

Décorrélation microtemporelle, morphologies et figurations spatiales

Horacio Vaggione

Université Paris VIII

Centre de Recherche Informatique et Création Musicale (CICM)

Horacio.Vaggione@univ-paris8.fr

Résumé

Dans ce texte je présente de façon sommaire une approche concernant directement la composition musicale électroacoustique : il s'agit de générer des attributs morphologiques d'ordre spatial au moyen de décorrélation de sons effectuées dans le domaine du microtemps. Utilisées en amont des systèmes de diffusion ou de spatialisation globale, les techniques de décorrélation contribuent à enrichir la palette d'outils dont nous disposons pour sculpter l'espace «interne» d'une oeuvre musicale.

Mots clefs : Composition musicale, électroacoustique, algorithmique, échelles temporelles, microtemps, espaces sonores.

Introduction

En musique, comme dans toute chose, il n'y a pas des coïncidences temporelles autres que relatives: reliées à une échelle temporelle particulière. Cette absence d'absolu quant à la simultanéité des événements musicaux n'est pas cependant quelque chose de gênant; au contraire, nous pouvons tirer bénéfice de ce fait pour créer des sons «vivants», comportant des mouvements divers et complexes. Notre perception auditive est sensible à des variations temporelles très petites, de l'ordre de quelques millièmes de seconde [Green 1971, Freed 1999, Roads 2002]. La musique semble conséquemment tirer parti de ce fait, car elle se manifeste comme un tissu de relations qui s'instaurent à des multiples échelles temporelles. Une vision «multi-échelle» concernant son organisation devrait permettre d'approcher cette complexité.

Dans cette présentation je fais état d'un aspect particulier de cette problématique multi-échelle: la définition d'espaces sonores au moyen de techniques de décorrélation microtemporelle. Ces techniques sont utilisées actuellement en ingénierie du signal, dans certains systèmes de spatialisation globale (voir par exemple [Lindemann 1986], [Kendall 1995], [Kaup et al. 1999]). Mon point de vue, cependant, sera celui de montrer une application concernant spécifiquement la composition musicale électroacoustique, ce qui est une toute autre affaire, car l'enjeu est ici d'utiliser une possibilité «morphologique» — la décorrélation — en tant qu'outil faisant partie d'une palette diversifiée de moyens compositionnels.

Il me semble, plus précisément, que la décorrélation microtemporelle occupe une place particulière dans cet ensemble de moyens, une peu comme ce qui se passe avec la synthèse granulaire, dans le sens d'une mise en place d'une approche morphologique qui contribue à générer certains types de singularités sonores, qui ne sont certainement pas universelles, mais qui sont efficaces pour atteindre certains objectifs musicaux.

Des exemples de décorrélation microtemporelle se trouvent dans les oeuvres d'un bon nombre de compositeurs. On constate cependant une absence d'élaboration théorique et par conséquent de littérature concernant notamment les aspects compositionnels. Dans ce texte je signale à pas de course quelques conditions, concepts et procédures, afin de faire remarquer la spécificité du champ des effets spatiaux générés par la décorrélation.

Approche du mixage algorithmique

Rétrospectivement, je crois avoir réalisé personnellement l'importance de la décorrélation microtemporelle pour la composition musicale électroacoustique, spécialement en ce qui concerne une définition d'attributs d'ordre spatial, en travaillant dans le cadre d'une situation typique de «studio numérique», c'est-à-dire en temps différé : ayant utilisé pour réaliser mes compositions, depuis fort longtemps, des environnements de programmation appartenant à la famille *Music N* [Mathews et al. 1969], j'ai été confronté avec les avantages et les problèmes de la manipulation purement numérique de fichiers de son, où une déclaration de type «note» peut activer (instancier) plusieurs fichiers à la fois (en fait, un nombre illimité), mais au prix d'un contrôle sévère des valeurs respectives d'amplitude et de phase, afin d'éviter des effets de distorsion. Ceci m'a conduit à utiliser des procédures de mixage algorithmique [Vaggione 1984] où la synchronisation temporelle est gérée de façon assez précise. J'ai réalisé ainsi des mixages numériques dans lesquels des déviations très petites dans l'alignement temporel des fichiers de son (spécialement quand, afin d'élaborer des textures denses, je répliquait plusieurs fois certains fichiers) produisaient (à condition de placer chaque réplique dans un canal différent) une sensation d'espace et de mouvement.

De cette expérience est venu l'idée de jouer de façon explicite avec des décorrélations de sons dans un contexte multi-canal, afin de travailler les attributs spatiaux des morphologies composées.

Approche de la décorrélation

Les termes «corrélation», «décorrélation» ou même «autocorrélation» peuvent avoir des sens diverses, selon le paradigme ou le contexte dans lequel ils sont utilisés (voir par exemple [Prigogine 1989], ou [Roads 2002]). Dans le cadre de cette présentation j'utilise le terme décorrélation (de signaux audio) dans le sens énoncé par Kendall : «un processus dans lequel un signal-source audio est transformé en des multiples signaux en sortie qui apparaissent comme étant visuellement différents les uns des autres, mais qui sonnent identiquement à la source» ("a process whereby an audio source signal is transformed into signals with waveforms that appear different from each other, but which sound [Kendall 1995]. Evidemment ceci ne constitue pas une définition de la décorrélation, mais seulement une description d'un des ses «symptômes».

