



HAL
open science

Modèles de synthèse sonore informatique Présentation des techniques de synthèse numérique et introduction à une esthétique du timbre synthétique

Stéphane de Gérando

► **To cite this version:**

Stéphane de Gérando. Modèles de synthèse sonore informatique Présentation des techniques de synthèse numérique et introduction à une esthétique du timbre synthétique. *Analyse Musicale*, 2003. hal-02934963

HAL Id: hal-02934963

<https://hal.science/hal-02934963>

Submitted on 9 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modèles de synthèse sonore informatique

Présentation des techniques de synthèse numérique et introduction à une esthétique du timbre synthétique

*SYNTHESE SONORE INFORMATIQUE /MODELE /TIMBRE /ENJEUX TECHNOLOGIQUES
ET COMPOSITIONNELS /ESTHETIQUE*

La création du son numérique passe souvent par une modélisation et un contrôle singulier d'un de ses paramètres, le timbre. Notons cependant qu'une seule appréhension « récursive » du timbre par le timbre serait aujourd'hui limitée. Les nouvelles technologies offrent en effet un potentiel technique jamais atteint dans l'histoire musicale : un compositeur peut par exemple aisément créer du timbre « sans timbre » (onde sinusoïdale...) et ce, par le seul contrôle agogique de « quantum » de sons¹.

Nous présenterons les principaux modèles de synthèse sonore en simplifiant les explications techniques pour mieux rendre compte du paradigme d'élaboration du timbre. Puis nous introduirons une pensée critique associée à l'utilisation musicale des modèles de synthèse et leurs développements scientifiques (JIM 2002), les différents modèles ne représentant pas les mêmes intérêts pour le compositeur soucieux d'inventer (et non de transformer) le timbre dans une relation à l'écriture de l'œuvre. Les années 1970 ont vu l'émergence d'une pensée systématique liant harmonie et timbre. Actuellement, dans le domaine du son numérique, la problématique semble évoluer vers les concepts de modèle, de paradigme, de représentation et de contrôle du timbre.

I. GENERALITES

1.1. Remarques au sujet des technologies numériques : une rupture dans la continuité

La seule utilisation du numérique ne suffit pas à favoriser une pensée et une création originale. Le domaine de l'automatisme existe depuis l'Antiquité, alors que les études sur l'analyse paradigmatique, mathématique ou la codification de l'information se sont d'abord fortement développées sans l'ordinateur. L'ère du virtuel dans le domaine de l'image ne fait que prolonger l'art de la peinture, de la photographie, de la sculpture alors que les réseaux comme Internet facilitent la communication de l'information à distance, comme les sons de percussion ou les nuages de fumée le faisaient en leur temps. Concernant la création de son par ordinateur, le modèle de synthèse additive existait bien avant l'informatique, l'orgue utilisant ce modèle d'élaboration du timbre. La voix est assimilée à de la synthèse soustractive ou formantique et la synthèse granulaire peut être envisagée par micro-montage à partir d'une bande magnétique... Selon Michel Serre, l'informatique est synonyme de troisième révolution, mais elle reflète avant tout une continuité de la pensée occidentale, une efficacité de la relation de cause à effet, l'omniprésence d'un déterminisme.

1.2. Classification des modèles de synthèse

C. Dodge et T. A. Jerse (1985)² décrivent cinq modèles : synthèses additive et par modulation, les techniques de distorsion, synthèse soustractive, de la parole. M. Battier (1988)³ présente neuf « méthodes de synthèse » - par table d'onde, par modulation de fréquence, additive, soustractive, distorsion non-linéaire (« waveshaping »), formantique (FOF), les modèles de résonance, l'algorithme de Karplus-Strong, par modèle physique - tandis que C. Fatus (1989)⁴ dénombre aussi neuf méthodes de synthèse dont cinq semblent différentes de l'exemple précédent : synthèse par échantillonnage, la prédiction linéaire, synthèses par règles et granulaire, le système VOSIM, Fatus enchaînant sur un chapitre dédié à la synthèse formelle. Dans *Les cahiers de l'IRCAM* (n°2, 1993)⁵, J. C. Risset évoque la synthèse globale, les modèles de signal et physique, les synthèses de processus et croisée (...), tandis que J. O. Smith III fait une classification des techniques suivant le tableau ci-dessous⁶ :

<i>Traitement d'enregistrement</i>	<i>Modèles spectraux</i>
Musique concrète	Table d'onde F
Table d'onde	Synthèse additive
Echantillonnage	Vocodeur de phase
Vecteurs	PARSHL
Synthèse granulaire	Sinusoïdes+bruit
Principaux éléments T	Principaux éléments F
Wavelet T	Chant
	VOSIM
	Cuivre Risset FM
	Synthèse FM de Chowning
	Synthèse soustractive
	Codage prédictif linéaire
	FFT inversée
	Agglomérats de lignes de Xenakis (UPIC)
<i>Algorithmes abstraits</i>	<i>Modèles physiques</i>
Modèles analogiques	Cordes de Ruiz
Certaines versions de Music IV.	Extension de Karplus-Strong
FM originale	Guides d'ondes
FM avec réaction	Synthèse modale
Forme d'onde	Cordis-Anima
Distorsion de phase	Mosaic
Karplus-Strong	

C. Roads (1996)⁷ décrit les modèles de synthèse en cinq chapitres consacrés à l'échantillonnage et la synthèse additive, table d'onde multiple, granulaire et synthèse soustractive, les techniques de modulation, modèle physique et synthèse par formant, segment de forme d'onde, graphique et synthèse stochastique.

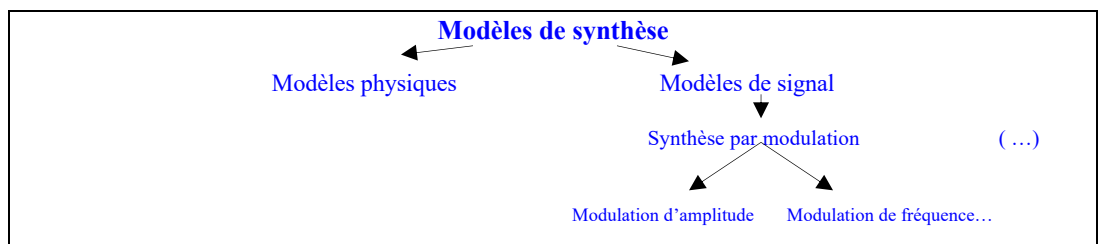
Hiérarchisation de l'information, caractères techniques ou plus esthétiques, présentations chronologiques et historiques en relation avec l'invention théorique du modèle ou sa réalisation informatique, il semble difficile de résumer ces différentes classifications.

P. Depalle et X. Rodet envisagent plus globalement deux grandes classes de modèle :

« La première, centrée sur l'observation des causes, aboutit à l'étude et à la représentation des dispositifs de production sonore. Les modèles qui en découlent sont appelés modèle physique. Ils sont fondés sur les lois mécaniques et acoustiques qui régissent l'évolution des systèmes physiques capables de produire des sons.

La seconde, centrée sur l'observation des effets, aboutit à l'étude et à la représentation des caractéristiques perceptives des sons étudiés. Les modèles qui en découlent n'ont pas vraiment de nom générique et nous les appelons modèles de signaux. Contrairement aux modèles physiques, ils incluent peu de contraintes, sont simples, généraux et peu coûteux à mettre en oeuvre. Ils consistent en une ou plusieurs structures paramétrées, adaptées à la représentation et à la reproduction des caractéristiques temporelles et /ou fréquentielles des sons ... »⁸.

