

# Projection du son dans l'espace tridimensionnel : un projet de recherche de la Haute école de musique et d'art dramatique de Zurich

Autor(en): **Bennett, Gerald / Färber, Peter / Kocher, Philippe**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Dissonance**

Band (Jahr): - **(2003)**

Heft 83

PDF erstellt am: **24.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-927866>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# PROJECTION DU SON DANS L'ESPACE TRIDIMENSIONNEL

PAR GERALD BENNETT, PETER FÄRBER,  
PHILIPPE KOCHER, JOHANNES SCHÜTT

Un projet de recherche de la Haute école de musique et d'art dramatique de Zurich

Le présent article rend compte des expériences recueillies en quatre ans quant à la projection tridimensionnelle du son dans le domaine de la musique électroacoustique. Le projet a été réalisé à la Haute école de musique et d'art dramatique (HEMAD) de Zurich, qui l'a soutenu. Le but en était de mettre à disposition des compositeurs de musique électroacoustique des outils simples à manier, avec lesquels ils puissent créer l'illusion d'un mouvement du son dans l'espace tridimensionnel. Ce compte rendu s'articule en quatre parties. La première explique brièvement l'arrière-plan théorique des projets zurichois. La deuxième retrace l'évolution du projet depuis 1999. La troisième examine les perspectives d'études ultérieures ; la quatrième propose une courte réflexion sur les conséquences esthétiques des études réalisées.

## I. ARRIÈRE-PLAN THÉORIQUE

L'électroacoustique semble avoir fourni d'emblée aux compositeurs la possibilité de placer leur musique dans un espace tridimensionnel. Stockhausen qualifie son *Gesang der Jünglinge* (1955-1956) de premier exemple de « Raum-Musik » (musique spatiale). Créé en 1958 pour l'Exposition universelle de Bruxelles, le *Poème électronique* de Varèse était diffusé par plusieurs haut-parleurs accrochés aux murs du Pavillon Philips ; au fur et à mesure que les trois pistes de la bande magnétique étaient redirigées vers des haut-parleurs différents, le son semblait glisser à la surface du bâtiment. *Turenas*, de John Chowning, pour bande magnétique à quatre canaux (1972) représente un progrès significatif de l'évolution technique : le déplacement calculé des sons entre les quatre haut-parleurs, le rapport maîtrisé entre son direct et son réverbéré, enfin le recours à l'effet Doppler produisaient une illusion très réaliste de mouvement bidimensionnel. En 1984, Gary Kendall réalise un nouveau bond : bien qu'il n'utilise que deux haut-parleurs, il obtient des illusions extraordinaires d'arrêt et de mouvement dans l'espace en ne synthétisant pas seulement la

position primaire d'un son et sa réverbération diffuse, mais aussi les deux ou trois premiers échos renvoyés par les murs, le plafond et le plancher de la salle.

L'oreille humaine se sert de nombreux repères pour localiser un son dans l'espace. En voici quelques-uns.

1. Différence d'intensité entre les deux oreilles. Si un son se produit directement en face de l'auditeur, il résonne avec la même intensité dans les deux oreilles. S'il se déplace d'un côté, la tête le masque progressivement, d'où une différence d'intensité entre les oreilles, qui peut atteindre 20 dB. Cette différence est le critère fondamental qui permet à l'auditeur de localiser un son sur le plan horizontal qui l'entoure.
2. Décalage d'arrivée aux deux oreilles. Un son venant de droite atteint l'oreille droite un peu plus tôt que la gauche. Cet écart est minime : il est au plus de 0,6 milliseconde pour un son situé à 90° du centre. Avec des écouteurs, il est possible de percevoir sans difficulté des décalages d'un dix millième de seconde ; mais, dans le cas de musique électroacoustique diffusée en salle de concert, les retards et les réverbérations couvraient ces écarts minimes. Il faut donc exagérer les décalages entre les canaux dès la composition.
3. Intensité globale du son. Un son proche paraît évidemment plus fort qu'un son éloigné. Il est plus difficile, en revanche, de dire à quel point un son doit être plus fort pour paraître proche. Nous avons obtenu de bons résultats en utilisant une échelle (logarithmique) de décibels par unité de distance (en réduisant par exemple l'intensité d'un son de 3 dB par unité).
4. Taux d'énergie à haute fréquence d'un son. L'air absorbe davantage les hautes fréquences que les basses. Un son éloigné est donc non seulement plus faible que le même son rapproché, mais aussi moins brillant. En électroacoustique, cet effet peut être simulé facilement avec un filtre passe-bas.
5. Rapport entre son direct et réverbération. Comme l'a démontré Chowning dans *Turenas*, ce rapport est un

