

Université Paris 8 Vincennes à Saint-Denis  
UFR ARTS, PHILOSOPHIE, ESTHETIQUE  
Département de Musique

## **TRAITEMENTS TEMPS REEL ET ECRITURE**

*Vers un lexique musical de divers  
traitements sonores de base.*

Tom MAYS

Mémoire de Master 2  
sous la direction de  
M. Horacio VAGGIONE

2009-2010

# **I Les traitements et la musique**

# **1 Le temps réel sonore et les traitements de base**

Dans ce chapitre, nous allons d'abord parler du temps réel en général, de sa place historique face au temps différé d'un côté et aux instruments analogique/électronique « live » de l'autre, et de ses avantages, inconvénients et particularités. Ensuite nous allons proposer une liste de catégories du traitement sonore de base avec une brève description de chacune et des traitements concernés que nous estimons constituer une *base* des plus utilisées. En troisième partie de ce chapitre, nous allons présenter les traitements de *contrôle*, les analyses du son donnant lieu à l'extraction de paramètres sonores et musicaux qui sont destinés à la gestion des paramètres des traitements sonores. L'élément de *contrôle* est essentiel pour parler de la création musicale dans les chapitres de chaque catégorie de traitement qui vont suivre.

## **1.1 Le monde particulier du temps réel**

### **1.1.1 Historique**

Avant de parler des aspects musicaux des traitements temps réel, il faudrait bien clarifier les termes et considérer l'historique.

Le terme *temps réel* s'applique à l'informatique qui calcule des traitements de données tellement rapidement que le temps nécessaire pour obtenir le résultat est imperceptible pour l'être humain (ou presque). Avec l'arrivée des premiers ordinateurs temps réel dans les années 60, il a fallu le différencier de l'ancien système informatique qui a pris le nom, par conséquence, de temps différé. Karim Barkati explore en profondeur les implications du temps réel et du temps différé dans sa thèse « *Entre temps réel et temps différé* ». Ici il parle des termes et de la relation à l'informatique :

« Nous pensons en effet qu'en musique, l'expression « temps réel » n'a pas de raison d'exister en dehors des pratiques liées à l'informatique, pas plus que le « temps différé », pour la raison que toute musique sans ordinateur peut être classée de façon triviale dans un camp ou dans l'autre. Par exemple, dire que l'exécution, l'interprétation ou l'improvisation ont lieu en temps réel, ou bien dire que la composition, l'écriture ou la

copie ont lieu en temps différé relève simplement de la tautologie, selon les définitions que nous retiendrons. »<sup>1</sup>

L'arrivée du temps réel dans l'informatique musicale (premières expériences dans les années 70 et présence indiscutable dans les années 80) a instauré une séparation en deux grands axes, deux manières de travailler, voir même deux esthétiques : la musique pour instruments et traitements informatiques exécutés et contrôlés en temps réel, et la musique pour *support* (bande ou bande + instrument). Cette explication est simpliste, mais a l'avantage de pointer l'essentiel. Luc Rondeleux, dans un article intitulé « *Une histoire de l'informatique musicale, entre macroforme et microcomposition* », place l'arrivée du temps réel dans le contexte des formalistes pour qui ce nouvel outil, bien qu'excitant, ne pouvait pas satisfaire les besoins du contrôle des plus minutieux :

« La technique passe de l'enregistrement à la musique mixte puis des systèmes de synthèse hybride aux systèmes temps réel. Au fur et à mesure, l'exigence de souplesse et de rapidité se traduit surtout par une impatience devant l'instrument de production. Car le temps réel se révèle être un leurre : en limitant le traitement du matériau au contrôle de quelques paramètres, il limite la marge de manœuvre du musicien. Le processus de synthèse demeure immuable et il ne permet pas d'orienter les formalismes. »<sup>2</sup>

Aujourd'hui, nous nous interrogeons toujours sur les avantages et les inconvénients des deux mondes<sup>3</sup>, mais il y a beaucoup de croisements et de transversalité: une composition travaillée en studio en temps différé utilise souvent des traitements temps réels pour générer de la matière. Une pièce temps réel va très souvent incorporer des sons ou des séquences qui ont été composés en studio en temps différé.

