

Les effets audionumériques adaptatifs

Vincent Verfaille

Introduction

En plus de sa composition, de son interprétation et de son appréciation esthétique, la musique a été considérée et étudiée en occident comme une science depuis l'antiquité. Les Pythagoriciens y voyaient l'une des quatre sciences majeures, au même titre que la géométrie, l'arithmétique et l'astronomie.

Le XX^{ème} siècle fut particulièrement riche en innovations musicales, en découvertes et en courants autant scientifiques qu'artistiques, ou techniques. La musique en a largement bénéficié, notamment par l'évolution des supports matériels d'enregistrement et de reproduction. Ainsi, aux rouleaux de cire (Charles Cros, 1877 et Thomas Edison, 1878) ont succédé les disques vinyles (gramophone d'Émile Berliner, 1901, 33 tours de Columbia Records, 1948), puis les bandes magnétiques (Poulsen, 1898, améliorées par BASF et AEG Telefunken, 1935). Un tournant a été marqué en 1962 lorsque Max Mathews réalisa la première synthèse de son sur ordinateur aux laboratoires Bell, aux États-Unis. Les formats numériques utilisés depuis ont été popularisés dans les années 1980 grâce au disque compact ou *CDDA* (*Compact Disc Digital Audio*). Cette évolution des supports s'est accompagnée par une évolution de la création musicale et de l'étude scientifique de la musique.

À l'ère du son numérique, c'est l'informatique musicale – l'étude du son musical au moyen d'ordinateurs – qui débute. Elle fait appel à plusieurs disciplines scientifiques et offre une diversité de directions de recherche (pouvant aider à la conception de systèmes de réalité virtuelle), telle l'acoustique musicale et instrumentale (modélisation physique), la synthèse sonore numérique, les transformations sonores et la compression des données audionumériques (traitement du signal), la composition et l'analyse musicologique d'œuvres assistées par ordinateur (informatique), l'étude de la perception auditive musicale (psychoacoustique). Chaque direction de recherche implique le développement de techniques spécifiques. Par exemple, l'équaliseur des baladeurs MP3 et des chaînes hi-fi fait appel aux mêmes techniques que les effets audionumériques et

les modèles d'analyse-synthèse, ces effets et ces modèles constituant les principaux objets d'intérêt de cette étude.

Les effets audionumériques sont des unités de traitement du signal numérique qui permettent de modifier un son de manière simple et globale. La place de ces composants logiciels est devenue centrale dans tous les cadres où la musique est pratiquée ou étudiée à l'aide d'ordinateurs, que ce soit dans les studios professionnels, dans les lieux de production, dans les laboratoires de recherche ou sur des ordinateurs personnels. Leurs utilisations sont très diverses, et vont de l'acquisition à la finition (transformations sonores en vue d'une mise en forme selon des critères esthétiques¹) en passant par l'exploration de la micro-structure du son et la recherche créative de sons inouïs (c'est-à-dire de sons jamais entendus auparavant). Certains courants musicaux en ont tout particulièrement bénéficié : la musique populaire rock dans les années 1960 (notamment grâce à la curiosité et l'inventivité de George Martin, l'ingénieur du son des Beatles, souvent considéré comme le cinquième musicien du groupe) puis électronique dans les années 1970, ainsi que la musique contemporaine et ses courants électroacoustique et acousmatique.

Aujourd'hui généralisé, le format numérique permet aussi d'étudier le son produit par les instruments traditionnels et d'en proposer soit un modèle physique, soit un modèle de signal. Un modèle est une représentation : il suppose la prise en compte de connaissances particulières à ce qui est étudié. Aussi, un modèle de la voix chantée nécessitera des adaptations substantielles si l'on veut correctement passer à celui du violon. Un modèle physique représente l'instrument producteur de son et explicite les équations de la physique qui rendent compte de son comportement vibratoire. Un modèle de signal, encore appelé modèle d'analyse-synthèse, décrit le son et lui seul, en représentant l'onde sonore de l'instrument par ses caractéristiques temporelles et fréquentielles, et en s'appuyant notamment sur l'analyse de Fourier². Ce type de

¹ L'étape de mixage puis de *mastering* dans les musiques populaires est un exemple : les sons de différents instruments sont transformés, puis mixés et subissent une dernière transformation pour acquérir *in fine* la dynamique et la richesse du "son" souhaité. On parle alors du "son" d'un groupe, d'un studio, voire d'un style musical.

² L'analyse de Fourier consiste à représenter un signal (dans notre cas, musical) par une somme de composantes élémentaires ayant la forme d'ondes sinusoïdales. Cette analyse est particulièrement adaptée aux sons d'instruments non percussifs (voix, instruments à vents, cuivres, bois, cordes).

modèle permet d'effectuer des transformations sonores qui, à la fois, dépendront du son modélisé et lui seront mieux adaptées.