repère extrêmement important pour percevoir les distances. À éloignement croissant, l'intensité d'un son réverbéré diminue plus lentement que celle d'un son direct. Pour simuler un son qui s'éloigne de l'auditeur, on peut en réduire l'intensité logarithmiquement (par exemple de 3 dB par unité de distance), tandis que l'intensité des parties réverbérées est réduite linéairement.

6. Spectre global du son. Nous jugeons tous l'angle d'incidence horizontal et vertical d'un son d'après le spectre de ce dernier. Selon cet angle d'incidence, le buste, la tête, et tout particulièrement les pavillons auriculaires, jouent le rôle d'un filtre. Le spectre qui en résulte peut être synthétisé, ce qui permet d'obtenir une simulation probante de la position et du mouvement dans l'espace. Les différences spectrales sont cependant si minimes que cette technique importante ne peut être appliquée qu'à la transmission à des écouteurs ; elle n'entre donc pas en ligne de compte pour les compositeurs dont la musique est destinée aux espaces publics.

À partir des cinq premiers repères cités, les compositeurs de musique électroacoustique ont conçu cinq techniques pour simuler la position et le mouvement dans l'espace.

1. Adapter l'amplitude du son entre les deux canaux jusqu'à ce qu'elle corresponde à l'angle horizontal souhaité du son.
2. Décaler les deux signaux stéréo pour que le signal apparaisse d'abord dans le canal doté de la plus grande amplitude.
3. Modifier l'amplitude d'un son pour simuler la distance.
4. Filtrer les hautes fréquences pour simuler la distance (plus un son est éloigné de l'auditeur, plus la part de hautes fréquences est basse).
5. Renforcer l'illusion d'éloignement en ajoutant de la réverbération et en modulant le rapport entre son direct et son réverbéré.

Ces procédés ont beaucoup d'effet dans l'espace bidimensionnel. Mais comme ils ne fonctionnent que dans un champ stéréophonique (ou, dans un cadre élargi, avec plusieurs

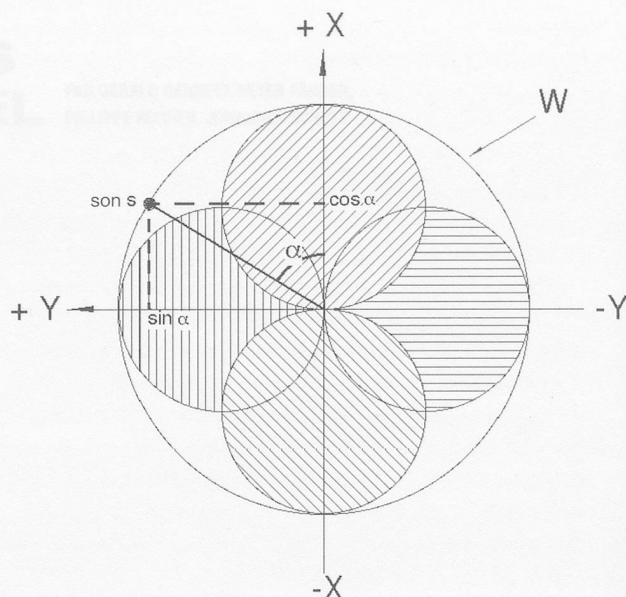
haut-parleurs disposés autour du public, chaque haut-parleur tenant un rapport « stéréophonique » avec son voisin, comme dans les configurations classiques à quatre ou huit canaux), nous les avons trouvés inadéquats pour nos desseins. Les formules classiques d'environnement sonore (Dolby 5.1, 7.1, etc.) n'entraient pas non plus en ligne de compte, parce qu'elles se fondent sur une orientation avant/arrière des haut-parleurs, et traitent différemment les canaux arrière des canaux avant. Nous avons donc tranché en faveur d'un procédé des années 1970, l'« ambisonique », mis au point en Grande-Bretagne par Michael Gerzon.