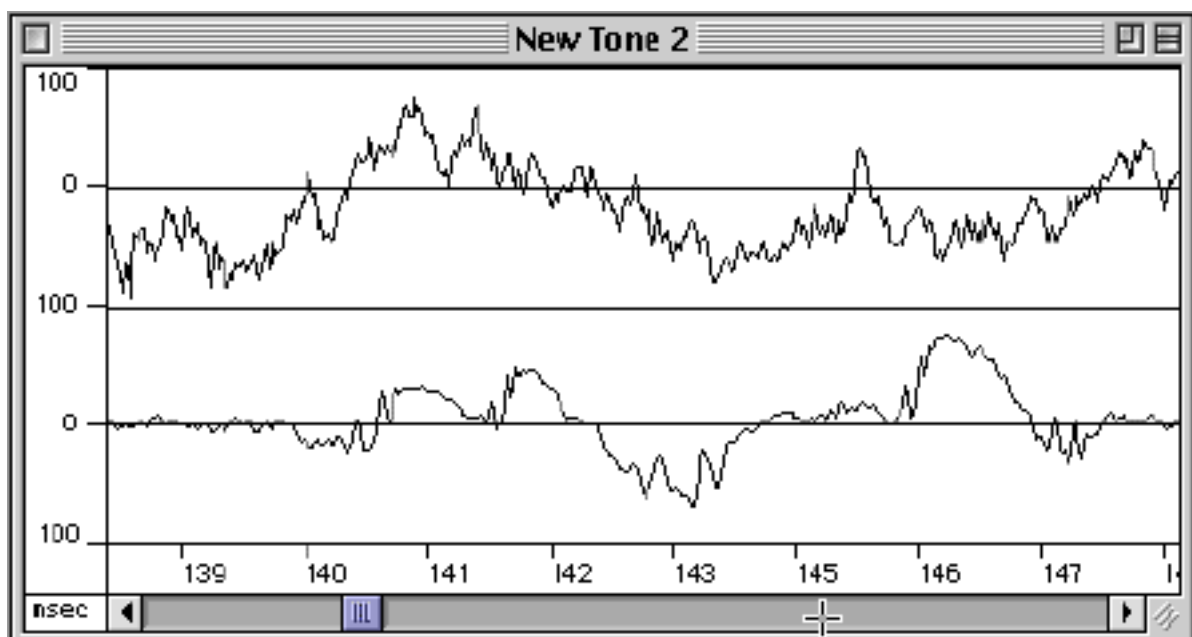


Figure 1

La figure 1 représente les formes d'onde d'un court moment tiré d'une séquence formée par un mixage de plusieurs fichiers stéréo. Avant mixage, chaque fichier stéréo avait été décorrélé — ou désynchronisé, ou déphasé — à divers moments, avec des valeurs différentes; ces décorrélations avaient été placées à des endroits spécifiques en raison de critères morphologiques. Chaque décorrélation était réalisée en agissant sur deux paramètres:

- (a) le temps de décalage entre les canaux (toujours de l'ordre des millièmes de seconde);

(b) la direction de celui-ci dans le plan de l'azimut (une "incision" pratiquée dans un canal produira un mouvement à partir de ce canal vers l'autre).

La superposition de sources stéréo (comportant des ensembles de décorrélations spécifiques pour chacune d'entre elles) crée en fait un *tissu de décorrélations*, duquel découle la perception d'une multiplicité concernant l'espace et le mouvement. Bien entendu, la figure 1 ne nous permet pas de remarquer facilement ces opérations préalables : elles sont pour ainsi dire «cachées» dans les formes d'onde. La figure, représentant un résultat, ne nous permet non plus d'affirmer avec certitude que nous sommes face à un cas de décorrélation (il pourrait bien s'agir de deux signaux différents). Seule la perception sonore de ce qui est représenté ici visuellement peut confirmer ou infirmer ce point [Vaggione 2001a].

La figure 2 montre un cas plus clair, dans la mesure où il s'agit du début d'un mixage partiel ayant contribué à la texture complexe représentée dans la figure 1. L'intervalle initial de décorrélation est ici de 13 ms. On peut suivre le cours des deux formes d'onde dans leur séparation croissante.