En les utilisant, on remarque rapidement que les transformations sonores qui n'évoluent pas dans le temps peuvent rapidement être reconnaissables en tant que telles, si bien que l'attention de l'auditeur se focalise très vite sur l'effet perceptif (par exemple un écho) et non sur le discours musical. Aussi, les musiciens les utilisent avec parcimonie, ou choisissent de varier les paramètres de contrôle pour éviter l'aspect rébarbatif et faire passer l'effet au second plan, derrière le propos musical. C'est une des raisons pour lesquelles musiciens et scientifiques recherchent toujours de nouveaux effets et de nouvelles manières de les manipuler.

La recherche pluridisciplinaire présentée ici participe à cette démarche créative, en développant une nouvelle technique de conception et de contrôle des transformations sonores, utilisées à des fins artistiques. Elle s'appuie à la fois sur les techniques utilisées pour le contrôle gestuel de la synthèse sonore¹ ainsi que sur les notions de perception et de cognition musicale.

*Les concepts de base
et quelques principes de méthode*

Les techniques de synthèse et d'effets sonores ont une longue histoire. Le premier effet inventé par l'homme est d'origine mécano-acoustique et date de quarante millénaires. Il consiste en l'hybridation d'un son par un autre, selon ce qu'on appelle aujourd'hui le modèle source-filtre², et se réalise avec l'arc à bouche et le *didgeridoo*.

¹ Le contrôle gestuel de la synthèse sonore consiste à piloter un synthétiseur numérique de sons à l'aide de gestes captés par un système. Le but est d'offrir à l'utilisateur un contrôle aussi naturel et expressif que sur les instruments de musique traditionnels, mais aussi de nouvelles possibilités d'expression et de maniabilité (réalité virtuelle).

² Le modèle source-filtre représente un son musical selon un formalisme inspiré du mode de production de la voix chantée : une source – les cordes vocales en vibration – produit une onde sonore qui est ensuite filtrée par plusieurs résonances – le conduit vocale, constitué du larynx, du pharynx, de la fosse nasale et de la bouche. Ce formalisme permet des transformations sonores très avancées. Par exemple, en remplaçant la source par un son de violoncelle, on obtient une synthèse croisée (encore appelée hybridation) : un violoncelle qui parle !

L'arc à bouche est un ancêtre de la guimbarde : une corde vibrante placée devant la cavité buccale utilise ses résonances pour amplifier le volume sonore et modifier le timbre, donnant ainsi un aspect vocal au son de la corde. Le *didgeridoo* quant à lui est une branche d'arbre creuse mise en vibration en soufflant dedans, ce qui produit des basses fréquences que les Aborigènes d'Australie ponctuent de cris imitant ceux des animaux. L'effet de vocodeur et de synthèse croisée en usage aujourd'hui en sont des modélisations.

D'autres effets résultent d'une modélisation de phénomènes naturels modifiant la perception auditive. Au XVII^{ème} siècle déjà, Huygens avait remarqué que la coloration du son d'une fontaine ou d'une chute d'eau, provenait d'un effet de filtrage "en peigne" du bruit, qui était dû à l'environnement géométrique de la fontaine. Au cours des années 1950, des systèmes de réverbération et de chorus électronique sont apparus dans les synthétiseurs afin d'enrichir le son électronique, considéré comme relativement pauvre.

Les premiers logiciels de modification du son furent appelés "effets audionumériques" par un abus de langage résultant de la confusion sémantique entre la *technique* de transformation sonore et le *résultat* induit par la transformation sur la perception (ordinairement appelé "effet"). Les modèles d'analyse-synthèse¹ permettent des transformations sonores en profondeur, au niveau des dimensions perceptives du son musical que sont la hauteur (note), la durée (rythme), l'intensité (nuance), la spatialisation et le timbre (instrument et modes de jeu), dimension particulièrement étudiée au XX^{ème} siècle. Ceci ne signifie pas qu'une transformation sonore ne puisse être réalisée à l'aide d'un effet audionumérique, ou réciproquement ; cependant pour un son donné, les artéfacts d'une technique peuvent la rendre moins performante qu'une autre.

Les effets audionumériques et les modèles d'analyse-synthèse sonore ont évolué en parallèle. Ces techniques se sont affinées afin de permettre des transformations de plus en plus réalistes et de meilleure qualité. De plus, pour offrir plus de possibilités de transformations sonores, on a assemblé différents effets dans une seule et même

¹ Ils appartiennent à l'une de ces trois classes: les modèles temporels (ou segment-temporels), les modèles temps-fréquences (vocodeur de phase) et les modèles spectraux (additif, source-filtre).

unité, tels les multi-effets utilisés par de nombreux guitaristes. L'augmentation du nombre de paramètres utilisables qui en résulte rend le contrôle par un musicien de plus en plus ardu. En effet, avec seulement dix doigts, il devient difficile de jongler avec les centaines de paramètres d'une synthèse additive!