À l'origine, l'ambisonique fut conçu comme technique de microphone pour fixer les informations spatiales lors d'enregistrements. À cet effet, on utilisait un microphone spécial dit « de champ sonore ». On enregistrait sur quatre canaux, qui permettaient de coder efficacement les caractéristiques spatiales de la source sonore. Pour pouvoir écouter l'enregistrement, il fallait faire décoder cette information par des circuits de commutation spéciaux. Outre la spatialité remarquable du résultat, un des avantages de cette technique était que l'enregistrement pouvait être décodé pour n'importe quelle configuration de haut-parleurs (deux, trois, quatre ou plus), sans que la qualité spatiale en soit sensiblement modifiée. Michael Gerzon, qui était mathématicien et non ingénieur du son, parvint à démontrer qu'à certaines conditions, le signal décodé correspondait exactement au front d'onde du son originel. (La figure 1 présente le principe foncier de l'ambisonique.)

Imaginons deux microphones bidirectionnels placés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre, l'un en abscisse, l'autre en ordonnée. Imaginons ensuite un son  $s$  d'amplitude 1.0 sur un cercle au centre duquel sont placés les microphones (le rayon du cercle est donc 1). Selon le diagramme directionnel des microphones, le son  $s$  sera absorbé par chacun d'entre eux avec moins que l'amplitude complète. En fait, l'amplitude du son des deux microphones équivaut au produit du sinus ou du cosinus de l'angle  $\alpha$  et de



Figure 1  
Principe de l'ambisonique



l'amplitude de  $s$ . Enregistrons enfin l'amplitude totale du son avec un microphone omnidirectionnel (représenté par le cercle  $w$  dans la fig. 1). Le codage de l'information spatiale du son  $s$  dans deux dimensions se calcule alors à l'aide des formules suivantes :

$$\begin{aligned} w &= s * 0.707 \\ x &= s * \cos \alpha \\ y &= s * \sin \alpha \end{aligned}$$

Si nous imaginons maintenant un troisième microphone orienté vers le haut et le bas (le long de l'axe  $z$ ), nous sommes en mesure de représenter comme suit l'énergie du son en trois dimensions ( $\beta$  est l'angle d'incidence du son en hauteur) :

$$\begin{aligned} w &= s * 0.707 \\ x &= s * \cos \alpha * \cos \beta \\ y &= s * \sin \alpha * \cos \beta \\ z &= s * \sin \beta \end{aligned}$$

Le décodage de ces quatre signaux, effectué pour obtenir les signaux qui seront envoyés aux haut-parleurs, correspond largement au codage, à la différence que les angles se réfèrent à la position des haut-parleurs. La formule ci-dessous sert à calculer le signal  $S_L$ , envoyé à l'un des haut-parleurs d'une série aussi nombreuse que l'on veut ( $\alpha$  désigne ici l'angle horizontal du haut-parleur  $L$ ,  $\beta$  son angle en hauteur) :