### **1.1.2 Avantages et inconvénients**

Le traitement sonore par informatique en temps réel fait certaines choses très bien, et d'autres moins bien voir pas du tout. Par exemple, le temps réel, par sa nature, va toujours refléter les variations de la source dans le résultat – si l'instrumentiste joue différemment, le résultat est différent. Cette capacité rend le temps réel bien adapté à l'improvisation, mais donne aussi de la souplesse à la musique écrite. Le temps réel peut aussi permettre de varier la vitesse de

---

1 Barkati 2009

2 Rondeleux 1999

3 Pour plus de discussion sur ce thème, cf. Barkati 2009

déroulement d'une pièce, allant jusqu'à pouvoir suivre le jeu instrumental et avancer en fonction d'une connaissance préalable de la partition. Il permet également de relier les paramètres de traitement à des contrôleurs extérieurs ou à des paramètres extraits d'un jeu instrumental, créant ainsi des dispositifs interactifs et même des *instruments de traitement* qui peuvent, à leur tour, trouver une place dans des partitions futures. Le temps réel c'est la *réactivité*, l'*interactivité*, l'*instrumentalité*, l'*instantanéité*, et le rapport au *geste* et au corps humain.

Quant à ce que le temps réel fait moins bien ou pas du tout, il y a d'abord le grand inconvénient lié à son gros avantage : le temps. Le temps réel reste collé au temps. Il ne peut pas traiter un son AVANT que ce son n'ait existé, et il ne peut pas non plus le traiter plus vite que son déroulement temporel. Nous sommes ainsi « prisonniers » d'un rapport *causal* entre *source* et *traitement*. Par ailleurs, si la source sonore à traiter est un instrument acoustique ou une voix, il y a de fortes chances que l'instrumentiste qui le joue soit présent dans le lieu du concert, et par conséquent, le son direct aussi. Puisque les traitements temps réels en situation de concert contiennent quasiment toujours une part de son direct qui risque de masquer une partie du son traité, il faut toujours penser à une *séparation* avec la source vis à vis d'au moins un des paramètres sonores : le temps, la hauteur, le timbre ou l'espace. Un autre *inconvénient* du temps réel c'est la limite du nombre de paramètres disponibles en même temps et la difficulté d'exécuter un contrôle extrêmement fin sur beaucoup de paramètres de façon déterministe, comme explique Rondeleux plus haut<sup>1</sup>. Nous allons rajouter à cette liste les difficultés techniques liées à l'exécution d'une pièce temps réel, et les problèmes de pérennité des oeuvres dus à la rapidité d'évolution de l'informatique, à la fois le *hardware* et le *software*.

Nous proposons que tous ces *inconvénients* puissent devenir même des *qualités* si nous les connaissons, les acceptons, et les maîtrisons assez bien.

### **1.1.3 Le rapport aux instruments électroniques non-informatiques**

Quel est le rapport entre les instruments informatiques temps réel et les instruments ou

---

<sup>1</sup> Bien que la rapidité et la complexité de l'informatique aujourd'hui, surtout reliée avec les interfaces gestuelles très fines, permettent une qualité et une sensibilité sonore non-imaginable dans les premières années du temps réel, cet *inconvénient* du temps réel a eu une grande importance historique.

appareils analogiques « traditionnels » qui ont beaucoup servi en concert, et qui font parfois des choses que nous ne faisons que REFAIRE avec les moyens informatiques d'aujourd'hui? Et quelle est leur place dans le discours musical que nous allons créer?

Bien que certaines utilisations du temps réel puissent être considérés comme des émulations de techniques analogiques, la malléabilité, la souplesse, le contrôle fin et l'interactivité rendus possibles par les implémentations temps réel ouvrent de véritables nouvelles possibilités de discours. Nous avons, cependant, beaucoup à apprendre des techniques analogiques, et des compositeurs et musiciens qui s'en sont servis et qui s'en servent encore. Le « temps » dégrade la mémoire et le « temps réel » fait croire parfois que tout est nouveau et tout est beau, mais d'autres ont bâti le chemin avant nous.

C'est pour cette raison que nous n'allons pas hésiter à puiser dans des exemples d'utilisations musicales à base d'instruments analogiques dans nos explorations des possibilités d'écriture et de jeu avec les différents traitements – quand ces utilisations sont pertinentes. Nous allons cependant toujours proposer des implémentations et des solutions du domaine du temps réel.

## **1.2 Les traitements temps réel de base par catégorie**

### ***1.2.1 La naissance d'une liste***

Présenter tous les traitements sonores temps réel possibles aujourd'hui et explorer les techniques musicales de chacun est une gageure et un travail impossible à mettre à jour puisque la recherche en informatique musicale en invente régulièrement. Nous avons dû opérer un choix.