La contrôlabilité (ou flexibilité) peuvent être améliorées à l'aide d'une bonne mise en correspondance – encore appelée *mapping* – entre les paramètres de contrôle (ceux que l'on va modifier par le geste) et les paramètres de la synthèse ou de l'effet. Par exemple, si l'on arrive à contrôler les 200 paramètres d'une synthèse additive à partir de seulement 3 paramètres (on parle dans ce cas de "*mapping* 3 vers 200"), on simplifie grandement la tâche du musicien.

Depuis les années 1990, la recherche sur le *mapping* est au cœur du contrôle gestuel, car elle conditionne l'accès aux instruments numériques par des gestes plus variés et plus riches. C'est à cette condition que l'apprentissage, l'expressivité et la virtuosité de ces instruments pourra être un jour comparable à celle des instruments traditionnels. Par exemple, le programme *Max/MSP* développé depuis 1990 permet de contrôler des modèles de synthèse sonore à l'aide de divers transducteurs gestuels (tels une pédale d'expressivité, une tablette graphique, un gant de réalité virtuelle, un clavier MIDI, etc) qui envoient des signaux électriques transformés en signaux numériques en utilisant le protocole MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*) ou OSC (*Open Sound Control*).

Différentes techniques de *mapping* peuvent être utilisées pour transformer M paramètres de contrôle en N paramètres de synthèse : descriptions mathématiques sous forme d'ensembles, techniques de réduction de données (analyse multidimensionnelle, analyse en composantes principales), réseaux de neurones artificiels, algorithmes génétiques, etc.

Objet de cette recherche :
le contrôle intelligent des effets

Alors que la recherche sur le *mapping* dans le cadre des logiciels de synthèse sonore s'est bien développée depuis les années 1990, du fait de l'engouement pour les

instruments de musique numériques, elle est restée timide concernant les logiciels de transformations sonores. Ces logiciels se contrôlent à l'aide de boutons et de potentiomètres, soit via une console ou des transducteurs utilisant la norme MIDI, soit par le biais de la souris avec une visualisation à l'écran. La précision et la rapidité du contrôle dépendent alors des capacités gestuelles humaines.

Des efforts ont été faits pour permettre un contrôle direct par des paramètres perceptifs, comme c'est le cas pour le spatialisateur¹ de l'IRCAM. La question du *mapping* n'a cependant pas été posée explicitement pour le contrôle des autres effets audionumériques et encore moins généralisée ; elle est pourtant fondamentale. L'effet audionumérique, tout comme la synthèse, est interprété musicalement, et mérite un accès gestuel plus adapté, afin d'ouvrir le champ des possibilités expressives. Ceci entre dans le cadre de la réalité virtuelle, où l'on désire par exemple pouvoir jouer d'instruments et d'effets inédits, de manière inhabituelle (par exemple « jouer » d'un piano virtuel dont on change la taille à mesure que l'on joue).

Ce projet réalise une connexion entre les effets audionumériques et le contrôle gestuel de la synthèse sonore, par l'étude exhaustive des effets et de leurs moyens de contrôle. Il tend ainsi à développer et combiner des technologies innovantes afin de fournir des outils de création, tout en posant un cadre scientifique solide. La recherche sur les effets audionumériques et leur contrôle adaptatif s'inscrit plus généralement dans un contexte pluridisciplinaire où l'on travaille à la fois dans des disciplines artistiques (et notamment musicales), scientifiques et technologiques.

¹ Un spatialisateur est un système qui permet de simuler les effets acoustiques résultant de la diffusion d'un son dans une salle, à la fois en termes de réponse de la salle (une petite salle de concert a une réverbération différente de celle d'une grande église) et en termes de mouvement du son (l'intensité et la hauteur d'un son qui s'approche puis s'éloigne augmentent en s'approchant et diminuent en s'éloignant: il s'agit de l'effet Doppler).