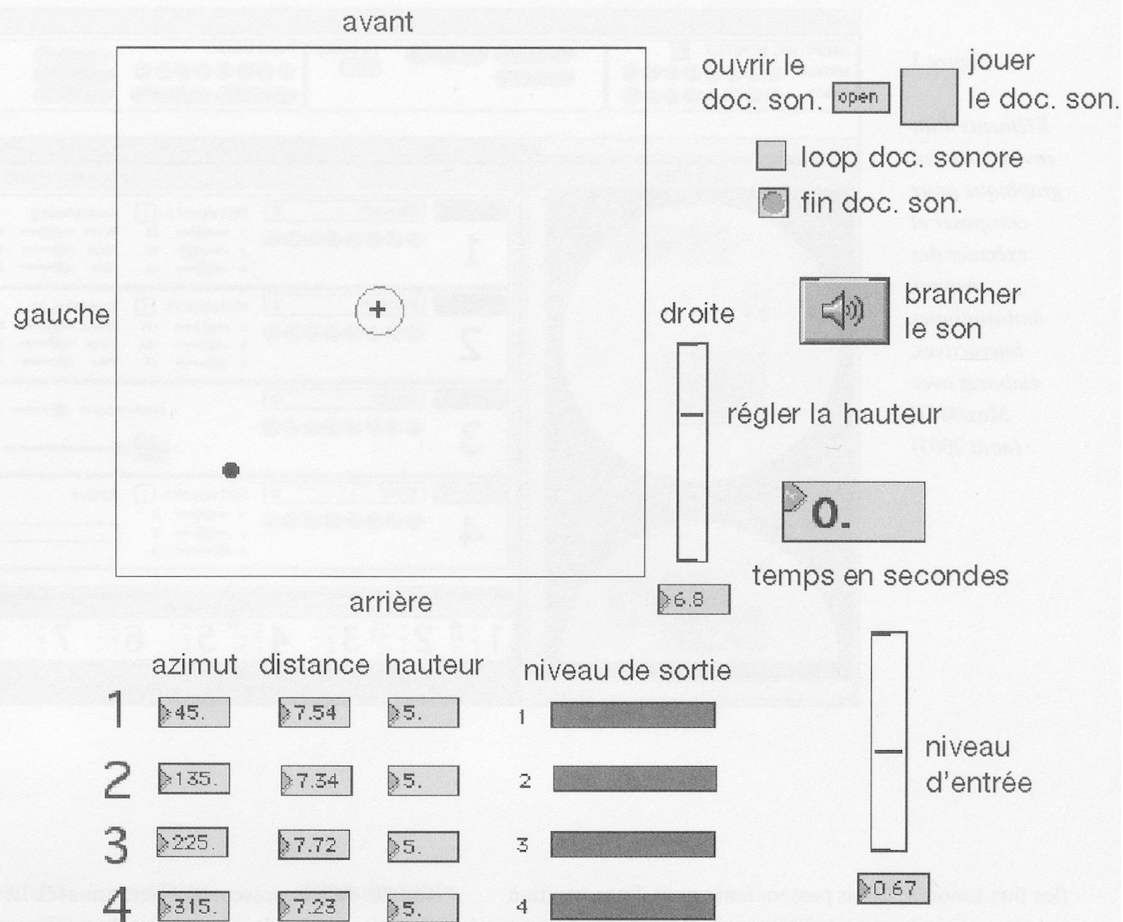
$S_L = 0.707 * w + x * \cos \alpha \cos \beta + y * \sin \alpha \cos \beta + z * \sin \beta$   
Ces égalités sont des équations simples (de degré zéro et un), utilisées pour calculer les harmoniques sphériques, et qui permettent à l'auditeur de localiser un son à l'intérieur d'un quadrant ( $90^\circ$  mettent une localisation plus précise, mais nécessitent plus de canaux d'information. Expérience faite, la représentation de deuxième degré (9 canaux d'information) constitue un bon compromis entre la précision de la localisation et la quantité de données à maîtriser.