Après plus de seize années d'expérience en programmation du traitement son temps réel appliqué à la musique, nous avons pu constater une récurrence évidente de certains traitements qui semblent former une base incontournable dans la panoplie du possible, un ensemble de traitements bien connus et bien utilisés dans la composition et l'improvisation depuis parfois fort longtemps. Nous pensons que l'utilisation de ces traitements est arrivée à une certaine maturité qui nous permet de constater les tendances et de rassembler en un seul endroit l'essence de leurs applications musicales.

L'inventaire qui suit est donc le début d'un travail de constat et d'exploration qui forme ce mémoire et qui continuera dans le travail de doctorat. Cette liste est construite avec une certaine subjectivité, puisque qu'elle est issue en grande partie d'expériences personnelles (compositions, réalisations, cours) mais les avis d'autres experts dans le milieu confirment que l'essentiel y est présent. Nous espérons que la présentation et l'exploration de ces techniques de cette manière permettra, justement, d'aller beaucoup plus loin ensuite.

### **1.2.2 La liste des traitements par catégorie**

Voici les traitements de base séparés en catégories qui, malgré un certain arbitraire personnel, pointe vers des applications musicales bien distinctes et permet d'en parler clairement. Ici, nous ne faisons qu'une brève description globale, puisque chacun fera le sujet d'un grand chapitre – soit dans ce mémoire, soit dans la thèse du doctorat qui va suivre.

Ils sont:

- Le traitement du temps
- Le traitement de la hauteur
- Le traitement de l'amplitude
- Le traitement du timbre par filtrage
- Le traitement du timbre par modulation
- Le traitement de l'espace
- Le traitement de la matière
- Le traitement dans le domaine fréquentiel

#### **1.2.2.1 Le traitement du temps**

Le traitement du *temps* est pour nous le point de départ par excellence, puisque le temps est nécessaire pour toute perception, et le traitement du temps est compris dans la quasi-totalité des autres traitements. L'amplitude, la fréquence, le timbre, le rythme, la forme, l'espace et la mémoire ont tous besoin du temps pour exister ou pour être détectés. Les « multiples échelles du temps » du compositeur Horacio Vaggione, constituent également un témoin de l'importance du temps et du traitement du temps dans la musique. Au sujet de ces échelles,

Anne Sedes dit dans son article *A propos du temps dans la musique d'Horacio Vaggione*<sup>1</sup> :

« Elles peuvent être multiples, hétérogènes, disjointes, discontinues entre elles. Au sein d'un réseau d'objets, la composition va consister à articuler, à opérer entre ces niveaux des interactions, des réciprocitys, des connexions, en quelque sorte à faire émerger et développer des propriétés porteuses de formes, des saillances, des parties, de moments et à qualifier le champ multiple du sonore comme le domaine à part entière de la composition musicale. »

Comment réaliser un traitement du temps et surtout comment le faire en *temps réel* ? Puisque nous devons respecter *l'ordre* du temps, ne pouvant pas faire entendre *l'effet* avant *la cause*, nous ne pouvons que *retarder* les événements sonores, les retenir un certain temps avant de les faire entendre. Nous faisons cela soit par une *ligne à retard* ou plus simplement un *délai* (décalage temporel prédéfini, volatile, limité dans le temps), soit par *enregistrement et relecture* (décalage temporel déconnecté du temps, non-volatile, théoriquement non-limité dans le temps).

Le délai est le plus courant et le plus simple à appliquer, bien que beaucoup plus puissant et complexe que nous pouvons imaginer au premier abord. Il peut agir sur l'espace, le timbre, le rythme, la forme, et même la hauteur. Il a une très longue histoire. Il a vu le jour comme un phénomène physique (l'écho) avant de se retrouver en tant que principe appliqué à la musique (le canon). Il a été recréé très habilement par les enregistreurs de bandes magnétiques, puis s'est fait numérisé et réincarné dans la mémoire de nos ordinateurs.

La technique d'*enregistrement/lecture* comme manière de décaler le temps permet de sortir d'un écoulement de temps prédéfini. Nous pouvons enregistrer un son sur une bande, sur un disque dur, ou bien dans la mémoire vive, puis le rejouer quand nous le voulons, après quelques millisecondes ou bien après quelques années – pourvu qu'il n'ait pas été effacé. Cette technique peut fonctionner sur des sons, des phrases ou des objets musicaux limité dans le temps, mais ne peut pas s'appliquer *en continu* comme le peut un délai.