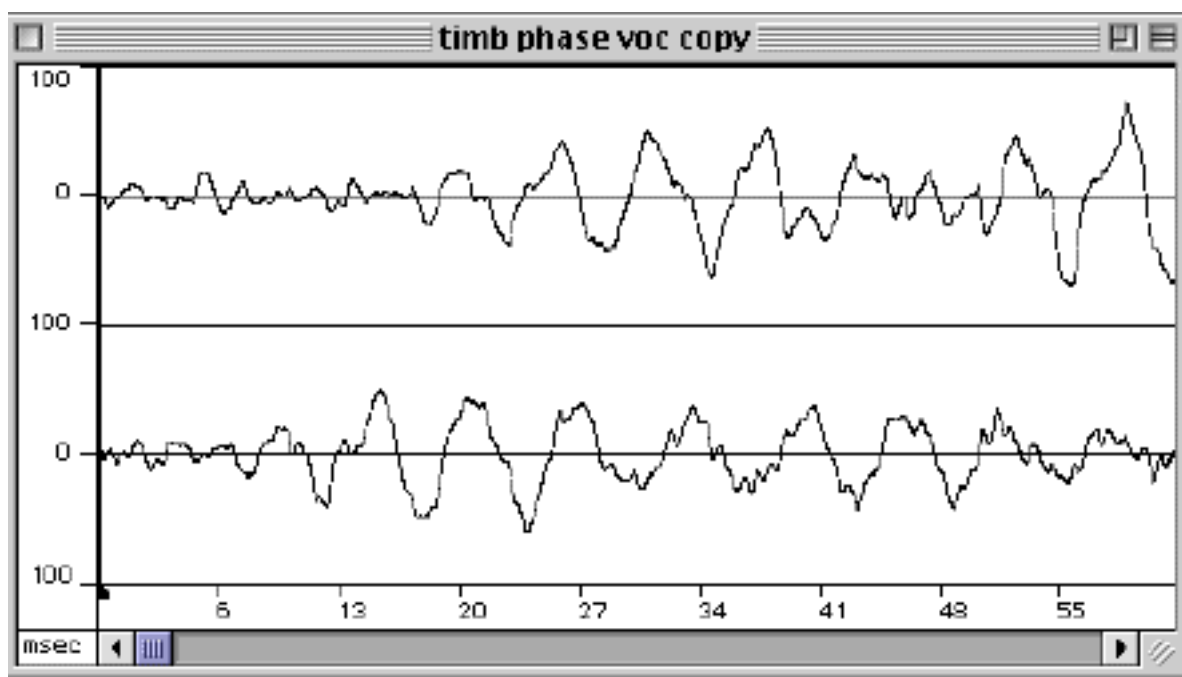


Figure 2

Un exemple simple

Evidemment les choses sont plus simples quand il s'agit de confronter un seul objet sonore monophonique avec sa réplique «sèche», n'ayant qu'une seule valeur de décorrélation maintenue du début à la fin (figure 3). Nous avons ici trois événements successifs (A, B, C), distribués en ordre ascendant du point de vue des fréquences (ceci étant clairement indiqué par les allures des trois formes d'onde respectives). Etant un objet très bref, nous pouvons régler l'échelle temporelle nous permettant de voir le début et la fin. La décorrélation entre la source et la réplique est arbitrairement fixée à 31 millièmes de seconde. Cette décorrélation a été réalisée tout simplement en coupant 31 ms sur le support du canal source, avant le début du signal. Ce cas élémentaire nous permet déjà, à l'écoute, de percevoir la figure musicale dans un espace «plus grand» que celui de l'original seul, ainsi qu'une directionnalité (un mouvement ou trajectoire — ici orienté dans un sens unique — dans le plan de l'azimut).

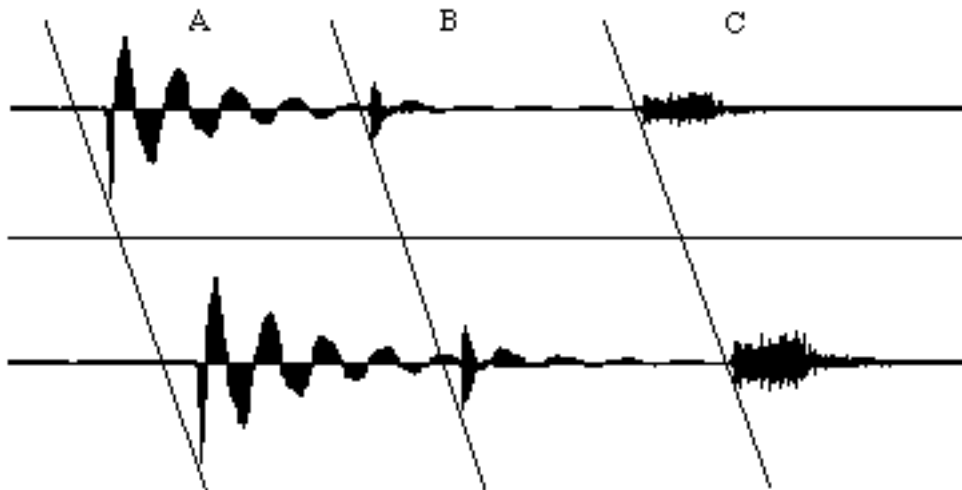


Figure 3

ITD et information sur la phase

En fait la décorrélation modélise, au niveau des sources, l'effet dit ITD («interaural time delay») concernant le décalage d'arrivée de l'information acoustique (des «fronts d'ondes») entre les deux oreilles [Begault 1994], [Malham 2001]. Des expériences psycho-acoustiques ont montré, comme on pouvait l'espérer, que «l'information concernant la phase est d'une importance cruciale pour déterminer la direction des sons», et donc également importante «non seulement pour une reproduction perceptuellement correcte des sons analysés, mais aussi pour le contrôle de la synthèse. Si la perception spatiale peut être un paramètre de contrôle de la synthèse (...) une meilleure connaissance est nécessaire afin de traiter la phase de manière efficiente» [Andersen et Jensen 2001].