## II. RÉSUMÉ DES ÉTUDES FAITES À LA HEMAD DEPUIS 1999

Le premier projet d'ambisonique, entamé en octobre 1999, consistait avant tout à mettre dans un logiciel les équations ambisoniques du premier degré. Comme langage de programmation, nous avons choisi le programme bien connu de synthèse sonore *Csound*. Outre la transcription des formules, nous avons élaboré des programmes pour situer le son dans l'espace tridimensionnel et pour représenter des mouvements simples. Le travail avec les programmes *Csound* a donné immédiatement de bons résultats, mais s'est révélé assez compliqué. Non seulement le compositeur doit définir la position et le mouvement de chaque son, il lui faut encore décoder le fichier son codé sur quatre canaux (« Format B », en jargon ambisonique) en autant de fichiers monophoniques qu'il est censé y avoir de haut-parleurs. Ces fichiers sont ensuite traités à l'aide d'un programme de mixage comme *Pro Tools*, puis transférés sur une bande magnétique 8-pistes, qui sera utilisée en concert. L'inconvénient majeur est que le compositeur ne peut pas entendre la réalisation ambisonique au studio avant que la bande magnétique définitive ne soit achevée. Lorsque nous avons entendu pour la première fois l'ambisonique dans une grande salle, nous avons été surpris et enthousiasmés par la qualité grandiose du son. Mais après l'euphorie initiale, nous nous sommes rendu compte que nous, compositeurs, devons trouver une possibilité de travailler interactivement avec l'ambisonique.

Au printemps 2000, nous avons commencé d'utiliser le programme interactif *Max/MSP* pour l'ambisonique. Un des premiers résultats a été un encodeur/décodeur combiné qui permet au compositeur de contrôler la position du son avec la souris (voir fig. 2).

Figure 2  
Encodeur/  
décodeur  
combiné  
élaboré avec  
Max/MSP  
(printemps  
2000)



Le carré de gauche représente une salle vue d'en haut. Le point noir montre la position d'un son dans le plan horizontal, et peut être déplacé avec la souris. Les curseurs à droite du carré permettent de fixer la position en hauteur du son. Les champs sous le carré permettent de déterminer la position de chaque haut-parleur (quatre, dans le cas présent) ; le programme calcule le décodage optimal et compense au besoin l'inégalité de distance du haut-parleur par rapport au centre.

Ces simples outils nous ont déjà permis de recueillir de nombreuses expériences d'ambisonique. La possibilité d'entendre tout et exécutant un mouvement s'avère d'un grand secours pour l'imagination, car à notre grand étonnement, il s'est avéré beaucoup plus difficile d'imaginer les sons dans l'espace tridimensionnel que nous ne l'avions pensé. Un outil simple, piloté par la souris, mais sans capacité de mémoire, et qui ne peut traiter qu'un son à la fois, n'est évidemment pas un auxiliaire sérieux pour la composition électroacoustique. Pour composer, nous avons donc continué à utiliser des programmes *Csound*, auxquels sont venus se joindre rapidement des versions complémentaires, avec des équations du deuxième degré. Il est devenu courant de calculer des fichiers à 9 canaux et en format B avec *Csound*, puis de les décodifier en temps réel avec un décodeur Max/MSP. Parallèlement, les trois auteurs (Färber, Kocher et Schütt) planchaient énergiquement pour élargir l'éventail des programmes Max/MSP. Ils s'intéressaient particulièrement à la possibilité d'utiliser l'ambisonique interactivement, en concert, en le combinant avec des programmes de traitement et de synthèse du son. Entre le printemps 2000 et maintenant ont eu lieu plusieurs concerts dans lesquels furent utilisés des programmes conçus chacun pour une œuvre et une salle particulière. Avec jusqu'à 24 canaux d'entrée de sons à convertir et à traiter ambisoniquement, et des sorties pour

jusqu'à 24 haut-parleurs, les ordinateurs étaient soumis à des exigences considérables. Il ne fallait pas moins de trois Macintosh très performants, travaillant en parallèle.

Restait le problème du travail polyphonique sur des pièces pour bande magnétique composées en studio. Au printemps 2001, nous eûmes l'idée d'élaborer ce qu'on appelle un *plug-in* pour un programme de mixage commercial, ce qui nous permettrait de réaliser des textures complexes et de les écouter en cours de travail. En automne 2001, la HEMAD soutint un projet de recherche en collaboration avec Dave Malham et Ambrose Field de l'Université d'York (Grande-Bretagne), dont il résulta un groupe de *plug-ins* VST pour plates-formes Macintosh et Windows. Depuis avril 2002, ces *plug-ins* sont disponibles sur Internet sous forme de gratuits.