En conclusion, le délai crée un décalage temporel limité sur une source sonore non limitée en durée, alors que la technique d'*enregistrement/relecture* crée un décalage temporel non-limité sur une source sonore limité en durée. Nous allons présenter en profondeur les caractéristiques et applications musicales de ces deux moyens de décalage temporel dans le

---

1 Sedes 2007, page 89



chapitre *Le traitement du temps*.

### 1.2.2.2 *Le traitement de la hauteur*

En temps réel, un traitement de hauteur s'appelle un *harmoniseur*, un *pitch shifter* ou simplement une *transposition de hauteur*. L'harmoniseur temps réel est construit avec un *décalage à temps variable* en utilisant un principe proche de l'effet Doppler – quand le temps de décalage se réduit progressivement, le résultat devient plus aigu, et quand le temps de décalage s'augmente progressivement, le résultat devient plus grave. L'harmoniseur utilise deux délais variables en alternance qui se re-combinent par fenêtrage pour reconstituer un son continu avec une certaine transposition – l'enjeu technique étant de changer la hauteur sans modifier la durée du son. Le principe de l'harmoniseur existait avant l'ère du numérique temps réel par l'utilisation des magnétophones à bandes avec des têtes rotatives qui permettaient une transposition de la hauteur sans changer la durée, avec son contraire, un changement de durée ou de vitesse *sans* transposition. Des bons exemples historiques de ces fonctions se trouvent dans le *Phonogène Universal* du G.R.M à Paris<sup>1</sup>, ou bien le *Tempophon* de Dennis Gabor<sup>2</sup>.

L'utilisation musicale est, au départ très simple – nous jouons une note et l'harmoniseur génère une transposition qui sonne en même temps que la note *source* créant une certaine harmonie – ce qui explique l'origine du mot *harmoniseur*. Dans la composition et l'improvisation, nous pouvons rendre cet effet bien plus intéressant par le biais d'un contrôle fin et souple d'après des données extérieures ou d'après les caractéristiques du son source lui-même (Cf. supra *Les analyses sonores et le contrôle des paramètres*).

### 1.2.2.3 *Le traitement de l'amplitude*

La troisième catégorie de traitement est celui de l'*amplitude* ou la *dynamique* du son. Nous pouvons considérer que le traitement d'amplitude est à la base une simple amplification sonore, mais que l'intérêt musical vient des possibilités du *contrôle* de cette amplitude : les *enveloppes* et les *modulations cycliques à basse fréquence* (lfo). Dans les deux cas nous

---

1 cf. text sur Pierre Schaeffer de Pierre Couprie sur le site internet de Leonardo / OLATS (<http://www.olats.org/pionniers/pp/schaeffer/theorieSchaeffer.php>), et la page Wikipedia en anglais sur la Musique Concrète ([http://en.wikipedia.org/wiki/Musique\\_concrète](http://en.wikipedia.org/wiki/Musique_concrète)), et la discussion détaillée du Phonogène du Jacques Poullin dans La revue Ars Sonora Numéro 08 (<http://www.ars-sonora.org/html/numeros/numero09/09f.htm>)

2 cf. Roads 1996, pp. 441-442

sortons du domaine de la *dynamique* seule pour intervenir dans le domaine de l'événement sonore et du rythme.

Le traitement d'amplitude serait le plus ancien de tous les traitements, sans doute parce qu'il existe comme phénomène acoustique simple dans la nature, mais aussi parce qu'il est parmi les paramètres sonores le plus simple à être manipulé par les premiers appareils et instruments électroniques, comme les consoles de mixage et les synthétiseurs analogiques.

#### 1.2.2.4 *Le traitement du timbre par filtrage*

La méthode la plus habituelle de traiter le timbre est le filtrage, ce qui fait amplifier, atténuer, ou résonner certaines fréquences ou bandes de fréquences du spectre sonore. Cette catégorie représente les filtres du domaine temporel (amplitude qui varie dans le temps) et non pas ceux du domaine fréquentiel (d'après analyse FFT) qui sont dans la catégorie suivante. Le filtrage se trouve sous différentes formes pour différents utilisateurs : les filtres contrôlables et évolutifs qui conviennent souvent aux compositeurs, les filtres très précis que les ingénieurs son ont tendance à préférer, ou les filtres dits « tone » ou « treble/bass » que l'utilisateur grand public aura sur sa chaîne hifi.