L'opposition modèle physique et modèle de signal permet de créer des sous-classes. Le principe de la synthèse par modulation inclut les modulations de fréquence, d'amplitude, la modulation en anneau étant déjà un cas particulier de la modulation d'amplitude. Cette présentation est l'exemple d'une arborescence à quatre niveaux :



II. PRESENTATION DES PRINCIPAUX MODELES DE SYNTHESE

Lors de la description technique des modèles choisis, nous tiendrons compte principalement de l'ordre chronologique de leurs premières utilisations informatiques et présenterons des exemples de réalisation (*Csound...*) en évoquant des orientations actuelles de recherche développées à l'IRCAM.

Même si nous avons choisi de ne pas rendre problématique cette présentation, une lecture critique des techniques de synthèse s'impose : les modèles n'ont en effet pas les mêmes caractéristiques, tant au niveau de la représentation du timbre que de son contrôle. Pour certains, la règle de production du timbre est particulière, « présente » et contraignante, dans d'autres cas, le modèle apparaît comme étant plus « souple », capable de générer et de contrôler tout type de son,

la règle pouvant par ailleurs s'effacer au profit du contrôle du modèle et d'une relation diversifiée entre traitements symbolique et perceptif.

2.1. Synthèse par échantillonnage ou table d'onde

La synthèse par échantillonnage est indissociable d'une représentation numérique du signal (1957) et en ce sens, elle n'est pas véritablement considérée par certains comme un modèle de synthèse. Cette technique consiste à donner une valeur numérique à l'amplitude de la forme d'onde pour chaque instant t , associée à un taux d'échantillonnage (nombre d'échantillons par seconde) égal à deux fois la plus haute fréquence du signal à synthétiser (théorème de Nyquist). L'ambitus de perception des fréquences étant d'environ 16Hz à 20000Hz, la conversion numérique du signal analogique doit avoir au minimum une fréquence de 40000Hz, valeur qui rappelle la fréquence d'échantillonnage standard du disque compact actuel (44100Hz). La représentation numérique d'un échantillon utilise un nombre fini de bits (16 bits, 24 bits, 32 bits...). Plus le taux d'échantillonnage et le nombre de bits est élevé, plus la qualité du signal représenté est grande (précision temporelle, amplitude, plage dynamique).

La synthèse par table d'onde est une manière directe d'utiliser l'échantillonnage. J. O. Smith III⁹ distingue trois variantes d'une même technique : la synthèse par table d'onde dans la dimension temporelle (stockage d'un son en mémoire), la synthèse par table d'onde abordée sous l'angle fréquentiel (soit a priori, soit à partir des résultats d'une analyse spectrale), la synthèse vectorielle (par table d'onde multiple avec interpolation et, plus récemment enchaînement de tables d'ondes). Dans l'environnement de synthèse *Csound*¹⁰, le programme *oscil* lit une table d'onde choisie (*GEN*, p3) associée à une amplitude (p1) et une durée (p2) à paramétrer. Le programme *GEN1* permet par exemple de transférer les échantillons d'un son pré-enregistré.

2.2. Synthèse additive

Le principe général de cette méthode de synthèse consiste à composer le timbre « de l'intérieur » en ajoutant des oscillateurs dont on spécifie individuellement l'amplitude, la fréquence et éventuellement la phase.

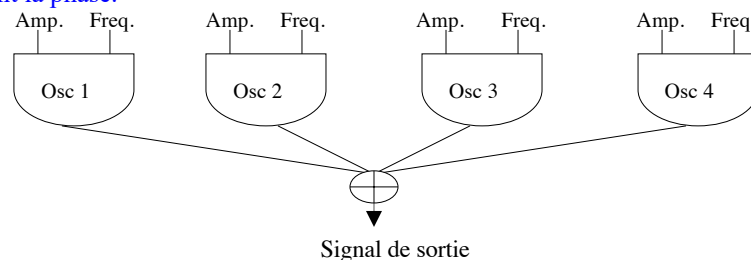


Fig. 1 - Principe de la synthèse additive

Le modèle exploite les travaux du mathématicien Fourier. Un timbre harmonique (périodique) est par exemple réalisé à partir d'une somme de sinusoïdes dont les fréquences sont des multiples entiers d'une fréquence fondamentale.

Dans l'environnement *Csound*, le programme *GEN10* additionne des harmoniques en phase dont on définit les amplitudes relatives. *GEN9* additionne des partiels inharmoniques¹¹ avec un contrôle indépendant de la phase (synthèse additive à forme d'onde fixe). Pour synthétiser des sons proches de sonorités naturelles, on peut utiliser une synthèse additive à forme d'onde variable (contrôle indépendant des fréquences, amplitudes, phases), technique intéressante mais qui demande un grand nombre de données pour synthétiser un son.

L'équipe analyse/synthèse de l'IRCAM a mis au point un algorithme de synthèse « FFT-1 » qui réduit le coût de calcul des échantillons « par un facteur de l'ordre de trente ». Une version temps réel a été développée sous Unix (Additive). Ces recherches portent sur « l'extraction automatique des variations de fréquence et d'amplitude des sinusoïdes et les stratégies de contrôle de ce type de synthèse, notamment par une description en terme d'enveloppe spectrale des amplitudes »¹².

2.3. Synthèse soustractive

Le principe général de cette méthode de synthèse consiste à faire passer un signal d'entrée à travers un filtre. Grâce à l'évolution des capacités de l'ordinateur, toutes sortes de sources sonores ont été échantillonnées puis filtrées en changeant leurs caractéristiques au cours du temps.



Chant (1984-IRCAM) est le fruit du travail de X. Rodet et Y. Potard. Il répond à la fois à l'analyse et à la synthèse de la voix à l'aide d'algorithmes décrivant les phénomènes sonores physiques en relation avec la perception. Le système *Chant* part de la constatation que « *l'appareil vocal est constitué des cordes vocales qui vibrent et modulent le flux d'air expiré par les poumons à travers le larynx...* », « *... la forme du résonateur évolue constamment au cours du temps, ce qui ne se vérifie pas par la majorité des instruments de musique à géométrie fixe* »¹³. Le modèle *Chant* s'apparente à une série de résonateurs représentés par des fonctions mathématiques appelées fonctions d'ondes formantiques (FOF, produit d'une sinusoïde par une enveloppe exponentielle amortie). Chaque formant correspond à une somme de filtres (du second ordre) contrôlés en fréquence, en amplitude et en largeur de bande. Dans le prolongement de ce synthétiseur, les modèles de résonance développés par Y. Potard, J. B. Barrière et P. F. Baisnée « *distinguent excitation et résonance dans le processus de modélisation d'instruments à partir de sons percussifs résonnants, et sur des outils de synthèse et traitement par filtrage et d'interpolation de modèles instrumentaux* »¹⁴. Le synthétiseur de type source-filtre (Soufil) développé à l'IRCAM et conçu par P. Depalle, G. Poirot et X. Rodet intègre toutes les procédures d'analyse spectrale présentes dans les deux autres synthétiseurs. Il tente de résoudre certaines difficultés d'interpolation de timbres inhérentes au type de contrôle des modèles précédents avec une utilisation filtre tout-pôle offrant la possibilité d'évoluer plus facilement entre deux sons dont le nombre de formants est différent. Les travaux actuels de l'IRCAM sur le modèle source-filtre portent « *sur l'amélioration des procédures d'analyse, sur la mise en forme des programmes de synthèse (...), sur la détection de la hauteur et l'analyse du bruit (souffle de l'instrumentiste, bruit de l'archet sur la corde)* »¹⁵.

