

INTERFACE MULTIMODALE POUR LA SPATIALISATION DE MUSIQUE ACOUSMATIQUE

Gwendal Le Vaillant
LARAS - ISIB
gwendal.le-vaillant@grenoble-inp.org

Rudi Giot
LARAS - ISIB
giot@isib.be

Rafael Muñoz Gomez
Musiques & Recherches
munozgomez.r@gmail.com

RÉSUMÉ

Le projet MIAM Spat (Multimodal Interface for Acoustic Music Spatialization) propose une nouvelle manière de spatialiser de la musique durant un concert. Les spatialisateurs créent actuellement des effets tridimensionnels grâce à des tables de mixage, dans des salles de concert comportant une cinquantaine de haut-parleurs [17].

La principale technique de spatialisation consiste à associer chaque curseur de la table de mixage à un unique haut-parleur, de sorte qu'il soit possible de jouer sur le volume de chacun d'entre eux. Les figures de spatialisation réalisables sont alors limitées, notamment par le fait que dix doigts ne peuvent pas contrôler des dizaines de curseurs.

Des écrans tactiles multipoints ont alors été introduits en remplacement des tables de mixage matérielles. Le logiciel MIAM Spat dessine sur un écran tactile des surfaces associées à des couleurs sonores, et la spatialisation naît de l'interaction entre les doigts et ces surfaces. Ces couleurs sonores sont également commandables en MIDI.

Le logiciel présenté dans ce document a montré des résultats encourageants durant plusieurs présentations et ateliers, et est toujours en pleine évolution. Il offre de nouvelles présentations et possibilités gestuelles, tout en étant facilement intégrable à de grands systèmes de spatialisation.

1. INTRODUCTION

Alors que la musique commerciale est aujourd'hui publiée sous format stéréophonique, et destinée à être écoutée sur deux canaux audio, des compositeurs préfèrent ajouter de nouvelles dimensions à leurs pièces en les restituant grâce à des systèmes de spatialisation. Les plus grandes installations comportent de quarante à cinquante haut-parleurs répartis dans une salle de concert ([17], [25]).

Cette Interface Multimodale pour la Spatialisation de Musique Acousmatique (d'acronyme anglais MIAM Spat) permet de spatialiser de la musique à l'aide d'écrans tactiles multipoint et de contrôleurs numériques génériques. Son rôle est principalement de fournir de nouvelles possibilités aux spatialisateurs, qui utilisent actuellement de simples tables de mixage. Les technologies employées pour ce projet

aident les systèmes de spatialisation à devenir plus intuitifs et dynamiques.

Débutant par un état de l'art de la spatialisation, cet article détaillera l'installation typique nécessaire à cette discipline, ainsi que les techniques contemporaines permettant son utilisation. Les installations actuelles présentant des limites qui seront décrites, de nouvelles caractéristiques et fonctionnalités ont été imaginées. Ces dernières seront présentées en section 3, puis leur implémentation sera abordée en section 4.

Enfin, les diverses collaborations artistiques et phases de tests de MIAM Spat ont montré des résultats très encourageants, avec un réel agrandissement de l'espace des possibilités pour la spatialisation. Ceci sera détaillé en 5^{ème} et dernière section.

2. ÉTAT DE L'ART

La spatialisation est considérée dans cet article comme l'art de diffuser de la musique à l'aide de systèmes de haut-parleurs grands et complexes. Cette section décrit ces systèmes eux-mêmes, puis de quelle manière générale les spatialisateurs les utilisent pour produire des effets sonores.

Le lecteur déjà familier avec la spatialisation de musiques électroacoustiques et acousmatiques pourra se rendre directement en sous-section 2.2.

2.1. Environnement permettant la spatialisation

2.1.1. Compositions musicales en entrée

Les systèmes de spatialisation acceptent de nombreux formats en entrée, pouvant aller de la stéréophonie, jusqu'à des fichiers audio sur 16 pistes ou plus.

D'après une étude récente de Peters, Marentakis et McAdams [17], les aspects spatiaux sont en musique surtout utilisés « to enhance the listening experience » (« pour améliorer l'expérience d'écoute ») ou « as a paradigm for artistic expression » (« en tant que paradigme pour l'expression artistique »). En fonction des choix artistiques et objectifs du compositeur, des entités sonores différentes peuvent être mixées sur une ou plusieurs pistes. Tous les systèmes décrits

par la suite accepteront un nombre arbitraire de pistes en entrée.

2.1.2. Acousmonium

Le projet MIAM Spat n'est destiné qu'à des systèmes audio spécifiques, comportant plusieurs canaux distincts en sortie. Bien qu'il puisse fonctionner avec un système multicanal quelconque, l'objectif est l'interfaçage avec un *acousmonium*. De tels systèmes sont disponibles auprès de l'association Musiques & Recherches [15] près de Bruxelles, ou du Groupe de Recherches Musicales [2] de Paris. On peut également ici citer le Birmingham ElectroAcoustic Sound Theatre (BEAST, [25]).