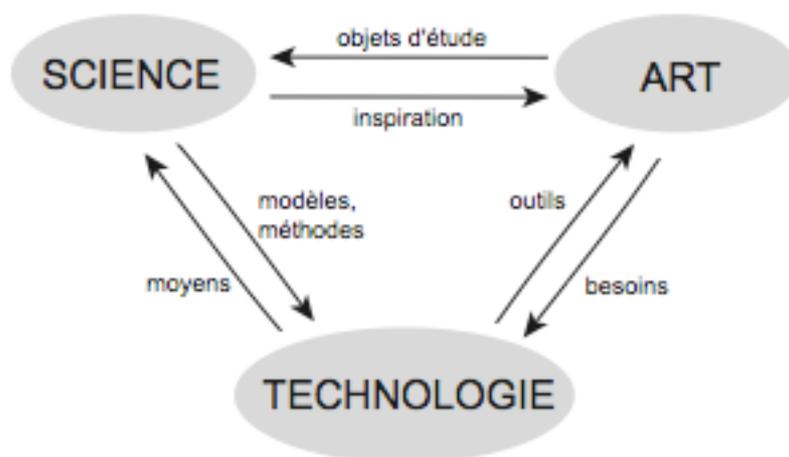


Figure 1 - Des liens forts existent entre Art, Science et Technologie. La science étudie, analyse et propose des modèles ainsi que des méthodes, que la technologie utilise pour fournir des moyens. Les artistes expriment des besoins en outils et en techniques, que fournit la technologie. La science prend pour objet d'étude les arts, aussi bien en sciences exactes qu'en sciences humaines. Réciproquement, les sciences sont souvent objet d'inspiration pour les arts.

Art et Musique

Les musiques actuelles, contemporaines et populaires, font un grand usage des nouvelles technologies. Ces outils aux performances croissantes nourrissent et stimulent l'iminaire des compositeurs et la créativité des chercheurs (cf. Fig. 1). En effet, les interactions entre Art, Science et Technologie ne se limitent pas à l'offre (ou à la demande) de solutions prêtes à l'emploi : les échanges sont nombreux, enrichissants et indispensables au développement d'outils offrant des champs exploratoires intéressants. Afin de mieux connaître ces musiques et les attentes des compositeurs, j'ai « infiltré » le milieu musical, en suivant les cours de musique électroacoustique du compositeur Pascal Gobin au Conservatoire (CNR) de Marseille. J'ai tissé des liens avec des chercheurs et/ou compositeurs de plusieurs centres de création et de recherche, dont l'Institut de Recherche et de Coordination en Acoustique et Musique (IRCAM), le Groupe de Recherche Musicale (INA-GRM), le Groupe des Musiques Expérimentales de Marseille (GMEM), la Maison des Sciences de l'Homme (MSH) de l'Université Paris VIII.

Science

La partie scientifique de notre étude fait appel à des connaissances provenant de plusieurs disciplines connexes à l'informatique musicale, à savoir le traitement du signal musical pour la transformation du son, la psychoacoustique, les systèmes d'extraction de descripteurs sonores, le contrôle gestuel à l'aide de transducteurs, la cognition musicale. Intégrer ces notions a nécessité un grand effort d'ouverture d'esprit et d'humilité, étant donné la quantité de nouvelles connaissances à absorber avant d'avoir une vue générale des effets et de leur contrôle par les descripteurs. Le projet s'est réalisé de 2000 à 2003 au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA) du CNRS à Marseille, dans l'équipe *Acoustique Perceptive et Informatique Musicale*. Formée par Jean-Claude Risset¹ et maintenant dirigée par Daniel Arfib², cette équipe de recherche s'intéresse au développement des techniques numériques de synthèse et de transformation sonore, mais aussi à leur utilisation artistique, lors de la composition d'œuvres électroacoustiques ou mixtes. Le projet a grandement bénéficié de cet environnement créatif, et a abouti au formalisme général décrivant les effets adaptatifs.

Technologie

Récemment, l'équipe s'est ouverte au contrôle gestuel de modèles de synthèse dans le cadre des projets « *le Geste Créatif en Informatique Musicale* » en 2000 et le projet européen ConGAS³ en 2003. C'est dans ce cadre-ci que la problématique des instruments numériques est abordée, avec pour objectif d'apporter des réponses aux problèmes suivants : comment choisir le transducteur gestuel en fonction de la gestique du musicien ? quels modèles de synthèse utiliser ? quel accès aux contrôles donner au musicien ? comment connecter le transducteur au modèle de synthèse ? Cette orientation a grandement influencé mon travail et les outils que j'ai utilisés.

1 J.-C. Risset: directeur de recherche émérite et médaille d'or du CNRS en 1999, compositeur ayant reçu le prix Ars Electronica 1987, le Concours International de Bourges 1980 et 1998, et le grand prix national de la musique 1990.

2 D. Arfib: directeur de recherche et compositeur, initiateur du projet européen COSTG6 "Digital Audio Effects" (1998-2001), visant la communication sur les effets audio numériques dans la communauté scientifique via un cycle de conférences, un livre [Zölzer, 2002], un site Web : <http://www.dafx.de/>.

3 CONtrol by Gesture of Audio Systems, projet européen sur le contrôle gestuel de systèmes audio numériques.

Une nouvelle technique

Puisque le contrôle des effets est souvent simple et qu'il n'est pas corrélé aux dimensions perceptives du son, nous avons voulu fournir un contrôle de haut niveau aux effets audio numériques prenant directement en compte la perception (voir Fig. 2). Ceci implique de réfléchir au lien entre les effets, leur contrôle gestuel et la perception.