Csound propose plusieurs programmes qui génèrent différentes qualités de bruit : *rand* produit un bruit pseudo-aléatoire et *buzz*, un train d'impulsion dont l'amplitude des fréquences est égale. De la même manière, les filtres répondent à des caractéristiques différentes : *tone* est un filtre passe bas récursif de premier ordre tandis que *reson* est un filtre du second ordre dont il faut indiquer la fréquence centrale et la largeur de bande.

2.4. Modèle de synthèse par distorsion non linéaire (waveshaping)

Ce modèle fonctionne à l'image des instruments acoustiques, le spectre produit par cette technique évoluant avec l'amplitude du son en produisant une altération de la forme d'onde. La relation entre l'entrée et la sortie du dispositif de distorsion est réalisée par des fonctions de transfert qui peuvent être choisies d'après le type de distorsion souhaité. Le principe de cette distorsion est formalisé mathématiquement par les polynômes de Chebychev.

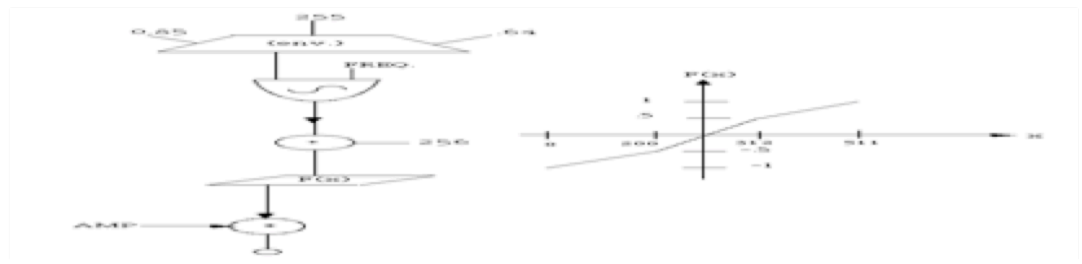


Fig. 2 - Exemple de distorsion non linéaire (*Catalogue de sons* de J. C. Risset, 1960, son de clarinette)

Dans cet exemple donné par Risset pour synthétiser un son de clarinette, la fonction de transfert de la table d'onde est stockée dans une table de 512 points. Les échantillons de la sortie de l'oscillateur varient entre $-$ et $+ 255$. A ces valeurs est additionnée une valeur constante de 256. Aussi, les valeurs utilisées comme références de la forme d'onde oscillent de 1 à 511. Les entrées de la forme d'onde sont mises à l'échelle entre -1 et $+1$ et multipliées par l'amplitude désirée. Dans *Csound*, les programmes *GEN13* et *GEN14* créent des fonction de transfert à l'aide de des polynômes de Chebychev en spécifiant le contenu harmonique désiré.

2.5. Synthèse par modulation

Ce titre générique indique plusieurs techniques de synthèse permettant de moduler un signal par un autre.

2.5.1. Synthèse par modulation de fréquence

Cette méthode employée pour la première fois à des fins musicales par Chowning (1973) est globale et non linéaire, la valeur du signal produit par la modulation n'étant pas proportionnelle au signal d'entrée. Son principe de base consiste à moduler un signal sinusoïdal (la porteuse, F_p) qui définit la fréquence fondamentale, par un signal de même type (la modulante, F_m) situé dans le registre audio.

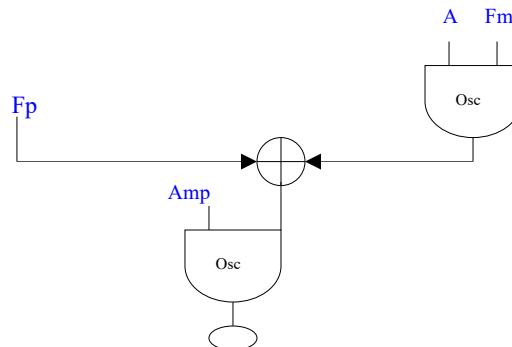


Fig. 3 - Algorithme de synthèse FM

Deux paramètres caractérisent cette modulation : le rapport porteuse-modulante (p/m) et l'indice de modulation (I), l'amplitude des partiels de ce spectre étant donnée par les fonctions de Bessel¹⁶. En simplifiant, p/m désigne les fréquences des partiels du spectre (par rapport à la fréquence porteuse) et I contrôle le nombre et l'amplitude des partiels ($I=d/m$, le rapport de la déviation maximale à la fréquence modulante)¹⁷.

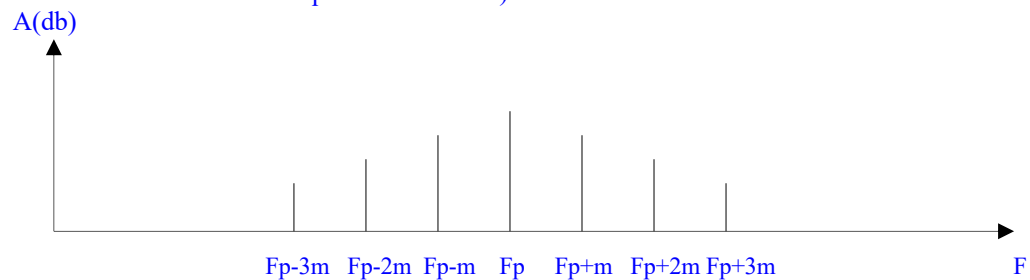


Fig. 4 - Spectre de synthèse FM

Il existe dans *Csound* un programme spécifique consacré à la modulation de fréquence, *foscil*, dont on peut contrôler six paramètres dont l'amplitude, la fréquence, les fréquences de la porteuse et de la modulante.

Les autres techniques de modulation présentées ci-dessous peuvent être réalisées en combinant les oscillateurs.

2.5.2. Modulation d'amplitude

C. Dodge¹⁸ précise qu'il y a trois principales techniques de modulation d'amplitude :

- Modulation d'amplitude classique ou linéaire (AM)
- Modulation en anneau
- Modulation de bande latérale unique

2.5.2.1. Modulation d'amplitude classique ou linéaire (AM)

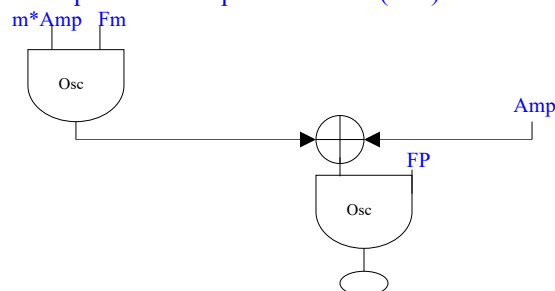


Fig. 5 - Modulation d'amplitude classique

L'oscillateur porteur a une fréquence constante de F_p et l'oscillateur modulant une fréquence F_m ¹⁹. Si les deux oscillateurs sont sinusoïdaux (F_m et F_p), le spectre du signal AM contient de

l'énergie sur trois fréquences : la fréquence porteuse (F_p) et deux bandes latérales ($F_p + F_m$) et ($F_p - F_m$), l'amplitude de chaque bande latérale étant un facteur de $m/2$.