Des opérations de décorrélation peuvent donc être réalisées par pure resynthèse, à condition d'inclure dans celle-ci toutes les données d'analyse correspondant à la phase. Elles peuvent être réalisées aussi de façon «arbitraire», c'est-à-dire par des manipulations directes de formes d'onde, sans passer nécessairement par le cycle analyse/resynthèse (bien que ce passage soit toujours souhaitable et parfois inévitable),

Décorrélation microtemporelle «arbitraire»

Dans un travail de modélisation stricte de l' ITD ce qui compte est d'isoler les intervalles temporelles optimaux pour aboutir à une reproduction «réaliste» du contenu spatial de sons préexistants. Typiquement, ces intervalles occupent une région temporelle située entre 5 µsec et 1.5 msec [Begault 1994]. Un travail de composition d'attributs spatiaux des morphologies sonores, faisant partie d'une situation de production musicale, ne vise pas une modélisation stricte de l' ITD, mais l'utilise comme cadre de référence. Parfois les procédures d'analyse/resynthèse, de tous types possibles (Fourier, Gabor, ondelettes, etc.), sont, comme je l'ai déjà dit, nécessaires, au delà d'un but de modélisation, pour sculpter l'espace d'un son particulier. Dans d'autres cas, un travail sous-tendu par ce cadre de référence mais également affranchi de celui-ci, peut être plus intéressant, car le but est, en composition musicale, d'une autre nature que celui de la modélisation elle-même. Des intervalles de temps distribués arbitrairement peuvent donc se justifier au delà de toute naïveté cognitive: dans l'exemple donné plus haut, j'ai spécifié un intervalle de 31 ms, ce qui est évidemment trop pour modéliser l'«interaural time delay», mais optimal dans son exagération, car son but est celui de créer une directionnalité souhaitée pour des raisons musicales.

Ambiguïté et précision

Il faut considérer par ailleurs que l'un des effets des techniques de décorrélation appliquées à des ensembles de sources sonores est sans doute d'apporter une considérable ambiguïté concernant la localisation spatiale des sources, donc de faire apparaître des espaces «virtuels» qui semblent entretenir des rapports singuliers avec les espaces physiques où ils se manifestent. On peut considérer, de plus, que cette approche dévoile «un véritable *trade off* entre la nature enveloppante de l'expérience auditive spatiale et la précision de la localisation» (Kaup et al. 1999).

Conditions de la décorrélation microtemporelle

En tout cas, pour parler proprement de décorrélation microtemporelle, qu'elle soit «arbitraire» ou basée sur de données d'analyse spectrale concernant les valeurs de phase, il faut créer une situation dans laquelle sont remplies quelques conditions minimales:

a) faire des répliques et les placer dans des canaux différents

Des séquences (des fichiers de son) monophoniques ou stéréophoniques doivent être répliquées. Les répliques seront placées dans des canaux différents. Étant donnée cette distribution, la décorrélation temporelle va se faire entre les «originaux» et leurs répliques. La raison de cette condition réside dans le fait que c'est plus facile de manipuler les rapports de phase entre deux pistes physiquement séparées. On pourrait objecter cette assumption en disant que, à l'instar des sons modelés par l'ITD, on a besoin «seulement» de déterminer les séries de valeurs correspondant à la phase. Cependant, dans la modélisation de l'ITD on se concentre sur la production d'un objet unique (un son de piano, par exemple), tandis que dans la composition de décorrélations on vise une complexité musicale, comme je l'ai déjà dit, impliquant une hiérarchie de figures, objets, textures, etc., afin de construire une polyphonie spatialisée. La seconde raison réside dans le fait qu'une séparation physique sur deux canaux empêche que les rapports micro temporels ne tombent pas dans le domaine fréquentiel (sous forme de *phasing*, etc.). Je traiterai de ces deux points dans ce qui suit.

b) construire une polyphonie

Il faut considérer que la décorrélation a un sens morphologique évident, musicalement parlant, quand sont présentes plusieurs sources avec leurs répliques respectives, lesquelles sont décorréliées avec des valeurs d'offsets et des directionnalités variées, tant du point de vue des valeurs initiales, de leur directionnalité que de leur évolution dans le temps. C'est-à-dire: si on a une séquence de plusieurs seconds couplée avec sa réplique décorréliée avec une seule valeur stable on aura une image figée et le mouvement spatial ne serait pas intéressant; pour qu'il le soit, il faudrait réaliser des décorrélations dont les paramètres soient réellement «time-varying», et que diverses lignes temporelles soient superposées.