Le filtrage pose un problème particulier dans le contexte du traitement temps réel des instruments acoustiques : le masquage du traitement par le son acoustique ou amplifié de l'instrument traité lui-même. Ce problème est très prononcé quand le filtrage ne fait que *réduire* certaines fréquences ou bandes de fréquences, car le son non-traité recouvre le son filtré en remettant effectivement les fréquences manquantes. Même les filtres résonants qui amplifient certaines fréquences ont du mal à s'entendre puisque la source recouvre tout sauf les fréquences les plus fortes. Cela nous pousse fréquemment à sur-amplifier les traitements et à provoquer de la réinjection et de l'effet Larsen. La solution musicale, comme évoqué plus haut dans *Avantages et inconvénients* est de créer une séparation de la source, avant ou après filtrage, sur le plan du temps, de la hauteur, du timbre, ou de l'espace – ainsi rendant le son filtré plus indépendant du son source, et donc plus perceptible. C'est pour cela que les filtres se trouvent le plus souvent accompagnés d'autres effets dans une chaîne de traitements.

Les filtres sont très connus du monde analogique, comme les traitements de temps, hauteur, amplitude et timbre que nous avons discutés jusqu'à maintenant, alors qu'est-ce que les

techniques de l'informatique temps réel peuvent apporter? Comme pour les autres effets, ce sont les possibilités d'un contrôle extrêmement précis, dynamique, évolutif et interactif qui font la différence. Dans ce sens, nous voulons souligner une application très importante du filtrage contrôlé qui est le *filtrage par modèles de résonance* – technique qui configure une banque de filtres résonants d'après l'analyse antérieure d'un son qui en devient le *modèle* par lequel le son à traiter va passer, ainsi excitant les fréquences communes et effectuant une sorte d'hybridation<sup>1</sup>.

#### 1.2.2.5 Le traitement du timbre par modulation

Cette catégorie est la deuxième de celles relatives au timbre. Pour expliquer ce que nous entendons par *modulation*, nous citons Miller Puckette qui dit « Le terme *modulation* s'applique vaguement à toute technique qui altère systématiquement le contour d'une forme d'onde en tordant son graphe verticalement ou horizontalement. »<sup>2</sup>. Ainsi, en suivant son exemple, nous allons mettre ensemble *la modulation d'amplitude*, *la modulation en anneau* (*ring modulation* en anglais) avec sa cousine *la transposition de fréquence* (*frequency shifting*), et la distorsion non-linéaire (*waveshaping*).

Musicalement, la modulation d'amplitude, la modulation en anneau et la transposition de fréquence décalent les fréquences spectrales et créent de l'inharmonicité dans le timbre. La modulation en anneau et la transposition de fréquence sont les plus utilisés, ayant l'avantage d'éliminer la source à cause du fait qu'ils opèrent une modulation *bipolaire* alors que la modulation d'amplitude opère une modulation *unipolaire*<sup>3</sup>. Ces modulations sont capables d'effectuer des transformations très marquées et bien perceptibles dues au fait que le résultat ne contient pas les mêmes fréquences que la source. Elles sont aussi très pratiques pour rendre d'autres transformations plus évidentes (comme les filtrages, par exemple) ou pour modifier le spectre même légèrement et ainsi éviter des mauvais effets de Larsen. Également, la modulation en anneau de basses fréquences (< 20 Hz) crée un effet de trémolo très efficace.

La distorsion non-linéaire est une forme de modulation qui agit directement sur la forme d'onde. Un niveau d'amplitude en entrée passe par une fonction de forme d'onde qui détermine

1 Voir *Les modèles de résonance: Modèles de continuité entre synthèse et traitement*, J.-B. Barrière dans *Modèles physiques création musicale et ordinateur*, Maison des Sciences de l'Homme, 1995

2 « The term "modulation" refers loosely to any technique that systematically alters the shape of a waveform by bending its graph vertically or horizontally. ». Puckette 2007, p 119. C'est nous qui traduisons.