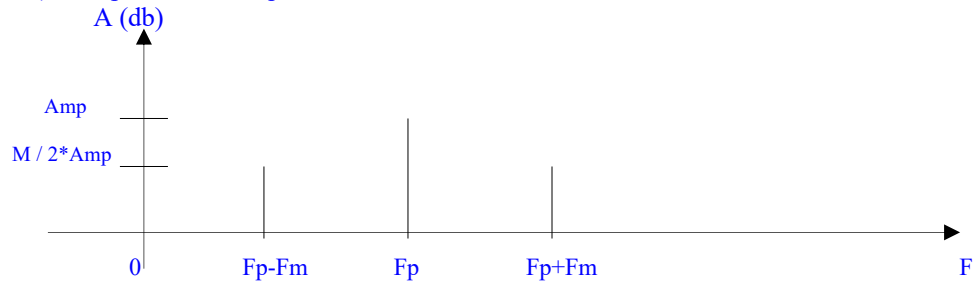


Fig. 6 - Spectre d'une modulation d'amplitude classique²⁰

Les musiciens se servent de la modulation d'amplitude pour ajouter au timbre un vibrato électronique en utilisant un index de modulation peu élevé, ainsi qu'une fréquence modulante sub audio. Quand l'index de modulation est élevé (par exemple $m=1$) le son produit sera martelé et intermittent.

2.5.2.2. Modulation en anneau (modulation équilibrée ou latérale double)

Cette technique est un cas particulier de modulation d'amplitude appliquée directement à l'entrée de l'amplitude d'un oscillateur porteur, sans être ajoutée à la valeur représentant l'amplitude de l'oscillateur porteur non modulé²¹.

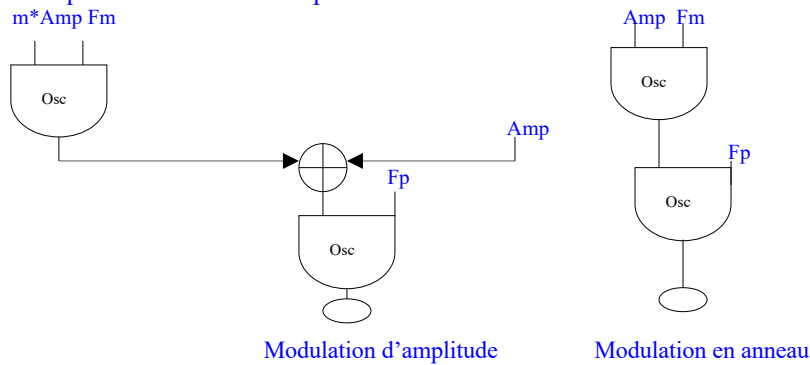


Fig. 7 - Exemples de modulations d'amplitude

Si le signal porteur (F_p) et le signal modulante (F_m) sont sinusoïdaux, le spectre du signal modulé contient uniquement deux fréquences ; $F_p + F_m$ et $F_p - F_m$. La fréquence porteuse n'est plus présente, le son pouvant alors devenir très différent. Supposons maintenant qu'un son de voix avec une fréquence fondamentale de 100 Hz module en anneau un oscillateur sinusoïdal de fréquence 1123 Hz. Le son résultant contiendra la somme et la différence entre chaque harmonique de la voix et 1123 Hz. Le spectre transformé est alors composé des fréquences 1023 Hz et 1223 Hz, l'ancienne deuxième harmonique (200 Hz) apparaît à 923 Hz et à 1323 Hz etc ... Le timbre de la voix devient inharmonique selon le rapport du signal porteur et le signal modulé : on peut aller jusqu'à perdre l'aspect compréhensible de la parole.

2.5.2.3. Modulation de bande latérale unique

La modulation de bande latérale unique consiste à moduler un son à travers un modulateur de fréquence.

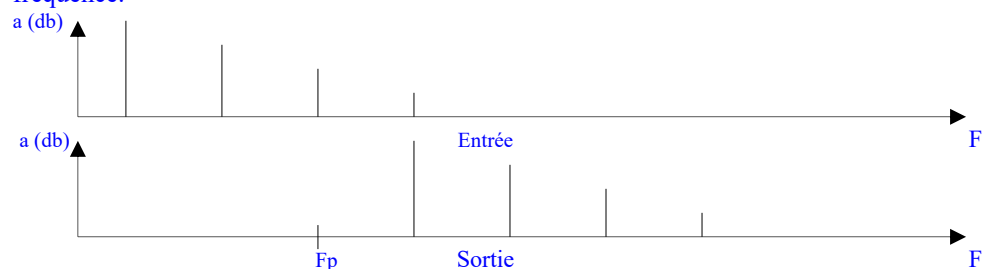


Fig. 8 - Spectre d'une modulation de bande latérale unique

Une constante (F_p) est ajoutée à la fréquence de chaque composante du son. La modulation est différente de la transposition, parce qu'elle détruit les relations entre les intervalles des partiels du son²². Alors que la modulation en anneau produit des bandes latérales des deux côtés de l'onde porteuse, la modulation SSB, en théorie, ne produit que des bandes latérales positives (supérieures) (F_p+F_m) ou des bandes négatives (inférieures) (F_p-F_m), selon la sélection de l'utilisateur.

2.6. La synthèse granulaire ou modèle de synthèse stochastique

La synthèse granulaire est suggérée comme modèle de synthèse par Ianis Xenakis (1971) et Curtis Roads (1978). Ce type de synthèse stochastique consiste à produire des densités variables de grains sonores (plusieurs centaines à plusieurs milliers de grains par seconde) de très courtes durées (souvent inférieures à 4 millisecondes). A l'image de la physique quantique, le physicien anglais Dennis Gabor interprète ces grains comme des quantum de son, unités psychoacoustiques indivisibles. Les paramètres qui définissent le contrôle de la synthèse sont principalement la durée des grains, la densité des grains, la largeur de bande des grains, l'enveloppe d'amplitude (courbe de Gauss...), la forme d'onde (synthèse ou fichier audio), la distribution des grains dans l'espace. Inspiré des travaux de Truax et de Roads, le programme *grain* de *Csound* génère des textures granulaires en contrôlant l'amplitude, la fréquence et la densité des grains par seconde. Le programme *granule* développé par Allan Lee est plus complexe puisqu'il contrôle vingt-deux paramètres.

2.7. Synthèse par modèle physique

Le principe général de cette méthode consiste à modéliser la source (cause) ou l'instrument producteur de son et non plus les sons produits par cet instrument²³ (effet). Il existe cependant plusieurs types de synthèse par modèle physique. L'approche de P. Ruiz (1967, thèse sur la simulation des cordes frottées) reprise par L. Hiller et J. Beauchamp est représentative d'une modélisation classique par modèle physique. Les résonateurs sont modélisés par des masses reliées à des ressorts, les vibrations étant représentées par des équations différentielles.

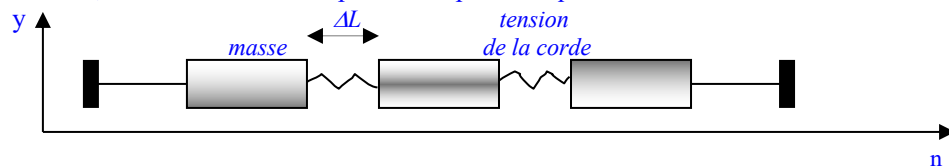


Fig. 9 - Modélisation simplifiée d'une corde de piano

En 1978, C. Cadoz, A. Luciani et J. L. Florents (ACREO de Grenoble) apportent un nouvel élan à cette technique de synthèse très coûteuse en temps de calcul (création de *Cordis-Anima*). Ce programme est axé sur les relations entre les matériaux à partir d'un environnement contrôlable par des procédés multisensoriels via un « Transducteur Gestuel Rétroactif ». *Mosaic* (1985) - appelé aujourd'hui *Modalys* - est un environnement conçu par J. M. Adrien et J. Morrison à l'IRCAM. Il permet à partir d'une décomposition modale des structures vibrantes de simuler de manière complexe et souple les gestes instrumentaux et les corps sonores.