La condition de la stéréophonie comme formule de base de la composition de décorrélations se justifie car l'image stéréophonique constitue un support fiable quant à la transmission des informations de phase. Des situations multiphoniques sont à concevoir comme des situations dans lesquelles plusieurs paires stéréos sont assignées à des plans spatiaux spécifiques. On peut, bien évidemment, faire circuler les informations de phase dans des dispositifs multipistes (8, 16, etc.), mais l'expérience m'a montré que cela est plus facile à déterminer en procédant par addition de paires d'images stéréo. Ceci est, en tout cas, un point de vue personnel, sujet, comme il se doit, à discussion.

c) travailler dans le domaine du microtemps

Bien entendu, une condition essentielle, sans laquelle les autres n'auront pas de sens, se réfère à la taille des offsets: les échelles utilisées pour la décorrélation des répliques doivent se situer dans le domaine du microtemps, avec des valeurs de l'ordre de quelques millièmes de seconde; si les écarts temporels sont sensiblement plus grands (de l'ordre du macrotemps), les effets ici considérés ne se produiront pas.

Espace versus fréquence

La seconde raison que nous avons pour adopter une séparation physique (un original et une réplique placée dans des canaux différents) réside dans ceci: dans le cas d'une situation monophonique, les décorrélations, étant alignées dans le même canal, ne vont pas causer une perception de mouvement spatial; elles vont créer cependant, si les décalages sont très petits, une série d'effets reliés au domaine fréquentiel: les signaux seront ainsi «colorés» (comme dans le *flanging*, etc.). Une table tirée de [Kendall 1995] donne un aperçu de cette situation (figure 4).

Stimulus	Correlation Measure	Perceptual Result
original alone	---	original timbre
original plus delayed replica: no decorrelation	1.	"colored", "combed"
original plus delayed & decorrelated replica: little decorrelation	.9	"colored", "combed"
↓	↓	↓
complete decorrelation	0.	original timbre restored

Figure

Temps différé/temps réel

Dans ce qui suit je ne ferait aucune différence entre la production de décorrélation en temps différé ou en temps réel. Bien que mes propres expériences ont commencé dans le domaine de la synthèse en temps différé, j'ai utilisé plus tard des objets logiciels pour régler les offsets et les variations micro temporelles en temps réel. Ainsi la notion de "piste" ou de "canal" s'applique indifféremment aux deux domaines.

Différences locales de phase

La décorrélation implique un travail sur des rapports de phase. Mais il faut dire néanmoins que la décorrélation entre diverses pistes contenant le même son ne va pas nécessairement causer de phénomènes de distorsion globale de phase (perte d'amplitude par exemple). Elle va plutôt engendrer une grande quantité de différences locales de phase, négatives et positives, qui se succèdent rapidement. C'est cette relation kaléidoscopique («multi-locale») qui contribue à instaurer une dynamique spatiale.

J'ai exposé ailleurs cette idée de stratégie «multi-locale», en rapport avec une approche syntaxique des processus de composition s'étalant dans des multiples échelles temporelles — voir par exemple [Vaggione 1998], [Budon 2000], [Vaggione 2001b]. Evidemment, une recherche plus poussée devrait être conduite à propos des diverses micro-échelles temporelles qui sont ici à l'oeuvre, afin de dégager des critères additionnels concernant le rôle de ces micro-échelles dans un travail sur la décorrélation.

Quelques techniques

a) décalages manuels et/ou algorithmiques

La décorrélation considérée ici, on l'a dit, peut être réalisée par manipulation directe, en réglant les valeurs de décalage des attaques entre des répliques d'un son. Ceci peut être fait par stipulation des paramètres temporels dans des systèmes de type textuel comme Csound, Cmix ou SuperCollider. La décorrélation peut être aussi réalisée graphiquement, en coupant ou dessinant des formes d'onde avec l'aide d'un éditeur de sons ayant des bonnes facilités de zooming. Cette dernière possibilité n'est ni si laborieuse ni si naïve qu'elle le paraît: c'est une attitude de compositeur que d'écrire de la musique «manuellement», note-à-note, ou partiel-par-partiel, ou grain-par-grain, et il n'a pas à regret d'utiliser cette possibilité de son artisanat.

Par ailleurs, même si on utilise des techniques de décorrélation massivement basées sur des procédures d'analyse/resynthèse, on sera bien obligés de passer par des micromontages afin de construire des ensembles musicaux d'une certaine complexité. (Au sujet du «micromontage» voir [Roads 2002]).

Cela dit, dans tous les cas de figure, on peut faire usage en amont d'un contrôle algorithmique «dynamique» de ces opérations: des spécifications de phase sous forme de listes de valeurs versus temps peuvent être utilisées, ainsi que des fonctions de tout genre, déclarées et mises sous forme de tables de valeurs (*look-up tables*). Ces tables peuvent former un réseau dont on peut s'en servir pour construire un *tissu variable de décorrelations*.