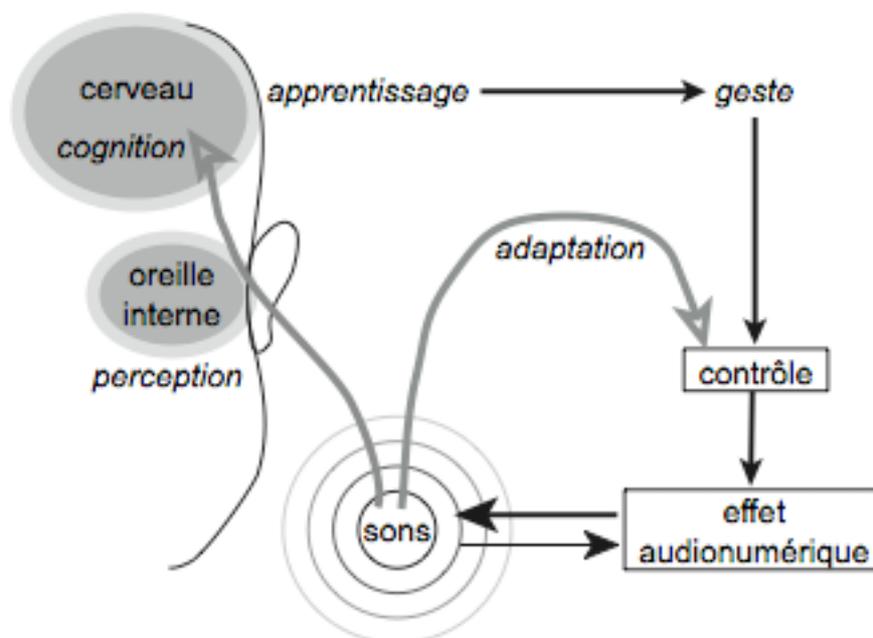


Figure 2 - Notre perception et notre cognition permettent d'appréhender le son, l'effet et son contrôle. Un son est perçu dans l'oreille interne, puis interprété dans le cerveau. L'auditeur peut apprendre à reconnaître l'effet appliqué au son et à le contrôler. L'adaptation consiste à tenir compte de descripteurs perceptifs du son dans le contrôle.

Nous définissons un effet adaptatif comme étant un effet dont le contrôle est automatisé par des descripteurs sonores (voir le schéma Fig. 3). Ces descripteurs sonores sont des paramètres qui décrivent diverses propriétés à court, moyen et long-terme, et explicitent la perception que l'on a du son, dans le temps. Ce sont soit des opérateurs mathématiques, soit des modèles de la perception auditive (hauteur, intensité

perçue, etc.). Dans notre étude, nous avons relevé plus de 60 descripteurs, dont une vingtaine de descripteurs perceptifs selon le modèle utilisé.

Une fois les descripteurs du son extraits, on les transforme en valeurs de contrôle de l'effet (*mapping*). Un second niveau de contrôle influence le *mapping* : le contrôle gestuel, par lequel le musicien navigue par exemple entre différentes configurations de *mapping*, tel qu'existant dans les *GRM Tools*. Par ce contrôle adaptatif, le son peut piloter l'effet qui lui est appliqué (effet auto-adaptatif) ou un autre son (effet adaptatif croisé).