Entre temps est né un autre type de synthèse physique, par guides d'ondes. K. Karplus et A. Strong (1983) travaillent sur une simulation de plusieurs sons de cordes pincées en temps réel. Ce système économique en temps de calcul se situe à la frontière entre modèle physique et soustractif puisqu'il fonctionne à partir d'un filtrage de sources. Dans *Csound*, l'implémentation des algorithmes de Karplus-Strong est réalisé par le programme *pluck* lié à cinq paramètres principaux dont le choix de six méthodes pour l'atténuation naturelle du son filtré choisi (1, 2, 3 cordes pincées, 3, 4 sons de percussions, paramètre *imeth*). D'autres programmes existent, chacun ayant ses caractéristiques de timbre, notamment *wgbow* pour les cordes frottées, *wgbrass* pour les cuivres, *wgclar* ou *wgflute* pour les clarinettes et flûtes. Concernant les vents, on contrôle le temps en seconde pour atteindre la pression maximale et l'arrêt du souffle puis le contrôle de la forme, de la fréquence et de l'amplitude du vibrato. Voici d'autres exemples de paramètres à définir par l'utilisateur dans *Modalys* (IRCAM) :

- corde : la densité, la tension, le rayon, la longueur,
- membrane rectangulaire : la grosseur, la longueur, la densité,
- membrane circulaire : la grosseur, la longueur, la densité,
- tuyau : la longueur, la densité de l'air, le rayon du tuyau, l'élasticité de l'air²⁴.

III. INTRODUCTION A UNE ESTHETIQUE DU SON NUMERIQUE

Il est nécessaire de conserver en mémoire ce rapide exposé pour aborder une réflexion critique au sujet des choix et de l'utilisation par le compositeur contemporain des modèles de synthèse sonore. Trois moments introduisent une esthétique du son synthétique. Un premier concerne des remarques techniques sur l'utilisation des modèles de synthèse, remarques émanant essentiellement de la vision du scientifique. Puis nous abordons une critique davantage musicale, en rappelant qu'il semble, à la première analyse et d'après le répertoire électroacoustique, exister un lien entre le choix du modèle de synthèse et des archétypes compositionnels. Un troisième moment évoque les enjeux d'une écriture musicale pouvant naître de la relation d'un type de modèle et de l'invention du son (et non pas sa transformation) replacée dans la dialectique de l'œuvre composée.

3.1. Considérations techniques

Synthèse additive

La synthèse additive permet de structurer le timbre dans son intimité en contrôlant indépendamment ses composantes élémentaires (fréquence, amplitude, phase). Mais cette exigence au niveau du détail entraîne deux inconvénients :

- une durée de calcul souvent importante, (cette caractéristique est de moins en moins gênante grâce à la puissance croissante des ordinateurs)
- une difficulté à saisir les relations effectives entre les paramètres qui structurent le timbre, son évolution et sa perception.

Ce principe, basé sur une décomposition du timbre en sinusoïdes, convient bien à certaines catégories de son; nous n'aurions pas l'idée de synthétiser du bruit avec ce procédé. Depalle et Rodet soulignent que la plupart des sons se composent d'un mélange de sinusoïdes auquel se superpose un bruit (souffle de l'instrumentiste, frottement de l'archet) et qu'il est nécessaire de pouvoir rajouter facilement du bruit dans le signal sonore. Ils énoncent aussi la difficulté d'utilisation des procédés d'analyse associés à ce modèle, dont la plus importante reste celle de l'extraction des trajets temporels de paramètres. J. C. Risset rappelle que cette pratique reste suffisamment générale pour laisser entrevoir des renouvellements à l'intérieur de la méthode. « *On peut reconstituer des ondes sonores extrêmement variées par la superposition de grains de Gabor ou d'ondelettes, fonctions élémentaires qui oscillent sur une durée limitée. Les articles de Daniel Arfib et Richard Kronland-Martinet traitent de ces types de synthèse additive qui permettent d'intéressantes transformations sonores. Dans le programme de synthèse Chant, Xavier Rodet a mis en oeuvre des fonctions d'ondes formantiques, moins élémentaires que des sinusoïdes* »²⁵.

Synthèse soustractive

« *L'intérêt principal de ce type de modèle est de réaliser un compromis équilibré entre la prise en compte de la constitution physique des instruments de musique et celle des propriétés perceptives de l'oreille, sous la forme d'une représentation d'un type de signal relativement simple. L'étude du mode de fonctionnement des instruments de musique souligne qu'ils sont, pour la plupart, constitués de deux dispositifs : l'un fournissant de l'énergie à l'autre qui vibre mécaniquement (comme une corde) ou acoustiquement (comme une colonne d'air dans un tube)* »²⁶. D'après Depalle et Rodet, là où nous avons gagné en efficacité par rapport à la synthèse additive, nous avons aussi perdu en généralité.

Synthèse FM

Le modèle de synthèse FM²⁷ (et plus globalement les principes de modulations) rend possible l'obtention de timbres harmoniques et inharmoniques très riches par le contrôle d'un petit nombre de paramètres²⁸. Mais les paramètres de modulation de fréquence restent difficiles à relier intuitivement au timbre final du signal synthétique. Il en résulte que l'opération qui consiste à rechercher les paramètres d'un son existant requiert une grande expérience.

Synthèse par échantillonnage

La règle rejoint dans ce cas l'objet, en ne donnant pas la possibilité, à l'intérieur du modèle, d'avoir de contrôle sur sa représentation. D'un côté, la représentation du timbre semble « parfaite » (enregistrement numérique), de l'autre, il est difficile de le transformer ou de le créer.

Synthèse par modèle physique

Les paramètres reliés aux caractéristiques de l'instrument modélisé sont très significatifs : une modification de la tension de la corde se traduit par la modification du paramètre correspondant, de même que le déplacement du doigt sur le manche est facilement symbolisé dans le modèle physique. C'est donc, parmi toutes les méthodes de synthèse, celle qui offre la meilleure adéquation avec la réalité instrumentale. En contrepartie, les instruments de musique sont très souvent représentés par des modèles complexes conduisant à des systèmes couplés d'équations différentielles dont la résolution numérique s'avère lourde en temps de calcul.

3.2. Considérations musicales

D'après une appréhension du répertoire « électroacoustique », nous poursuivons nos remarques générales en décrivant des liens susceptibles d'exister entre le choix du modèle et des archétypes perceptifs ou compositionnelles, comme la qualité des timbres ou les procédures d'écriture.

Par exemple, l'échantillonnage donne des sons à l'origine « connus », même s'ils sont parfois transformés en des textures étranges, ils demeurent trop souvent marqués par des développements compositionnels limités et connotés, dus en partie aux limites du modèle. L'échantillonnage et toutes les manipulations numériques dont profite cette technique ont donné naissance à de nombreuses oeuvres ou considérées comme telles dont l'esthétique est basée sur le découpage de bande (montage, brassage des échantillons, micro-montage, filtrage, dilatation, compression, réverbération, spatialisation... toutes sortes de procédés empruntés aux studios analogiques et élargis aux possibilités de l'informatique).