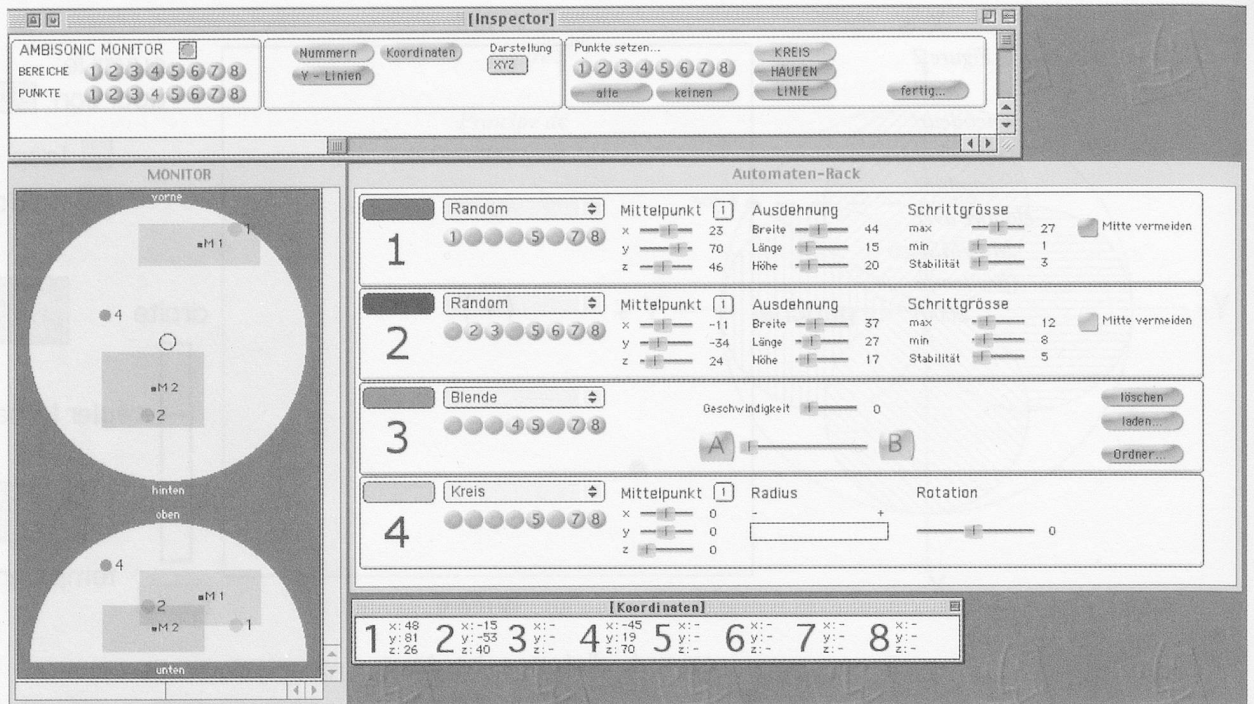
Pendant l'année universitaire 2002-2003, Färber, Kocher et Schütt travaillèrent à un environnement permettant de composer et d'exécuter des œuvres ambisoniques interactives. Grâce à l'expérience accumulée au cours de trois années précédentes, ils parvinrent à mettre au point un programme qui allie la souplesse à la simplicité d'utilisation. (La figure 3 montre une partie de l'interface.)

