : filtrages de bruit par un modèle de tamtam

a) impulsion de bruit, b) impulsion de bruit filtré

c) bruit continu, d) bruit continu filtré (exemple sonore n°14).

II.2.7.3. Caractéristiques de la synthèse par « modèle de résonance »

La technique de synthèse par « modèle de résonance » combine les possibilités de contrôle provenant de différentes techniques de synthèse à la frontière desquelles elle se situe.

La synthèse par modèle de résonance peut être assimilée à une synthèse additive dans la mesure où elle additionne des signaux sinusoïdaux de différentes fréquences. Comme ces signaux ont tous des taux d'amortissement différents, le spectre du son change en permanence et d'une façon qui ne semble pas artificielle. De la synthèse additive, la synthèse par Fof garde la simplicité de mise en œuvre, la pertinence des paramètres affectant la perception auditive et une certaine généralité.

La synthèse par modèle de résonance s'apparente aussi à la synthèse soustractive puisqu'elle peut être réalisée en employant des filtres. A ce titre, elle permet de simuler le découplage entre l'excitation et la résonance. Elle offre de nombreuses possibilités de contrôle du timbre par la modification des paramètres des filtres. Elle permet en outre de réaliser des synthèses croisées ou des hybrides entre son-source et son filtrant.

Sans être une technique de synthèse par modèle physique, la synthèse par modèle de résonance repose sur l'étude des propriétés acoustiques des instruments de musique et en particulier sur des informations concernant leurs modes de vibration. Les données fournies par l'analyse par modèle de résonance peuvent d'ailleurs être utilisées par un programme de synthèse physique modale comme Modalys [Adrien-1990].

Enfin, la synthèse par modèle de résonance est également apparentée à la synthèse granulaire car on peut assimiler les Fof à des « grains sonores ». La généralisation de la synthèse par Fof, en utilisant à la place de l'onde sinusoïdale des formes d'onde variées provenant de sons échantillonnés, a permis la réalisation du synthétiseur granulaire GIST⁸ à l'Ircam[Rocha, Eckel-1995].

Une des caractéristiques les plus intéressantes de la synthèse par modèle de résonance tient au fait que peu de données suffisent à réaliser une bonne description d'un modèle instrumental complexe.

Cette méthode permet en outre de décrire une grande diversité de sons instrumentaux.

L'utilisation des règles de synthèse dans Chant permet d'obtenir des variations infinies à partir d'un même modèle. Des règles spécialisées permettent des transitions, des hybridations et des interpolations d'un modèle vers un autre.

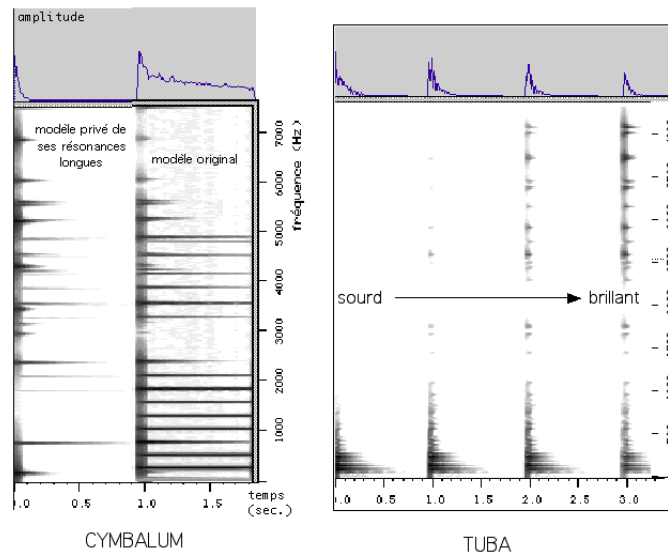
II.2.7.4. Contrôle de la synthèse par « modèle de résonance »

Des opérations comme la transposition sont faciles à réaliser sur un modèle de résonance puisque la transposition correspond simplement à une multiplication des fréquences des résonances. Ainsi, avec les analyses de quelques notes de différentes hauteurs jouées par un même instrument, on peut reconstituer par transposition tout l'ambitus de cet instrument, comme sur un échantillonneur, mais sans altérer les durées des sons.