Le timbre de synthèse FM a bien une couleur particulière probablement liée au processus même de création et de contrôle du timbre décrit précédemment. Nous pourrions comparer ce procédé à une véritable méthode algorithmique de composition du timbre en relation avec des aspects « harmoniques » comme nous l'avons rappelé dans notre exposé (rapport porteuse/modulante), logique qui pourrait s'extraire elle-même du contexte d'une œuvre musicale. La complexification des processus de contrôle par le biais de modulations de fréquence multiples ou d'un mixage de différentes techniques évite la trop forte relation au modèle de synthèse initial.

Les modèles basés sur l'analyse - re-synthèse paraissent plus prometteurs, l'analyse occasionnant une recomposition du son en fonction du modèle à utiliser. Le résultat sonore est plus diversifié. Si nous cherchions à dégager une esthétique du « son recomposé », celle-ci se situerait davantage dans la façon de développer le son que dans une « couleur » particulière du signal synthétique, à l'instar des notions d'interpolations ou d'hybridations qui deviennent très vite des schémas archétypaux de la pensée compositionnelle.

Les modèles physiques servent à étendre les caractéristiques des sons naturels ou à créer des timbres hybrides. Le contrôle des paramètres à un niveau élevé et donc plus efficace, fait cependant perdre la capacité de contrôler le son de « l'intérieur » : il serait paradoxal de vouloir réaliser une musique spectrale avec ce type de modèle. Par ailleurs, concernant l'utilisation du modèle, nous restons dans une « configuration compositionnelle classique », la définition et le jeu de l'instrument étant les intermédiaires indispensables entre le formalisme et la production sonore. Cette « interface instrumentale » réintroduit une contrainte pesante face à des modèles qui traitent directement la question du son et de sa constitution.

L'utilisation de la synthèse additive entraîne souvent des micro-variations du son sur des durées généralement longues en conférant au timbre des aspects étrangement lisses voire artificiels, ces caractéristiques pouvant également être exploitées musicalement d'une manière intéressante (les sons acoustiques ayant rarement cette « qualité » de timbre).

3.3. Enjeux compositionnels

Les deux paragraphes précédents font apparaître deux remarques. Le scientifique évoque très souvent l'efficacité du modèle qu'il détermine selon ses critères ; durée de calcul, typologie du son

en relation avec le choix du modèle, aspect perceptif... Tel que nous l'avons décrit, le contexte musical en relation avec l'utilisation des modèles de synthèse est autrement qualifié, nous nous intéressons davantage aux aspects compositionnels ou plus directement esthétiques du son. Les intérêts divergent. Dans ces conditions, les liens énoncés précédemment entre le choix du modèle et des archétypes stylistiques pourraient être le résultat d'un manque d'imagination du compositeur et de collaboration avec les scientifiques dans un cadre purement musical.

Mais d'après la description technique des modèles, il existe bien une hiérarchie des techniques de synthèse, de l'échantillonnage au modèle de synthèse additive. Plus le modèle est efficace en terme d'imitation (échantillonnage), plus il est inefficace aux niveaux du contrôle ou de la création du timbre. Des modèles « intermédiaires » sont à l'image de techniques trop particulières, comme la synthèse par modulation de fréquence ou la synthèse granulaire.

Même s'il y a une difficulté pour renforcer le lien entre perception et contrôle symbolique du modèle de synthèse additive, sa puissance paradigmatique généraliste de représentation du timbre associée aux techniques numériques de contrôle du modèle décrit un potentiel compositionnel jamais atteint dans l'histoire musicale : le compositeur a la possibilité d'inventer, de signifier, de rendre perceptible un nouveau microcosme porteur de forme.

Concernant le nombre d'œuvres existantes, il existe une véritable disproportion à l'avantage de modèles favorisant la représentation ou l'imitation (échantillonnage) et moins le contrôle ou la création (additive). Ce contexte musical ne peut se limiter à une explication technologique. Rappelons l'œuvre de J. C. Risset, *Mutation* (1969) utilisant déjà le principe de la synthèse additive et de la décomposition spectrale (harmonie - mélodie /timbre). La complexité du phénomène sonore induit une multitude de micro variations trop longues à paramétrer en dehors de procédés automatiques. Nous touchons là une nouvelle forme d'apprentissage liée à la programmation, la formalisation, les sciences cognitives trois disciplines pour lesquelles les musiciens n'ont pas été formés. Une interface (par modules fonctionnels graphiques comme *Open Music*) programmée pour contrôler la synthèse permet une communication plus conviviale et efficace; elle introduit un concept original et extrêmement puissant dans l'optique d'un renouvellement de la pensée, puisque l'idéal et le matériel sont réunis dans une même problématique, un devenir commun et interactif.

IV. RECHERCHES ET PERSPECTIVES

4.1. Echos des *Journées d'Informatique Musicale 2002*

Lors d'un récent colloque international sur l'informatique Musicale (JIM 2002), les chercheurs ont montré l'intérêt porté à la synthèse sonore. P. Hanna et M. Desainte-Catherine²⁹ (SCRIME-Université Bordeaux I) évoquent « une nouvelle méthode de synthèse basée sur un modèle spectral et statistique produisant des sons bruités ». Cette technique permet de « contrôler indépendamment l'enveloppe et la densité spectrale ». P. Hanna et M. Desainte-Catherine concluent sur les progrès à réaliser dans le domaine de l'analyse et l'implémentation en temps réel de ce système. L'équipe d'O. Warusfel et de R. Caussé³⁰ à l'IRCAM présente un modèle de contrôle de la directivité par un système multi haut-parleurs. La maîtrise des caractéristiques spectrales et spatiales du son change le rapport à la synthèse, à la création du timbre et sa diffusion. Jean-Michel Couturier³¹ (LMA-CNRS-Marseille) propose quant à lui un système de synthèse par balayage (« scanned synthesis » en *Max-Msp*) « qui permet d'obtenir des sons aux timbres riches et évolutifs ». Ce chercheur étudie le contrôle interactif utilisant la manipulation directe d'objets graphiques. Mikael Laurson et Mika Kuuskankare³² (Center for Music and Technology, Sibelius Academy) développent des outils de contrôle en temps réel de la synthèse par modèle physique alors que D. Arfib, P. Sanchez et J. Dudon³³ (CNRS, Marseille) créent un procédé graphique et lumineux de génération du son, la synthèse photosonique....

M. Stroppa, S. Lemouton et C. Agon³⁴ (IRCAM) insistent davantage sur le contrôle de la synthèse, avec la présentation de l'environnement *Chroma* devenu une nouvelle extension d'*Open Music*. L'objectif est ici de favoriser l'écriture musicale vue sous l'angle d'un traitement symbolique de données appliquées aussi bien au contrôle d'environnements de synthèse comme *Csound*, *Chant* ou *Modalys*. Par ailleurs, les outils de transformation du son deviennent de plus en plus puissants. V. Verfaillie³⁵ (LMA-CNRS) présente la réalisation d'effets audionumériques adaptatifs temps réel et différé, qui permettent de « réinterpréter une phrase musicale en changeant le timbre, la durée des notes ou la présence d'événements » alors que L. Pottier³⁶ (*Holophon*, GEM), G. Nono et C. Agon³⁷ (*Open Music* et *Max/Msp*-, IRCAM) expliquent leurs travaux sur la spatialisation du son.

Si l'on pense aux nouveaux échantillonneurs et synthétiseurs virtuels, traitements VST... commercialisés qui deviennent de plus en plus puissants et souples en terme de contrôle

automatique des paramètres via la norme MIDI, la frontière entre les environnements de synthèse et de traitement du son est de plus en plus réduite.