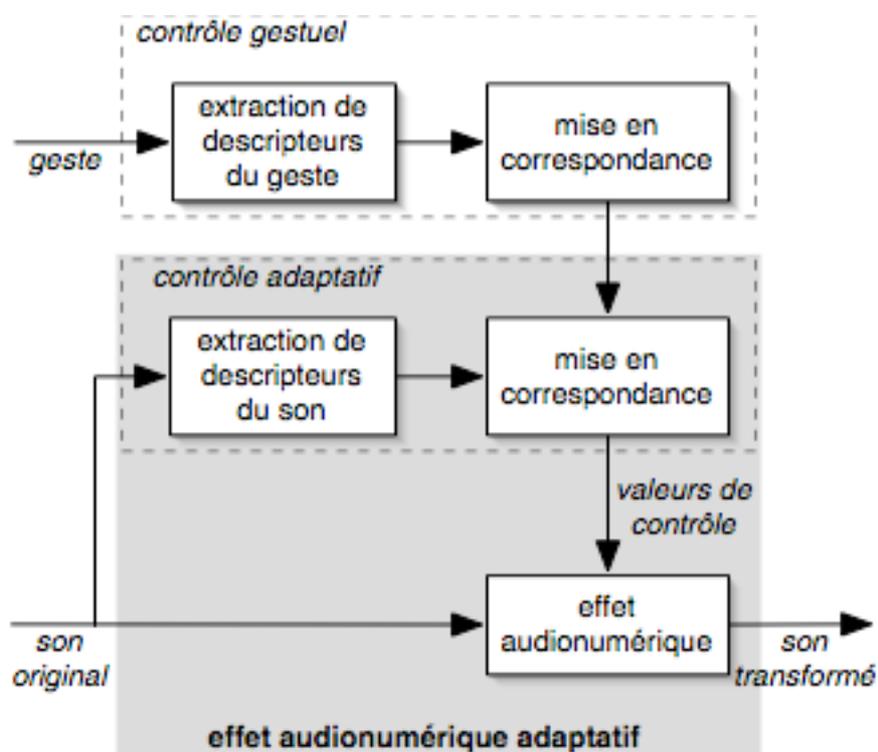


Figure 3 – Diagramme de l'effet audionumérique adaptatif, contrôlé par des descripteurs sonores. Les contrôle gestuels influent sur la transformation des descripteurs sonores en valeurs de contrôle (*mapping*).

Le son que l'on traite provient d'une mise en forme sonore, soit mécano-acoustique lors de sa production par un instrument de musique, soit numérique par l'utilisation de logiciels. D'un point de vue esthétique, ce son formé est l'expression d'un geste musical intelligent dont les descripteurs permettent l'acquisition indirecte. Ainsi donc, grâce au contrôle adaptatif, on fournit au musicien une maîtrise cohérente du son, parce que *l'intelligence est déjà dans le son*. Par exemple, on peut ralentir un son de

voix parlée en fonction de son contenu, mais on peut aussi ne ralentir que les consonnes, allonger uniquement les silences, ou ne raccourcir que les /a/.

Cette idée de contrôle adaptatif n'est pas entièrement neuve : en effet, elle a été utilisée depuis plusieurs années par plusieurs compositeurs (Karl Stockhausen, Charles Dodge, Guy Reibel, Jean-Claude Risset). De même, elle est au cœur d'effets traditionnels (tels le compresseur et la synthèse croisée utilisés dès les années 1960, le *morphing* sonore depuis les années 1980) et des transformations sonores basées sur le contenu sonore. Depuis la fin des années 1990, des logiciels incluant de nouveaux effets adaptatifs sont commercialisés sans toutefois utiliser cette appellation : l'effet *Autotune* d'*Antarès* qui accorde un son, l'effet *Contrast* des *GRM Tools*, le *Fraktal Delay* de *Native Instruments*, le multi-effet *Sfx Machine RT* de *Sound Guys*. Ce n'est pourtant que très récemment que cette idée a été évoquée dans la communauté audionumérique et qu'elle fut formalisée de manière systématique et exhaustive, dans ce travail de doctorat.

Dans le domaine de la composition musicale, une démarche naturelle consiste à jouer sur les formes : ceci est d'ailleurs enseigné dans les traités de composition. Par exemple, une ligne mélodique est transposée, inversée (contrepoint), retardée (délai), reprise par différents instruments (changement de timbre), étirée dans le temps de façon non régulière. Cette démarche se base sur le fait que l'auditeur reconnaît un objet sonore unique, même lorsqu'on le déforme selon une ou plusieurs dimensions à la fois, entièrement ou partiellement. Ces anamorphoses sonores, décrites dans la théorie du Gestalt, font aussi partie des outils de composition en musique électroacoustique. En effet ce courant né dans les années 1950 prend le son comme un objet sonore que l'on déforme, éclate, recompose, transforme afin d'en faire quelque chose d'inouï. Les effets audionumériques adaptatifs, placés dans ce cadre, apportent donc une réponse directe et précise aux compositeurs en recherche d'outils expressifs permettant de réaliser des anamorphoses complexes. Appliquer un effet à un son et le contrôler par un autre son peut se voir comme le pendant du contrepoint classique.

L'idée d'évolution conjointe et cohérente entre un son et l'effet qui lui est appliqué est naturelle car elle copie le comportement physique des instruments de musique pour lesquels la variation d'un paramètre de jeu peut influencer plusieurs dimensions

perceptives à la fois, de manière souvent non linéaire. Ainsi, en soufflant plus fort dans un instrument de la famille des cuivres, l'intensité sonore augmente et le son s'enrichit en harmoniques dans les hautes fréquences. Ce phénomène de distorsion non linéaire produit un son plus brillant, spécifique du timbre cuivré.

On comprend mieux comment l'idée d'un contrôle adaptatif, corrélé au contenu sonore est venue à l'esprit des compositeurs : l'effet perceptif créé est très similaire à celui des phénomènes naturels complètement intégrés à notre cognition de l'environnement sonore. La perception et la cognition auditives sont centrales dans la composition musicale, et le discours que le compositeur adresse à l'auditeur s'enrichit de ce genre de connaissance en imitant, déformant, inversant des comportements naturels. La réaction de l'auditeur est alors immédiate : il entrevoit et comprend le jeu intellectuel du compositeur et ses effets sur les sens, qu'il peut alors mieux apprécier.