La modification de la durée de résonance peut s'effectuer très facilement, sans modifier la hauteur du son. Il suffit de faire varier le taux d'amortissement des résonances. Cela peut être effectué avec des écarts importants sans que le son perde pour autant de sa consistance. A titre pédagogique, nous avons, par exemple, allongé de dix à vingt fois la durée de sons de tuba et de marimba et obtenu des sons musicalement fort intéressants.

Le timbre est une caractéristique du son que l'on peut modifier de différentes façons avec la synthèse par modèle de résonance. Certaines règles permettent de modifier l'enveloppe spectrale pour rendre le modèle plus brillant ou plus sourd. Des règles permettent de renforcer l'attaque du son en atténuant les résonances les plus longues. D'autres règles peuvent être utilisées pour renforcer ou atténuer le caractère harmonique des sons. En élargissant la largeur de bande des filtres, le son-source est moins filtré et reste nettement perceptible. En la réduisant, il ne subsiste que le contour rythmique du son-source, le timbre devient celui du modèle ayant servi au calcul des paramètres des filtres.

⁸ GIST = Granular Synthesis Toolkit



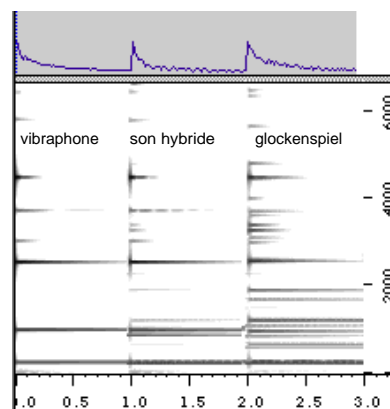
*figure II-18 : contrôle du timbre de modèles de résonance
à gauche : suppression des résonances longues d'un son de cymbalum
à droite : augmentation des amplitudes des partiels de fréquences élevées
(exemples sonores n°19 et 20).*

II.2.7.5. Les hybridations et interpolations

Plusieurs types de mélanges peuvent être réalisés entre les modèles.

L'hybridation est un mélange statique de plusieurs modèles. Les paramètres du modèle hybride ont des valeurs intermédiaires entre les valeurs des modèles dont il est issu. Ce calcul est réalisé par appariement des résonances communes aux différents modèles et par mixage des autres résonances. Il est également possible d'échanger les valeurs des paramètres des modèles entre elles. Par exemple, on peut réaliser un son dont les fréquences et les amplitudes sont celles d'un tuba et la durée de résonance celle d'un gong.

L'interpolation produit un son qui est un mélange dynamique entre des modèles. Le son commence à partir d'un modèle donné et se termine sur un autre modèle. Les paramètres sont progressivement interpolés entre les valeurs du modèle de départ et celles du modèle d'arrivée.



*figure II-19 : hybridation entre un son de vibraphone et un son de glockenspiel
(exemple sonore n°21).*

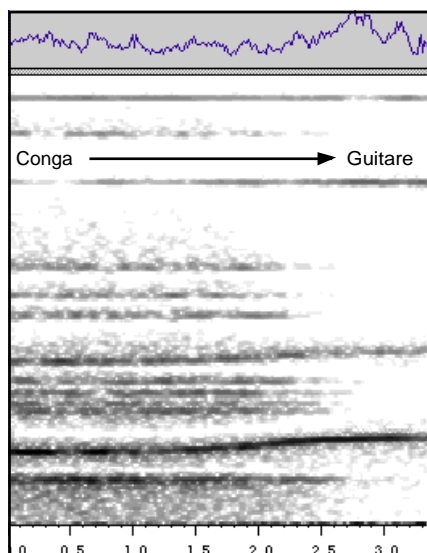


figure II-20 : interpolation entre un modèle de conga et un modèle de guitare lors d'une synthèse par filtrage de bruit blanc

Un croisement est réalisé en filtrant un son par le modèle d'un autre son. Pour qu'un croisement fonctionne, il est important que les spectres des deux modèles présentent de l'énergie dans des zones communes.

Des extrapolations peuvent également être réalisées autour de deux modèles en prenant des valeurs inférieures à zéro ou supérieures à un comme indices d'interpolation ou d'hybridation entre ces deux modèles.

Enfin, on parle d'abstraction lorsque la transformation des modèles par extrapolation ne permet plus la reconnaissance de ces modèles.