La partie de gauche montre les positions de huit sons (au plus) situés dans un espace sphérique. Le cercle supérieur montre la position sur le plan horizontal, vu d'en haut, le demi-cercle la hauteur sur l'axe avant/arrière. Les points représentent des sons isolés, les rectangles des groupes de sons qui se meuvent ensemble. Chacune des boîtes numérotées de droite est un « outil » virtuel, qui peut être programmé de façon à exécuter un certain type de mouvement pour huit sons différents au plus (huit au plus de ces « outils » peuvent être activés simultanément). Trois types de mouvement sont montrés ici : « hasard » (les 1-8 flux sonores choisis changent de position fortuitement) ; fondu enchaîné



Figure 3

Éléments d'un environnement graphique pour composer et exécuter des œuvres ambisoniques interactives, élaborés avec Max/MSP (août 2003)



(les flux sonores choisis passent lentement d'une position prédéterminée à une autre) ; et cercle (dix flux sonores choisis se meuvent simultanément en cercle). Chaque « outil » propose de nombreux paramètres de pilotage pour les mouvements de base. La boîte de commande dans le haut de l'interface sert à la configuration de base des sons dans l'espace. L'affichage dans le bord inférieur montre les coordonnées des flux sonores à l'instant respectif. Lors de la rédaction du présent article, l'interface a été complétée et envoyée à différents compositeurs pour le test *bêta*. Ce test effectué, le logiciel sera disponible sur Internet.

### III. PERSPECTIVES DES ÉTUDES ULTÉRIEURES

Deux projets plus modestes sont prévus pour l'année académique 2003-2004. Le premier est la conception d'un nouveau plug-in qui complètera les plug-ins existants. Jusqu'ici, tout notre travail d'ambisonique admettait que le(la) compositeur(-trice) plaçait son matériau dans un espace vierge de toute réverbération, comme à l'air libre. Le plug-in qui sera élaboré au cours du semestre d'hiver 2003-2004 permettra aux compositeurs de concevoir d'abord un espace tridimensionnel (fermé), dont la forme, les dimensions et les caractéristiques des murs peuvent être définis, puis de décrire la position ou le mouvement d'un son dans cette salle. Le programme calculera non seulement la représentation de son direct au format B, mais aussi les trois premiers échos renvoyés par les murs. Ces échos sont en effet très importants pour aider notre perception à localiser un son dans l'espace, et nous escomptons que la localisation s'améliorera considérablement grâce au nouveau traitement. Un second projet est annoncé pour le semestre d'été 2004. Il s'agit d'élaborer un programme indépendant (pas de plug-in, donc) pour travailler en ambisonique. Il faudra mettre en particulier au point un nouveau format de données qui comprenne à la fois le son monophonique et les informations quant à sa position et son mouvement dans l'espace tridimensionnel. Sur la base de ces données, le programme calculera le signal ambisonique sans devoir stocker en mémoire les nombreux

canaux de la représentation en format B. Le compositeur pourra modifier le mouvement du son interactivement et stocker ou rejeter les nouveaux schémas de mouvement avec le son.

En 2004-2005, nous espérons pouvoir lancer un projet plus vaste en collaboration avec l'Université d'York. Le but serait de mettre au point un environnement compositionnel polyvalent pour l'ambisonique. L'an dernier, des progrès remarquables ont été faits dans le domaine de l'espace sonore. Il est paru par exemple un rapport sur des équations d'ambisonique du quinzième degré, ainsi qu'un article présentant une théorie générale du calcul de la représentation tridimensionnelle parfaite du son à partir d'enregistrements réalisés sans microphones spéciaux. Nos connaissances théoriques doivent donc être mises à jour. Il nous faut en outre en savoir rapidement plus sur la perception de l'ambisonique. Quelle est la qualité de la localisation ? Dans quelle mesure notre perception dépend-elle de la fréquence ? Quelles sont les meilleures configurations des haut-parleurs, pour l'ambisonique ? Enfin, la question la plus importante, peut-être : comment le son diffusé de tous côtés (*surround sound*) se distingue-t-il esthétiquement du son projeté de front ? Ce savoir psychoacoustique doit être intégré dans la conception de la prochaine génération d'outils de composition. Un tel projet de recherche demanderait deux ou trois ans de travail et devrait impliquer des psychologues, des ingénieurs, des physiciens, des programmeurs et, bien entendu, des musiciens.