Dans un texte présenté aux JIM [Vaggione 1996] j'avais insisté dans cette approche de la composition assistée par ordinateur : toute intervention directe (manuelle) peut être considérée comme la déclaration d'un attribut particulier d'une entité quelconque; cet attribut peut dès lors être généralisé à toutes les instances successives de cette entité, et non pas rester isolé dans la localité d'une seule instance - au moins que ceci soit le cas désiré. Ainsi *une action locale d'écriture a bien la possibilité de s'intégrer dans un processus algorithmique, de la même façon dont, symétriquement, le produit d'un processus algorithmique peut être transformé localement par une action d'écriture directe*. De cette symétrie s'en suit une imbrication des deux possibilités d'action, sans qu'aucune ait à souffrir d'une inféodation à l'autre, pouvant au contraire amplifier mutuellement leurs implications, intégrant choix et contrainte, changement et héritage, etc.

b) filtrages

En plus d'un travail sur les formes d'onde, direct (manuel) ou orienté par des algorithmes en amont et/ou en aval, on peut également jouer sur des filtrages des sources pour contrôler la génération des répliques, en utilisant des algorithmes de convolution, des filtres FIR (Finite-Impulse-Response) ou IIR (Infinite-Impulse-Response). Evidemment, dans tous les cas, les configurations de type passe-tout seront les plus efficaces, car elles auront pour effet une décorrélation précise et sans aucun changement du contenu spectral. Le cas des filtres IIR semble par ailleurs être le plus approprié parce que ce type de filtres offre la possibilité de réaliser des changements rapides de valeurs (de coefficients), ainsi que des interpolations d'états variables dans le temps.

Une fois assurée la stabilité spectrale entre les originaux et les répliques, on peut aussi, en plus, utiliser des filtres résonants pour ajouter des colorations (également variables dans le temps) à certaines des répliques — ce qui contribue à réussir un effet de diffusion spatiale (les décorrélations «sèches» placées dans d'autres pistes assurant néanmoins la préservation des timbres originaux). Des opérations assez complexes sont ainsi possibles au moyen de filtres. La figure 5 montre une représentation en 3D (temps-fréquence-amplitude) d'un son décorrélé utilisant l'un des filtres IIR disponibles dans une bibliothèque de l'environnement *Cmix* [Lansky 1990]. En bas du plan se trouve l'original; en haut, la réplique décorrélée; de plus, l'enveloppe spectrale de la réplique est inversée par rapport à celle de la source; cela veut dire que l'effet, en fonction du temps, sera un croisement de directionnalité timbrale des deux signaux .