II.3. Conclusion sur les programmes de synthèse

Les outils que nous venons de décrire permettent de produire des sons par ordinateur selon une technique que Jean-Claude Risset qualifie à la fois de « **synthèse directe** » puisque le son calculé par l'ordinateur est transmis directement vers les haut-parleurs, de « **synthèse intégrale** » puisque le son est décrit dans son intégralité et de « **synthèse logicielle** » puisque c'est un logiciel informatique qui permet le calcul du son [Risset-1996a, p. 270].

Dans ce domaine, Csound et Chant représentent deux types d'outils de synthèse aux concepts opposés. Csound est un compilateur très général mais qui demande un travail important pour construire des instruments et apprendre à les contrôler. A l'inverse, Chant est un outil déjà « prêt à l'emploi » qui offre beaucoup de liberté pour l'extrapolation des modèles qu'il met en œuvre.

Chant est un des synthétiseurs les plus efficaces existant à l'heure actuelle. Il a l'avantage de permettre une représentation d'instruments complexes avec des moyens très réduits. D'un point de vue analyse/synthèse, il permet de représenter le son d'une façon spectrale en donnant à la fois les fréquences, les amplitudes des partiels et, ce qui est plus exceptionnel, leurs durées c'est-à-dire leur évolution dans le temps.

De plus, un certain nombre de règles sont disponibles. Elles permettent de s'écarter des modèles afin de produire des sons très variés. Parmi ces règles, on peut citer les techniques de vibrato sur la fondamentale, les règles de transposition, de modification globale des largeurs de bandes, les règles d'interpolation et d'hybridation entre les modèles et des règles déformant beaucoup plus le son comme le processus de cymbalisation. Ce dernier type de processus permet à l'aide d'un nombre réduit de paramètres de s'éloigner d'un modèle en créant des sons entièrement nouveaux tout en rappelant des

mécanismes physiques (diffraction des fréquences dans les cymbales, raclement métallique). Ce type d'algorithme permet de créer des sons en pensant plus en termes de processus qu'en termes de spectres, de notes ou d'instruments. L'étude de la pièce « Hybris » dans le chapitre IV illustrera l'utilisation de toutes ces règles.

La synthèse par règles mise en œuvre dans le synthétiseur Chant est une technique très séduisante mais l'élaboration de nouvelles règles et leur contrôle dynamique sont trop complexes pour être gérés par le synthétiseur lui-même. Ce problème se retrouve avec la plupart des programmes à vocation générale pour lesquels on approche d'un degré de complexité extrême quand on veut effectuer le moindre changement. A un certain stade, cet état de fait bloque le développement du programme. Pour des applications avancées, la plupart des synthétiseurs fonctionnant sur ordinateur ont besoin de programmes issus de l'intelligence artificielle et permettant la programmation par objet. Les programmes les plus utilisés ont été écrits avec le langage Lisp : **Formes** [Rodet-1985], **Common Lisp Music** [Taube-1989], **Ny-Quist** [Dannenberg-1997], **PatchWork** [Laurson-1996a] ou **OpenMusic** [Agon-1998].

Dans le prochain chapitre, nous décrirons l'utilisation du programme PatchWork pour le contrôle de Csound et de Chant avant d'indiquer dans les chapitres suivants comment ce type de programme a pu être utilisé lors de la réalisation de pièces musicales.

II.	LES OUTILS INFORMATIQUES POUR LA SYNTHÈSE SONORE-----	61
II.1.	De Music I à Csound : les grands événements-----	61
II.1.1.	Introduction.....	61
II.1.2.	Le principe des compilateurs de Max Mathews.....	62
II.1.3.	Le catalogue de sons de Jean-Claude Risset.....	64
II.1.4.	Les travaux de John Chowning.....	65
II.1.5.	Le programme Csound de Barry Vercoe.....	67
II.1.6.	Les programmes pour le contrôle des partitions Csound.....	69
II.2.	Le projet Chant-----	70
II.2.1.	Historique.....	70
II.2.2.	Le modèle de production.....	71
II.2.3.	La synthèse par Filtres.....	72
II.2.4.	La synthèse par Fof.....	73
II.2.5.	Les règles de synthèse de Chant.....	74
II.2.6.	La synthèse des consonnes.....	79
II.2.7.	La synthèse par « modèle de résonance ».....	79
II.3.	Conclusion sur les programmes de synthèse-----	83