La recherche, jour après jour

Au cours de cette recherche, j'ai eu l'occasion de mêler intimement deux passions : la musique et la recherche scientifique. Musicien amateur, formé au Conservatoire pour la flûte traversière et de manière autodidacte pour la guitare, j'ai voulu comprendre comment fonctionnaient mes instruments, et comment fabriquer les effets audio numériques que j'utilisais. De cette pratique musicale, j'ai tiré des connaissances fondamentales et complémentaires à ma recherche : en effet, si je n'avais pas appris par la pratique musicale à me servir des effets, je n'aurais pas pu me poser les questions qui ont amené à la formalisation du contrôle adaptatif.

Mon optique fut d'inverser la démarche habituelle de création des effets audio numériques. Ainsi, au lieu de poser un but musical (par exemple vouloir transposer les notes vers les hautes fréquences) et de chercher le moyen technique d'y parvenir, j'ai choisi de poser des briques élémentaires (l'extraction de descripteurs du contenu sonore, les fonctions de *mapping*) puis d'effectuer à leur sujet une investigation de grande envergure. Cette investigation s'est faite en combinant chaque descripteur avec une fonction de *mapping*, en restant ouvert à tout imprévu qui pourrait apparaître de cette combinaison nouvelle, avec pour guide la perception auditive lors de l'écoute du résultat. En utilisant plusieurs descripteurs en même

temps, les fonctions de *mapping* devenaient de plus en plus complexes. Tel un alchimiste qui mélangerait ses éléments de base au gré des combinaisons possibles, je me suis donné la liberté de trouver de nouveaux métaux !

Cette démarche a demandé beaucoup de concentration afin de poser le cadre et envisager la structure la plus adéquate à une généralisation. Il a fallu s'initier aux techniques nécessaires à la réalisation de plus de 20 effets audionumériques et à l'extraction de plus de 65 descripteurs. L'absorption de ces connaissances a pris du temps, si bien que le formalisme proposé n'a vu le jour que très tard, et il a alors fallu réaliser un très grand nombre d'exemples sonores. Ces exemples ont permis de valider la démarche et de proposer de nouveaux effets, présentés lors de conférences nationales et internationales¹ dès la première année de doctorat.

À ma grande surprise, j'étais seul à utiliser cette démarche : aucun autre centre de recherche, ni aucune entreprise de l'audionumérique n'y avait vu d'intérêt jusque ici. Cette constatation fut à la fois inquiétante ("est-ce utile, finalement ?") et encourageante ("au vu des premiers résultats, il y avait vraiment quelques innovations à apporter !"). En prenant du recul, j'ai réalisé que mon travail se place dans la continuité de la créativité et de l'inventivité dans les traitements sonores, amorcée au début du XX^{ème} siècle. Finalement, en participant à un concert du *Tutti Quanti Computing Orchestra*, au cours duquel j'ai joué à la flûte traversière une création utilisant des effets audionumériques adaptatifs, j'ai pu mettre en pratique et lier les deux aspects de ma recherche : science et musique.

Conclusion

Le formalisation et les résultats obtenus ont été évalués par d'autres chercheurs, par des professionnels de l'audionumérique et des musiciens, qui ont manifesté un grand intérêt pour les exemples sonores. Les résultats de cette étude sont à la fois théoriques et appliqués. Le cadre théorique général posé inclut les effets traditionnels et leur

¹ "Digital Audio Effects (DAFx)" 2001 à 2004; "Journées Jeunes Chercheurs en Acoustique Musicale (JJCAM)" 2001; "Journées d'Informatique Musicale (JIM)" 2002; "Journées d'Étude - Espaces Sonores" 2002 ; groupes de travail "DAFx Workshop" en 2001 à Madrid, mission à court-terme DAFx à Barcelone en 2001, Action Concertée Incitative "Espaces Sonores" à la Maison des Sciences de l'Homme de Paris VIII de 2001 à 2003.

contrôle gestuel. Il permet de développer la réflexion concernant la classification des effets, la pédagogie liée à ces techniques, la place du musicien face au système de traitement, la structure du contrôle développée; tout cela, bien entendu, en tenant toujours compte de la perception.

Les effets adaptatifs permettent d'atteindre une grande cohérence entre le son et l'évolution de la transformation qui lui est appliquée, puisque la transformation est contrôlée de manière continue par des descriptions du son. Ainsi, un paramètre, tel le facteur de ralentissement du son, devient dépendant du contenu : on peut alors ralentir uniquement les voyelles, et rendre une voix plus lente sans introduire d'artefacts sur les consonnes. Les effets adaptatifs permettent la création de transformations sonores inconnues, ou à l'inverse encore plus réalistes que certaines existantes. Ils offrent un cadre pour trouver des solutions à des problèmes complexes, tel le ralenti-accélééré, préservant des critères perceptifs.