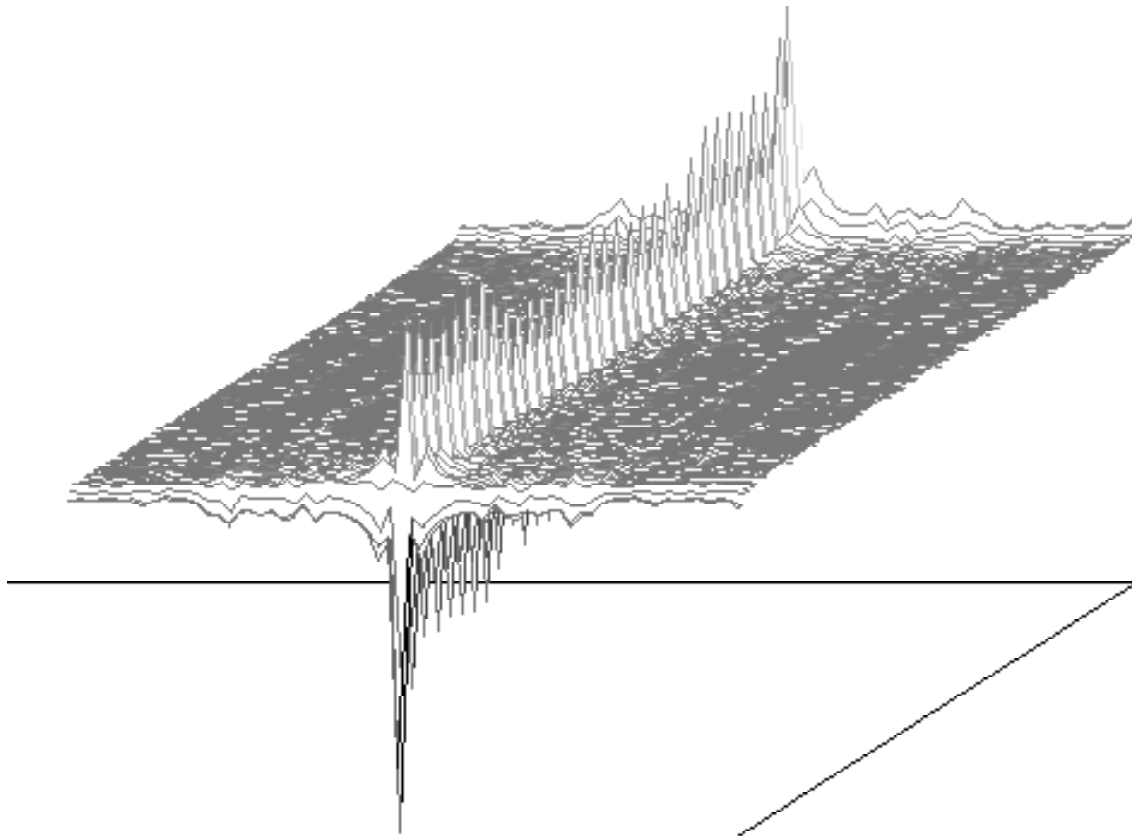


Figure 5

Champs stables versus interactions

La décorrélation, telle qu'elle est décrite ici, est bien sûr très différente du «panning» (panoramisation) classique. Ce dernier a pour finalité de positionner des sons dans un champ spatial stable, ainsi que de les faire bouger d'un canal à un autre, mais toujours à l'intérieur de ce champ stable. Par «champ stable» je veux dire un champ toujours synchronique où les réglages inter-canaux ne sont pas sujets à des rapides et nombreux variations. De plus, le «panning» ne suppose pas l'idée d'interaction : il s'agit d'un contrôle pour ainsi dire externe, car non lié directement aux relations entre les morphologies en jeux. La décorrélation, par contre, ne peut se séparer des caractéristiques morphologiques des sources. Par exemple : les composantes graves auront plus tendance à créer un espace diffus, tandis que les aiguës créeront des points de localisation plus précis. La durée des sons est également un facteur important, ainsi que la densité spectrale (brillance) et les caractéristiques d'évolution temporelle. De plus, le panning n'a pas besoin d'informations concernant la phase des sons auxquels il est appliqué.

Chemins de décorrélation

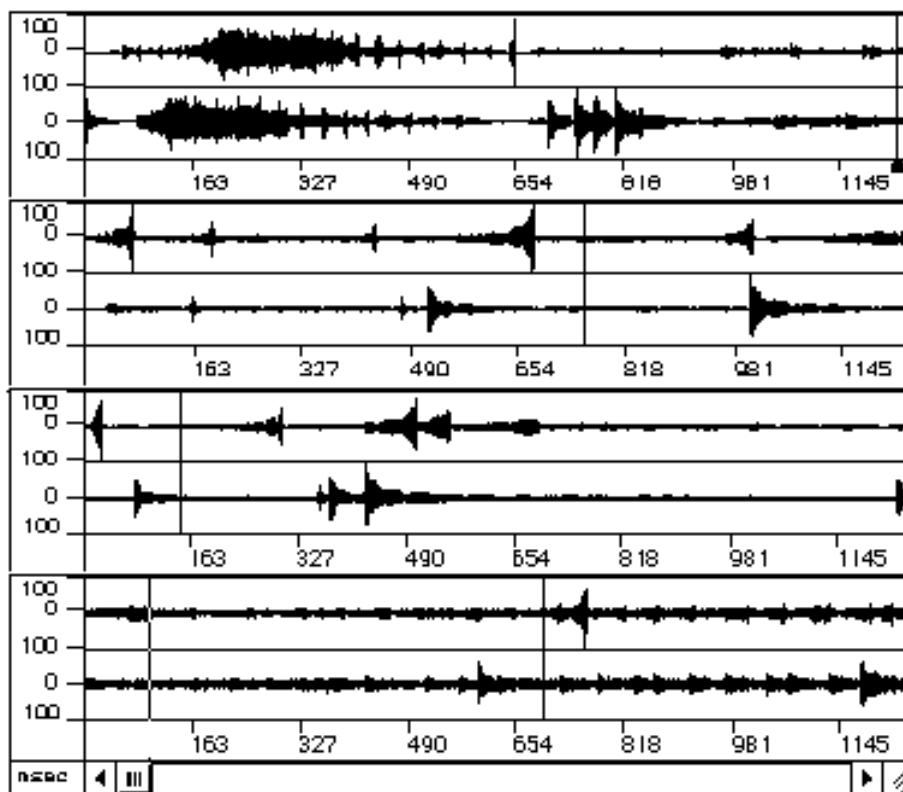
En tenant compte des divers attributs des matières sonores, il s'avère parfois utile d'élaborer des «cartes morphologiques» à plusieurs dimensions, afin de nous aider dans la définition de «chemins» de décorrélation, selon des critères purement compositionnels. Il faut aussi tenir compte, dans la définition de ces chemins, du fait que l'un des effets de la décorrélation est, comme on l'a vu au début de cet article, d'apporter une considérable ambiguïté concernant la localisation spatiale des sources. Cependant, cette ambiguïté n'est pas un obstacle absolu quant à la localisation ou à la directionnalité: cela indique — je répète la remarque très importante de Kaup et al. — une nécessité d'effectuer «un véritable *trade off* entre la nature enveloppante de l'expérience auditive spatiale et la précision de la localisation» [Kaup et al. 1999].

Un tissu morphologique complexe : figurations spatiales

Finalement, je voudrais insister encore sur le fait que les techniques de décorrélation microtemporelle sont intéressantes pour la composition de musique électroacoustique quand elles sont utilisées dans une situation où il y a beaucoup de sources parallèles, où plusieurs canaux sont activés simultanément avec des valeurs de décorrélation différentes, engendrant un «tissu» morphologique complexe.

Combiner des multitudes de sons décorrélés ayant chacun ses propres valeurs variables dans le temps (ces valeurs variables conformant les «chemins» dont je viens de faire référence), constitue un moyen efficace visant la création d'images sonores approchant l'idée d'une figuration spatiale composée (voir figure 6 — cet exemple représente huit pistes — quatre paires stéréo —, ce qui est peu comparé aux compositions réelles comportant au moins 32 pistes — 16 paires stéréo —; je la reproduis néanmoins afin d'économiser un peu de l'espace alloué à cet article). «Une figure musicale peut être considérée comme le produit d'articulations singulières, véhiculant des propriétés morphologiques, sur lesquelles on peut réaliser des opérations diverses» [Vaggione 1996]. Quand je parle de figuration, je veux signifier la composition de champs de figures musicales ayant chacune des traits singuliers. Les attributs concernant la définition et donc la perception spatiale font partie de ces traits singuliers, au même titre que ceux concernant d'autres catégories et dimensions composables (hauteur, durée, densité, etc.).