3 Roads 1996, pp. 215-224; Dodge 1985, pp. 80-85; Moore 1990, pp. 185-187; Dobson 1992, pp 135-6

le niveau d'amplitude correspondant : une forme d'onde est ainsi *modulée* par une autre (Roads 1985a; Dodge 1985, pp. 128-129). C'est une manière très efficace pour générer de la richesse dans le spectre, le plus connu de ces effets étant la *saturation* – longtemps utilisé dans le domaine analogique et la musique populaire.

#### 1.2.2.6 *Le traitement de l'espace*

Par cette catégorie nous entendons l'espace *acoustique* du son – les spatialisations, virtuelles ou réelles, les traitements sonores qui créent l'impression que le son vient d'un certain endroit ou qu'il se déplace, qu'il vibre dans un certain type d'acoustique avec une qualité de réverbération et de réflexion. Le traitement de l'espace, comme le plupart des autres traitements, est beaucoup plus vieux que ses petits cousins du temps réel. Le son et la musique ont toujours existé dans l'espace et les hommes ont toujours voulu *occuper* l'espace de différentes façons – entre l'espace d'un tambour signalétique qui passe de colline en colline et une danse tribale avec la musique tournante des danseurs, ou l'emplacement et déplacement des musiciens dans les églises de la musique ancienne et les projections sonores dans les amphithéâtres. L'espace n'a pas toujours été un paramètre de composition comme la hauteur, le rythme et l'harmonie, mais il a toujours fait partie de la musique<sup>1</sup>.

Il y a deux grandes écoles de spatialisation dans la musique électroacoustique et mixte : la première est la création d'un espace homogène où le son se place et se déplace librement parmi des haut-parleurs qui s'effacent devant la mobilité sonore qu'ils portent, et la seconde est la création d'un espace non-homogène occupé par différents haut-parleurs et types de haut-parleurs placés dans des endroits stratégiques qui ne définissent pas un espace virtuel et transparent, mais un espace où les haut-parleurs colorent et positionnent les sons par des assignations directes<sup>2</sup>. Dans les deux cas (et dans les cas « entre les deux ») ce sont des outils d'écriture d'espace très puissants, qui permettent, avec les possibilités du contrôle que le traitement temps réel amène, que l'espace s'écrive au même titre que les paramètres musicaux « traditionnels ».

---

1 Pour discussions sur les spatialisations sonores et réverbérations, voir aussi Moore 1989 et Moorer 1979; Zelli 2009

2 Deshays 2006; Thigpen 2009

### 1.2.2.7 *Le traitement de la matière*

*Le traitement de la matière* est représenté par la synthèse granulaire qui offre une manipulation sonore inégalée dans le domaine temporel. L'idée que nous pouvons recréer une énorme palette de sons en regroupant des petits grains de micro son a fait naître une profusion d'applications et expériences musicales<sup>3</sup>.

Les deux formes de synthèse granulaire les plus adaptées à un travail de traitement temps réel sont 1) la granulaire d'une mémoire dynamique, une ligne à retard qui est constamment renouvelé pour le son entrant, et 2) le *gel* sonore.

Dans la granulaire d'une ligne à retard, nous n'avons pas toutes les possibilités de voyager « dans le temps » que propose la synthèse granulaire d'un enregistrement *fixe*, mais l'aspect réactif et dynamique compense de manière largement suffisante. Ça permet de traiter un son en changeant tous ses paramètres – de l'intensité à la hauteur en passant par la densité et l'articulation. Nous pouvons faire d'un son faible un son fort, d'un son dense un son éparse, d'un son stable une mélodie et d'un son mouvant un son stable.

Le *gel* sonore (*freeze* en anglais) est simplement une forme dédiée du granulaire. Cela enregistre une petite mémoire avec un son, et ensuite le joue comme une masse continue et tenue. Nous le considérons être du temps réel car quand le *freeze* est implémenté, nous avons l'impression qu'il « émerge du son direct ».

### 1.2.2.8 *Le traitement dans le domaine fréquentiel*

Le domaine fréquentiel est une zone à part dans l'ensemble des traitements temps réels. Il est comme une dimension parallèle pour laquelle il y a un portail d'entrée et un portail de sortie : l'entrée étant représentée par différentes formes d'analyses spectrales, et la sortie par différentes formes de resynthèses.