4.2. Recherche, synthèse sonore et création musicale

La diversité des recherches engagées reste un atout si elle répond à une réalité de fond visant à multiplier les angles d'approche pour mieux enrichir les points de vue ou si cette variété sert un « intérêt général ». Au vu du nombre de logiciels différents ou équivalents, d'environnements qui ne sont pas prévus pour communiquer, de programmes de recherche ou de logiciels abandonnés ou trop brutalement modifiés, la communication et la coordination des énergies semblent encore à améliorer.

Par ailleurs, les recherches interdisciplinaires musique /sciences concernant très directement la création de modèle de synthèse et son contrôle dans un cadre compositionnel n'apparaissent pas distinctement à la lecture des communications des JIM 2002. Les articles proposés montrent une difficulté à véritablement croiser les compétences : il y bien des collaborations, mais très souvent entre scientifiques ou à propos de recherches séparant la création de modèle avec l'aspect plus directement lié au contrôle de la synthèse dans un cadre musical. Cette situation révèle probablement une véritable difficulté pour entrevoir à niveau égal des intérêts musicaux et scientifiques. Le propre du scientifique à travers la modélisation est par exemple de pouvoir valider le modèle en comparant un son synthétisé d'un même son enregistré. Ce protocole de recherche ne répond en aucune manière à l'idée de création ou d'œuvre. Mais ce n'est pas la seule raison. La formation des compositeurs pour la recherche musicologique et scientifique est souvent limitée, même si elle a tendance aujourd'hui à se développer. Les idées des compositeurs risquent de rester trop superficielles techniquement et musicalement puisqu'ils n'ont la possibilité de penser en profondeur l'outil technique avec lequel ils travaillent et plus encore les potentiels et les méthodes qui permettraient de le faire évoluer en collaboration avec les scientifiques. Plus encore, la relation du modèle de synthèse et de l'écriture musicale doit faire apparaître de nouvelles problématiques compositionnelles.

Au début du XX^e siècle, les scientifiques ont fortement lié la forme et le fond en opposant par exemple physique relativiste et physique quantique. Ce clivage dans le domaine musical existe d'une certaine manière un demi-siècle plus tard : les compositeurs opposent alors musiques sérielle et stochastique, les techniques d'écriture utilisées étant au centre du débat esthétique.

L'histoire des sciences montre que nous avons aujourd'hui l'opportunité de penser autrement, de favoriser le fond sur la forme ; des outils de pensées opposées dans leur conception logique et philosophique pouvant donner les mêmes résultats. Peut-être alors que la problématique du choix du modèle de synthèse est dépassée ? Elle pourrait s'effacer au profit d'une réalité plus globale réunissant des aspects cognitifs, symboliques, créatifs et des possibilités de contrôle dont on mesure aujourd'hui à peine la puissance. Pour cette orientation de recherche, une véritable imbrication des compétences serait nécessaire, une harmonisation vécue comme une nécessité, un respect équilibré des savoirs de chacun. Il ne s'agirait plus de favoriser la simulation, l'imitation ou la compréhension des phénomènes, mais avant tout, d'écrire le timbre au-delà des espaces répertoriés, de réaliser ce rêve cher à Varèse : la « transmutation » ou l'invention du matériau comme conséquence d'une écriture. Les recherches actuelles montrent déjà un déplacement de la relation du modèle à une compréhension moins spécifiquement liée au timbre. Nous sommes manifestement à la préhistoire d'un nouvel art, entre réalité et virtualité, action et interaction - perte de la référence et artifice de la nouveauté - un art qui pourrait devenir par nécessité historique poly-sensoriel et continu dans l'infini de ses dimensions. Une esthétique du son synthétique se confondrait alors avec l'étude de l'œuvre écrite via les capacités technologiques d'invention et de contrôle du phénomène sonore.

Bibliographie

Ouvrages

- ADRIEN, Jean-Marie, *La synthèse modale*, Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Paris, 1989
 BRETON, Pierre, *Une histoire de l'informatique*, Seuil, Paris, 1986
 BOULANGER, Richard, *The Csound Book*, MIT Press, Cambridge, 2000
 CADOZ, Claude, *Les réalités virtuelles*, Flammarion, Evreux, 1994
 COLLECTIF, *Le timbre métaphore pour la composition*, coll. Musique/Passé/Présent, IRCAM-Bourgeois, Paris, 1991
 COLLECTIF, *Les cahiers de l'IRCAM n°2*, IRCAM, Paris, 1993

- CHOWNING, John, « The synthesis of complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation », *Computer Music Journal*, MIT press, Cambridge, 1977, pp. 46-54
- DODGE, Charles & JERSE, Thomas, *Computer Music : Synthesis, Composition and Performance*, Schirmer Books, New York, 1997
- FATUS, Claude, *Composition musicale et informatique*, Minerve, 1989
- GERANDO (de), Stéphane, *Contingence et déterminisme procédural appliqués à la synthèse sonore informatique et l'écriture musicale*, Septentrion – Presses Universitaires, Villeneuve d'Ascq, 1988
- HARTMANN, William M., *Signals, Sound, and Sensation*, Springer, 2000
- LEIPP, Emile, *Acoustique et musique*, Masson, Paris, 1983
- MOORE, Richard, *Elements of Computer Music*, 1990
- PIERCE, John, *Le son musical*, Belin, Paris, 1987
- ROADS, Curtis, *The Computer Music Tutorial*, MIT Press, Cambridge, 1996
- XENAKIS, Iannis, *Musiques formelles*, Stock, Paris, 1981

Communications, colloque *Journées d'Informatique Musicale 2002*

- ARFIB, D., SANCHEZ, P., *Synthèse photosonique : de la géométrie des ondes au disque virtuel*, JIM 2002
- BATTIER, M., *De la phonographie à la lutherie numérique. L'épiphanie du son artificiel*, JIM 2002
- COUTURIER, J. M., *La synthèse par balayage et son contrôle gestuel*, JIM 2002
- HANNA, P., DESAINTE-CATHERINE, M., *Influence de la densité spectrale sur la synthèse de sons bruités*, JIM 2002
- LAURSON, M., KUUSKANKARE, M., *Instrument Concept in ENP and Sound Synthesis Control*, JIM 2002
- MISDARIIS, N., WARUSFEL, O., CAUSSE, R., NICOLAS, F., *Le contrôle de la directivité par un système multi haut-parleurs*, JIM 2002
- NOUNO, G., AGON, C., *Contrôle de la spatialisation comme paramètre musical*, JIM 2002
- RISSET, J.C., ARFIB, D., LORRAIN, D., DE SOUSA DIAS, A., POTTIER, L., *De inharmonique à Resonant Sound Space : temps réel et mise en espace*, JIM 2002
- STROPPA, M., LEMOUTON, S., AGON, C., *Chroma : vers une formalisation compositionnelle des processus de synthèse sonore*, JIM 2002
- VERFAILLE, V., *Réalisation d'effets audionumériques adaptatifs en temps réel et hors temps réel*, JIM 2002

Discographie

The Historical CD of Digital Sound Synthesis, Wergo 20332, 1995 (www.schott-online.com)