Notre démarche systématique a révélé un grand potentiel. Le contrôle gestuel de haut niveau des effets audionumériques pourra offrir un gain indéniable, et méritera une attention toute particulière lors de prochaines recherches.

Cette étude offre de nombreux débouchés : de nouveaux effets, de nouvelles techniques de contrôle. Nous avons proposé de nouveaux effets sonores : l'effet de "martianisation", qui transforme une voix humaine en métaphore de ce que serait une voix de martien dans l'imaginaire de la science-fiction ; le changement de prosodie et d'expressivité, qui permet de modifier la vitesse du déroulement temporel et l'intonation d'une voix de manières indépendantes et adaptative ; le trémolo spectral adaptatif, qui combine un trémolo à taux variable avec un effet de *phasing*, rendant possible d'appliquer des effets à la fois sur la dynamique, le rythme et le timbre de manière continue ; la panoramisation spectrale adaptative qui éclate le son en composantes élémentaires, dont les positions sont différentes et les déplacements autonomes ; la spatialisation adaptative contrôlée gestuellement par un danseur ou une danseuse et qui permet de l'immerger dans un espace sonore qu'il/elle déforme selon sa gestuelle et sa sensibilité.

Ces effets permettront aussi aux ingénieurs du son et aux musiciens d'ajouter de la vie à des sons de synthèse (composition), ou de la variabilité aux paramètres perceptifs

d'un son ; d'étudier le timbre et les textures de son ; de ré-interpréter un son, le dégeler (le modifier dans un espace de hauteur, de durée, de timbre). Ils permettront aux fournisseurs de contenu et d'information (téléphonie, systèmes de synthèse de voix) de rendre des "voix automatiques" moins neutres, différentes à chaque fois en appliquant de légères modifications adaptatives de la prosodie.

Une piste intéressante du point de vue musical est l'effet à commande perceptive : on pilote l'effet à partir d'un modèle de la perception et des descripteurs perceptifs afin d'imposer les propriétés perceptives au son transformé. Un exemple consiste à rendre un son deux fois plus fort du point de vue perceptif, en trouvant le bon facteur d'amplification variable dans le temps. C'est en quelque sorte un retour à la démarche usuelle, où le résultat musical guide la technique, tout en prenant en compte les modèles de perception. Une autre direction de recherche très prometteuse et à peine abordée est l'étude du *mapping* des systèmes numériques combinant un ou plusieurs synthétiseurs sonores avec une ou plusieurs transformations¹, ce qui donnera vraisemblablement lieu à de nouveaux questionnements et à de nouvelles découvertes, très vite exploitées et détournées par les compositeurs et les musiciens.

Remerciements

à Daniel Arfib pour l'intelligence de son encadrement ; à Jean-Claude Risset pour les discussions extrêmement enrichissantes ; aux chercheurs – jeunes, en devenir ou confirmés – rencontrés à Marseille, Paris, Bordeaux, Barcelone, Hambourg, Montréal pour la richesse des échanges et collaborations ; au Centre National de la Recherche Scientifique et à la Région Provence-Alpes-Côte-d'Azur pour le co-financement de la thèse ; à Pascal Gobin et aux étudiants en Électroacoustique du Conservatoire Nationale de Région de Marseille ; à Nayla Farouki pour les précieux échanges.

Bibliographie et Webographie

Association française d'informatique musicale; <http://afim.grame.fr/>

¹ Un étude de ce type est actuellement en cours avec les professeurs Philippe Depalle et Marcelo Wanderley à la Faculté de Musique de l'Université McGill (Montréal, Canada).

Verfaillie, Les chemins de la découverte, ch. *Des contrôles intelligents pour les effets audionumériques adaptatifs*, pp. 59–73. Nayla Farouki ed, Presses Universitaires de France, 2006.

Informatique musicale au LMA-CNRS; <http://www.lma.cnrs-mrs.fr/~IM/>

DAFx; <http://www.dafx.de/>

A-DAFx; <http://adafx.free.fr/>

J. Pierce; *Le Son Musical*. Belin, Pour la Science, 1984.

U. Zölzer (éditeur); *DAFX - Digital Audio Effects*. J. Wiley & Sons, 2002.

D. Arfib; *Recherches et applications en informatique musicale*, chapitre Des Courbes et des Sons, pages 277–86. Hermès, 1998.

N. Bernardini and J. Rudi; Compositional use of digital audio effects. *Journal of New Music Research*, 31(2) p87–91, 2002.

J.-C. Risset; Examples of the musical use of digital audio effects. *Journal of New Music Research*, 31(2) p93–7, 2002.

V. Verfaillie; *Effets Audionumériques Adaptatifs : Théorie, Mise en Œuvre et Usage en Création Musicale Numérique*. Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée, 2003.