L'idée centrale est que le son, qui est dans le domaine temporel, est analysé pour son contenu spectral (fréquences, amplitudes et phases) en suivant son évolution dans le temps. Une fois que le son passe par cette représentation de données du spectre, on dit qu'il est dans le domaine fréquentiel. Il est maintenant prêt à subir toute sorte de traitements en agissant directement sur ces paramètres : manipulation directe de l'amplitude ou de la phase de chaque

<sup>3</sup> Roads 1985b, Roads 2006,

fréquence (modification directe du spectre et donc du timbre), croisement ou convolution avec les données spectrales d'un AUTRE son qui aurait également passé dans le domaine fréquentiel (synthèse croisée, empreinte de timbre, hybridation), traitement temporel sur différentes fréquences individuellement (délai spectral), etc. Une fois le traitement terminé, les données du spectre doivent passer par l'analyse inverse, ou bien la resynthèse, pour revenir dans le domaine temporel du départ.

La méthode d'analyse spectrale la plus répandue est la *Transformée de Fourier* qui a ses origines en 1822 quand Joseph Fourier a proposé qu'une fonction périodique pouvait se représenter par une somme d'un nombre fini de sinusoides. Après différents essais pour construire des analyseurs mécaniques et analogiques datant de la fin du 19e siècle et continuant durant le 20e, les années 1960 ont vu l'arrivée des analyses nettement plus précises en utilisant les outils informatiques. *La transformée de Fourier* a été rejointe par d'autres analyses comme *l'analyse par filtre hétérodyne* et *le vocodeur de phase*, puis a trouvé sa place dans la *transformée de Fourier discrète* avec ses fenêtres d'analyses qui avancent pas à pas dans le temps en faisant à chaque pas une *transformée de Fourier rapide* qui extrait les amplitudes et les phases d'un nombre de tranches ou *bins* du spectre qui correspond à la moitié de la taille de la fenêtre d'analyse (Roads 1996). Dans le langage courant, ce sont surtout le terme *FFT (Fast Fourier Transform)* ou son application *le vocodeur de phase* qui sont utilisés pour désigner cette analyse discrète avec des fenêtres à court terme, qui est impliquée dans la grande majorité des traitements dans le domaine fréquentiel<sup>1</sup>.

Les outils musicaux dans le domaine fréquentiel sont nombreux et variés. Il y a le simple mais efficace *filtre fft* qui marche comme un égaliseur de spectre, une banque de filtres « tranchants » par *bin* de la FFT. Il y a également la famille des *synthèses croisées* incluant le *filtrage par convolution* ou *empreinte de timbre (timbre stamping* dans Puckette, 2007) où les magnitudes du spectre d'un son contrôlent les magnitudes du spectre d'un autre, ou bien la *synthèse croisée généralisée* qui peut échanger les magnitudes d'un spectre avec les phases d'un autre – ainsi créant des sons hybrides et même un effet d'interpolation de timbres (*morphing* en anglais)<sup>2</sup>. Un autre traitement qui a eu un certain succès ces dernières années est

1 Pour une excellente description abordable de l'analyse Fourier, voir l'appendice dans Roads 1996 avec Philip Greenspun. Pour une explication en profondeur du côté mathématique voir Puckette 2007, chapitre 9, *Fourier Analysis and Resynthesis*.

2 Pour des exemples de performances avec traitement vocal et instrumental dans le domaine spectral, voir les *Convolution Brothers*, ensemble live de trois pionniers du temps réel: Cort Lippe, Miller Puckette, et Zack Settel (<http://www.music.buffalo.edu/lippe/convolutionbrothers/>)

le *décalage spectral* qui consiste à appliquer une ligne à retard séparée à différents groupes de *bins* de fréquences de la FFT (Pekonen, Välimäki, Abel, Smith 2009; Gibson 2009). Nous avons également la *compression/expansion temporelle* (changement de durée sans changer la hauteur) qui est une des applications du domaine fréquentiel la plus importante. La difficulté avec ce traitement dans un contexte temps réel et sa nature plutôt *hors temps* : on ne peut ni faire écouter un son plus vite qu'il ne se déploie dans le temps, ni ralentir un son indéfiniment car le moment « live » de la source sera de plus en plus loin du moment de la relecture au ralenti – occupant de plus en plus de mémoire. Nous pouvons aussi inclure les modifications du timbre d'après les décalages des *bins* d'analyse (*bin shifting* en anglais) ou bien la spatialisation spectrale qui consisterait à spatialiser séparément différentes bandes de *bins*.