Notes

- ¹ S. de Gérando, *Contingence et déterminisme procédural appliqués à la synthèse sonore informatique et l'écriture musicale*, Septentrion – Presses Universitaires, 1988
- ² C. Dodge et T.A. Jerse, *Computer Music*, Schirmer Books, 1984
- ³ c. f. M. Battier, *Eléments d'informatique musicale*, 1988
- ⁴ C. Fatus, *Composition musicale et informatique*, Minerve, 1989
- ⁵ J. C. Risset, « Synthèse et matériau musical », *les cahiers de l'IRCAM (n°2)*, IRCAM, 1993
- ⁶ J. O. Smith III, « Observation sur l'histoire de la synthèse numérique du son », *Les cahiers de l'IRCAM (n°2)*, IRCAM, 1993, p. 85
- ⁷ C. Roads, *Computer Music Tutorial*, MIT Press, 1996
- ⁸ P. Depalle et X. Rodet, « De la voix aux instruments », *Les cahiers de l'IRCAM (n°2)*, IRCAM, 1993, p. 123
- ⁹ J. O. Smith III, « Observations sur l'histoire de la synthèse numérique du son », *Les cahiers de l'IRCAM (n°2)*, IRCAM, 1993, p. 87
- ¹⁰ L'environnement *Csound* (écrit en langage C) est un programme de synthèse modulaire né de la famille des Music écrit par Max Mathews dans les années 60. Ce programme présente des modules fonctionnels plus ou moins complexes devant être liés entre eux pour former un synthétiseur (« orchestre ») commandé ou contrôlé par l'écriture d'une partition (« score »).
- ¹¹ multiple non entier de la fondamentale.
- ¹² <http://www.ircam.fr/departements/recherche/ana-syn.html>
- ¹³ P. Depalle et X. Rodet, « De la voix aux instruments », *Les cahiers de l'IRCAM (n°2)*, IRCAM, 1993, p. 131
- ¹⁴ Y. Potard, P. F. Baisnée, J. B. Barrière, « Méthodologie de synthèse du timbre : l'exemple des modèles de résonance », *Le timbre, métaphore pour la composition*, C. Bourgois, 1990, p.144
- ¹⁵ <http://www.ircam.fr/departements/recherche/ana-syn.html>
- ¹⁶ du premier ordre $J_n(I)$, où n est le partiel de rang n et i l'indice de modulation. J. Chowning, « The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation », *Computer Music Journal*, MIT Press, 1977, p. 46
- ¹⁷ I symbolise donc la profondeur de la modulation de la fréquence porteuse sur la modulante. Si $I=0$ le spectre est égal à la porteuse. Plus I augmente plus le spectre est riche en partiels et plus l'amplitude de la porteuse

diminue. La position des partiels est donnée par la formule : p , $p+mn$, $p-mn$. Notons que la fréquence porteuse est présente et que le spectre se déploie d'une façon symétrique par rapport à elle.

¹⁸ C. Dodge et T. A. Jerse, *Computer Music*, Schirmer Books, 1984, p.80

¹⁹ AMP : amplitude de l'oscillateur porteur s'il n'y avait pas de modulation.

AMP de Fm : proportion de l'amplitude non modulée d'un oscillateur porteur exprimée par la variable m, appelée index de modulation.

Si $m=0$: il n'y a pas de modulation, la sortie est une sinusoïde (fp) non modulée.

Si $m>0$: l'onde porteuse prendra une variation sinusoïdale.

Si $m=1$: Fp est modulée à son maximum (l'amplitude de l'oscillateur modulant étant équivalente à l'amplitude non modulée de l'oscillateur porteur)

²⁰ Les fréquences latérales peuvent être perçues individuellement en fonction de la valeur Fm

²¹ Si Amp = 0 (pour la modulation d'amplitude), nous sommes alors dans le cas de la modulation anneau. Bien que la modulation en anneau fonctionne sur l'amplitude de l'oscillateur porteur, elle est souvent adoptée pour altérer la fréquence du son.

²² De même que pour la modulation en anneau, la modulation est une façon de rendre un spectre harmonique inharmonique, mais à la différence de la première, cela n'accroît pas le nombre de composantes dans le son. Dans la modulation de fréquence, le signal d'entrée transforme un oscillateur porteur situé à l'intérieur du modulateur porteur avec une technique appelée modulation de bande latérale unique (SSB).

²³ Pour cela, il est représenté par un modèle physique qui traduit le comportement mécanique et les interactions de ses différentes parties. A partir de la connaissance des matériaux constitutifs de l'instrument et de sa géométrie, l'application en physique des principes de mécanique classique autorise un jeu d'équations différentielles qui régissent les mouvements des différentes parties de l'instrument. Ces équations sont discrétisées puis résolues, la solution exprimant alors le comportement vibratoire de l'instrument en fonction des paramètres qui le définissent.

²⁴ L'équipe du département analyse /synthèse de l'IRCAM a depuis plusieurs années « étudié des classes de systèmes dynamiques non-linéaires qui représentent les traits essentiels de certaines familles d'instruments, en particulier les systèmes à boucles de rétroaction linéaire avec retard et non-linéarités (par exemple, réflexion du son à l'extrémité d'un tube acoustique ou d'une corde vibrante). Pour la classe clarinette, la non-linéarité est considérée comme instantanée. Pour la classe trompette, la non-linéarité n'est pas instantanée. Nous avons implanté des modèles de base des classes clarinette, trompette et voix, notamment en temps réel qui donnent déjà des résultats intéressants et dont l'étude continue. Une autre partie de la recherche a porté sur l'étude des oscillations périodiques et chaotiques. L'ensemble des solutions périodique étant difficile à obtenir, on a du mettre en œuvre des méthodes particulières, par exemple par continuation (homotopie). Enfin, de façon surprenante, les solutions chaotiques se révèlent très intéressantes d'un point de vue musical. Nous avons abordé le contrôle du passage à ces solutions et cherché à permettre une influence graduelle du caractère chaotique ». <http://www.ircam.fr/departements/recherche/ana-syn.html>

²⁵ J. C. Risset, « Synthèse et matériau musical », *Les cahiers de l'IRCAM* (n°2), IRCAM, 1993, p. 50

²⁶ P. Depalle et X. Rodet, « De la voix aux instruments », *Les cahiers de l'IRCAM* (n°2), IRCAM, 1993, p. 129

²⁷ On pourrait élargir ces remarques aux modèles fondés sur le principe de modulation et de distorsion.

²⁸ Nous comprenons pourquoi ce procédé a tant influencé le monde de la synthèse dans les années 70, la puissance de calcul faisant défaut.

²⁹ P. Hanna, M. Desainte-Catherine, *Influence de la densité spectrale sur la synthèse de sons bruités*, JIM 2002

³⁰ N. Misdariis, O. Warusfel, R. Caussé, F. Nicolas, *Le contrôle de la directivité par un système multi haut-parleurs*, JIM 2002

³¹ J. M. Couturier, *La synthèse par balayage et son contrôle gestuel*, JIM 2002

³² M. Laurson et Mika Kuuskankare, *Instrument Concept in ENP and Sound Synthesis Control*, JIM 2002

³³ D. Arfib, P. Sanchez, *Synthèse photo sonique : de la géométrie des ondes au disque virtuel*, JIM 2002

³⁴ M. Stroppa, S. Lemouton, C. Agon, *Chroma : vers une formalisation compositionnelle des processus de synthèse sonore*, JIM 2002

³⁵ V. Verfaillie, *Réalisation d'effets audionumériques adaptatifs en temps réel et hors temps réel*, JIM 2002

³⁶ J.C. Risset, D. Arfib, A. de Sousa Dias, D. Lorrain, L. Pottier, *De inharmonique à Resonant Sound Space : temps réel et mise en espace*, JIM 2002

³⁷ G. Nouno, C. Agon, *Contrôle de la spatialisation comme paramètre musical*, JIM 2002