Il faut tenir compte à cet égard qu'il s'agit de créer des attributs spatiaux et dynamiques divers pour chaque son, ainsi que pour chaque figure, trame, texture, etc. Ceci étant, on pourrait énoncer une dernière condition, extrêmement important du point de vue d'une figuration spatiale : *la décorrélation a des effets perceptibles à toutes les échelles temporelles possibles d'une composition, tout en restant ancrée, comme procédure, dans le domaine du microtemps.*



Figur

Conclusion

Les techniques de décorrélation microtemporelle nous offrent une possibilité concrète de définir des attributs sonores d'ordre spatial. A condition bien entendu de s'engager avec leur concours dans un processus de

construction (de composition) d'un tissu morphologique complexe, d'une figuration capable de faire interagir dans l'espace réel les différences engendrées dans l'espace interne¹ de l'oeuvre musicale.

Références

- [Andersen et Jensen 2001] Andersen, T. et K Jensen. «On the importance of phase information in additive analysis/synthesis of binaural sounds». *Proceedings of the ICMC 2001*.
- [Begault 1994] Begault, D. R. *3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia*. Boston: AP publish.
- [Budon 2000] Budon, O. «Composing with Objects, Networks, and Time Scales: An Interview with Horacio Vaggione». *Computer Music Journal* 24 (3): 9-22. Cambridge: MIT Press.
- [Chowning 1871] Chowning, J. «The Simulation of Sound Moving Sources». *Journal of the Acoustical Society of America* 19 (1): 2-6.
- [Freed 1999] Freed, A. «Latency». CNMAT Rapport. Berkeley: CNMAT.
- [Green 1971] Green, D. (1971) «Temporal Auditory Acuity». *Psychological Review* 78 (56): 540-551.
- [Kaup et al. 1999] Kaup, A., Khoury, S., Freed, A. and Wessel, D. «Volumetric Modeling of Acoustic Fields in CNMAT's Sound Spatialization Theatre». *Proceedings of the ICMC 1999*. San Francisco: ICMA.
- [Kendall 1995] Kendall, G. «The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery». *Computer Music Journal* 19 (4): 72-87.
- [Lansky 1990] Lansky, P. «The Architecture and Musical Logic of Cmix». *Proceedings of the ICMC 1990*. San Francisco: ICMA.
- [Lindemann 1986] Lindemann, W. «Extension of a Binaural Cross-Correlation Model by Contralateral Inhibition, II. The law of the first wavefront». *Journal of the Acoustical Society of America*, 74:1728-1733.
- [Maltham, 2001] Maltham, D. «Towards Reality Equivalence in Spatial Sound Diffusion». *Computer Music Journal* 25 (4): 31-38.
- [Mathews et al 1969] Mathews, M., et al. *The Technology of Computer Music*. Cambridge: MIT Press.
- [Prigogine 1980] Prigogine, I. *Physique, temps et devenir*. Paris: Masson.
- [Roads 2002] Roads, C. *Microsound*. Cambridge: MIT Press.
- [Vaggione 1984] Vaggione, H. «The Making of *Octuor*». *Computer Music Journal* 8 (2): 48-54. Reprinted in C. Roads (Ed.): *The Music Machine*. Cambridge: MIT Press (1989)
- [Vaggione 1989] Vaggione, H. «Dimensions fractionnaires en composition musicale». *Symposium Chaos und Ordnung*. Graz: Steirischer Akademie.
- [Vaggione 1996] Vaggione, H. «Vers une approche transformationnelle en CAO» *Actes des JIM 1996*. Caen: Les cahiers du GREYC, CNRS-Université de Caen.
- [Vaggione 1998a] Vaggione, H. «Son, temps, objet, syntaxe. Vers une approche multi-échelle dans la composition assistée par ordinateur». In *Musique, Rationalité, Langage*. Paris: L'Harmattan. Egalement disponible en italien: *Musica/Realtà* 60 (1999):121-151.
- [Vaggione 1998b] Vaggione, H. «L'espace composable. Sur quelques catégories opératoires dans la musique

¹ A propos du concept d'espace «interne» de l'oeuvre musicale, voir [Vaggione 1998b].

électroacoustique». In *L'espace : Musique/Philosophie* (J.-M. Chauvel et M. Solomos, éd.). Paris: L'Harmattan.

[Vaggione 2001a] Vaggione, H. «Composing Musical Spaces by Means of Decorrelation of Audio Signals». *Proceedings of the DAFx Conference on Digital Audio Effects*. Limerick (Irlande): University of Limerick.

[Vaggione 2001b] Vaggione, H. «Some Ontological Remarks About Music Composition Processes». *Computer Music Journal* 25 (1): 54-61.