Nous voyons clairement que, malgré le fait que le domaine fréquentiel donne un accès direct au spectre, nous pouvons traiter beaucoup d'autres choses que le timbre. D'ailleurs, cette catégorie touche tout simplement toutes les autres catégories, avec parfois des applications musicales très similaires<sup>1</sup>.

## **1.3 Les analyses sonores et le contrôle des paramètres**

### **1.3.1 Le principe d'analyse et du contrôle**

Nous ne pouvons pas parler des applications musicales des traitements temps réel sans parler un peu de l'aspect du contrôle des paramètres d'après des analyses. C'est un des éléments le plus important qui distingue le potentiel du temps réel des outils analogiques historiques. Nous faisons donc une brève description des types d'analyses que nous trouvons aussi « basique » que la liste des traitements.

### **1.3.2 Les types d'analyses**

#### **1.3.2.1 Le suivi d'enveloppe et la détection des attaques**

La technique de suivi la plus simple, rapide et « légère » à faire est sûrement le suivi

---

<sup>1</sup> Pour des discussions d'applications de modifications timbrales, voir aussi Dolson 1989

d'enveloppe.<sup>1</sup> Ça se passe dans le domaine temporel et n'a besoin que de lisser les changements d'amplitude et d'extraire une valeur. Nous pouvons faire une détection de dépassement de seuil pour faire un *déclenchement* sur une attaque du son, ou bien suivre les changements d'amplitude sur plus ou moins de temps et les connecter à divers paramètres des traitements sonores. Pour voir une application musicale du suivi d'enveloppe, cf. II 2.3.2 LFO d'amplitude contrôlé par le suivi d'amplitude, page 61.

Il existe un autre modèle de détection d'attaque : par reconnaissance de timbre. Un système va *apprendre* un ensemble de timbres (enveloppes spectrales), et par la suite va *écouter* des nouveaux sons et les comparer avec les timbres en mémoire pour ensuite faire une identification. Ça marche surtout avec les sons de percussions, et surtout avec un *objet* pour MaxMSP créé par Miller Puckette qui s'appelle *bonk*<sup>2</sup>.

### 1.3.2.2 Suivi de hauteur

Le suivi de hauteur se fait par une analyse dans le domaine fréquentiel combinée avec une analyse approfondie des *pics* pour en déduire l'existence d'une fondamentale. C'est bien plus lourd qu'un simple suivi d'amplitude, et il y a une certaine latence intrinsèque. Cependant, il est très pratique pour modifier des traitements selon des registres du jeu (du moins pour les instruments monophoniques) et, peut-être plus significatif, il peut être appliqué à des algorithmes de suivi de partition – l'ordinateur qui compare le jeu de l'instrumentiste à la partition en mémoire pour pouvoir avancer dans sa liste d'événements et permettre à l'instrumentiste d'être le *maitre du jeu*. Un des exemples le plus réussi d'une composition pour traitements temps réel et suivi de partition est *Jupiter* de Philippe Manoury<sup>3</sup>. Pour voir une application musicale de la suivie de hauteur, cf. II 2.2.2 Harmoniseur contrôlé par la détection de hauteur, page 57.

### 1.3.2.3 Détection du centroïde spectral

L'analyse du centroïde spectral emploie une analyse fft pour, en quelque sorte, calculer le *centre de gravité* du spectre, autrement dit le *centre pondéré*. On obtient une indication de la brillance ou de la richesse dans le timbre. En pratique, il est parfois impossible de différencier

---

1 Settel 2001

2 <http://cra.ucsd.edu/~tapel/software.html>

3 Documentations et enregistrements de *Jupiter* de Philippe Manoury se trouvent à la Médiathèque de L'Ircam



un centroïde d'un son aigu et un son grave très riche en contenu aigu, mais nous pouvons par contre très facilement suivre l'ouverture d'un timbre sur une note unique (voix ou instrument). Pour voir une application musicale de la détection du centroïde, cf. II 2.5.2 Transposition de fréquence et contrôle par le centroïde, page 68.

#### 1.3.2.4 *Détection de transitoires*

Une détection de transitoires peut se faire très simplement par une technique qui consiste à compter le nombre de fois qu'un signal traverse une valeur de « 0 » par laps de temps. Il se trouve que le bruit fait des traversées par zéro *beaucoup* plus souvent que les sons voisés<sup>1</sup>. Pour voir une application musicale de la détection de transitoires, cf. II 2.4.2 Filtre contrôlé par une détection de transitoires, page 65.

---

<sup>1</sup> Settel 2001