### IV. RÉFLEXIONS ESTHÉTIQUES

En guise de conclusion, il paraît indiqué de réfléchir brièvement aux conséquences esthétiques de l'utilisation du *surround sound* en composition. Quand nous avons quelque chose d'important à dire, nous ne nous tenons pas derrière notre interlocuteur pour lui parler à voix basse, nous nous plaçons devant lui et parlons clairement. Le *surround sound* est plus comparable aux bruits environnants qu'au discours prononcé clairement pour un vis-à-vis. Dans la vie courante, nous avons l'habitude d'ignorer les bruits environnants ou

d'en contrôler tout au plus le potentiel de danger. D'un autre côté, les sons « électroniques » dont nous ne voyons pas la source ou que nous ne pouvons pas identifier suscitent toute notre attention. Les caractéristiques du *surround sound* (espaces tridimensionnels d'apparence réelle, sons invisibles, mouvement dans l'espace) ont toujours été des éléments importants de perception du danger. Nous n'avons guère d'expérience quant à leur exploitation esthétique. Nous ne savons pas non plus les associations d'idées que suscite chez l'auditeur la manipulation de fondements aussi élémentaires de la perception. Le transfert de mécanismes complexes d'interprétation intellectuelle sur un système de réactions subconscientes aussi ancien que l'humanité elle-même, enrichira sans aucun doute la musique. Mais nous ignorons pour le moment de quoi cet enrichissement aura l'air.

En supprimant l'orientation frontale traditionnelle du discours musical, le *surround sound*, en particulier l'ambisonique, accélérera certainement la naissance de nouvelles manières d'écouter. Mais ce processus de suppression se tournera aussi vers l'intérieur et modifiera les langages musicaux, de même que la manière dont la musique nous parle. Dans la musique d'autrefois, l'espace était une catégorie imaginaire, qu'on pouvait essayer de représenter métaphoriquement par une modulation abrupte ou un changement d'instrumentation destiné à symboliser la distance. En ambisonique, l'espace et le mouvement deviennent des aspects réellement perceptibles. Les réalités affectives dont ils pourraient devenir les métaphores restent à découvrir.

#### Bibliographie

- Bennett, G. : «A poor man's techniques of sound diffusion», G. Bennett & F. Barrière (dir.), *Composition / Diffusion in Electroacoustic Music*. Proceedings of the International Academy of Electroacoustic Music 1997, Bourges 1998, p. 27-35.
- Blauert, J. : *Räumliches Hören*, Stuttgart 1974.
- Blauert, J. : *Räumliches Hören. Nachschrift. Neue Ergebnisse seit 1972*, Stuttgart 1985.
- Blauert, J. : *Räumliches Hören. 2. Nachschrift*, Stuttgart 1997.
- Chowning, J. : «The simulation of moving sound sources», *Journal of the Audio Engineering Society* 19(1):2-6, 1971.
- Daniel, J. : *Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia*, thèse de doctorat de l'Université Paris 6, 2000, [http://gyronymo.free.fr/audio3D/download\\_Thesis\\_PwPt.html](http://gyronymo.free.fr/audio3D/download_Thesis_PwPt.html)
- Gerzon, M.A. : «Periphony: with height sound reproduction», *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 21, n° 1 Jan/ Feb 1973, p. 2-10.
- Kendall, G., W. Martens, S.L. Decker : «Spatial reverberation: discussion and demonstration», M. V. Mathews & J. R. Pierce (dir.), *Current Directions in Computer Music Research*, Cambridge (Mass.) 1989.
- Malham, D.G. and Myatt, A. : «3-D Sound spatialization using ambisonic techniques», *Computer Music Journal* 19:4, 1995, p. 58-70.
- Stockhausen, K. : «Musik im Raum», *Texte zur elektronischen und instrumentalen Musik*, Bd. I., Cologne 1963, p. 152-175 (première publication dans *Die Reihe* 5, Vienne 1959).
- Treib, Marc : *Space Calculated in Seconds: The Phillips Pavilion, Le Corbusier, Edgard Varèse*, Princeton 1996.