L'acousmonium, tel que défini par Bayle en 1974 [3], est un « orchestre de haut-parleurs » en contenant au minimum 16 différents. Les haut-parleurs se doivent d'être disposés en trois dimensions dans l'espace de la salle de concert, et doivent présenter des caractéristiques spectrales et de puissance variées.

En simplifiant la pensée de Vande Gorne, on pourra considérer que la musique acousmatique accorde de l'importance au son lui-même [27] et non pas à des instruments de musique, et donc que l'objectif d'une performance de spatialisation est la production de divers effets sonores [26].

2.1.3. Installation courante

La structure générale d'un système permettant une performance de spatialisation est présentée en figure 1, et est basée sur plusieurs acousmoniums ([15], [8], [25]). Par la suite, N désignera le nombre de pistes d'entrée, et M le nombre de sorties vers les haut-parleurs. On aura $M \geq N$ car il est d'usage de ne pas sommer deux pistes d'entrée sur une même sortie, pour un acousmonium.

La spatialisation nécessite en premier lieu le routage de N entrées audio vers M sorties, et celui-ci est réalisé au niveau du DAW (de l'anglais Digital Audio Workstation) réservé à l'acousmonium. Un routage logiciel est en effet mis en place plus facilement qu'avec du matériel spécifique. La table de mixage devra alors comporter M curseurs de volume, et chacun d'entre eux sera associé à un unique haut-parleur : c'est ainsi que l'on pourra obtenir des effets lors d'une performance de spatialisation.

Pour expliciter comment spatialiser à la console, considérons n l'une des N entrées audio. Cette piste n pourra par exemple être routée vers tous les haut-parleurs accrochés au plafond d'une salle de concert. Dans ce cas, si la console de mixage n'était pas présente, cette piste n serait diffusée sur tous les haut-parleurs du plafond, et ce durant l'intégralité de la pièce à spatialiser ; on comprend ainsi que la console permet d'atténuer le signal routé vers un certain haut-parleur. Le signal provenant la piste n peut alors être reproduit à l'avant du plafond, ou bien à l'arrière, sur un côté, etc.

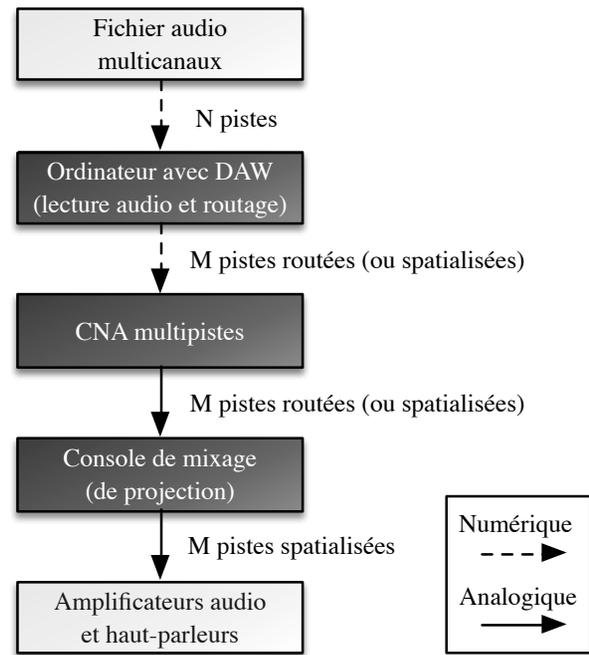


Figure 1. Configuration actuelle, généralisée, des composants d'un acousmonium.

2.2. Catégorisation des techniques actuelles

2.2.1. Spatialisation simulée

Les techniques de spatialisation les plus démocratisées actuellement consistent à modifier les sons et entrées d'instruments, puis de les router vers un nombre restreint de haut-parleurs. Des considérations psychoacoustiques et de la simulation physique sont alors employées afin de créer des effets de spatialisation [22], le but étant que ces effets puissent être reproduits sur des systèmes conventionnels de type stéréophonie ou 5.1. On peut penser ici aux simples modifications de panoramique, jusqu'à la simulation binaurale de spatialisation [11] ; et pour ne citer qu'eux, les outils SPAT de l'IRCAM [7] et Holophon [5] rentrent dans cette catégorie.

Ces approches sont à l'opposé de la spatialisation sur acousmonium, ce dernier produisant des effets directement dans le monde acoustique réel. Il était cependant important de préciser que nombre de logiciels et recherches ayant trait à la spatialisation se focalisent sur ce cas, c'est à dire la simulation.

2.2.2. Spatialisation logicielle

Comme sous-entendu en figure 1, la performance de spatialisation peut être vue de deux manières différentes. L'outil employé peut aussi bien être le DAW en studio, que la console de mixage au moment du concert.

La première méthode consiste à préparer la spatialisation en studio, à l'aide d'automatisations basiques dans un DAW, ou de plug-ins tels que Octogris [16] par exemple. D'après l'étude de Peters et al. [17], cette méthode est celle employée par 75% des participants à l'enquête. La composition générée comporte alors un nombre de canaux important, de sorte que l'acte de spatialisation en concert ne nécessite que peu d'opérations. Le routage statique est en effet dans ce cas presque suffisant pour diffuser les sons dans les haut-parleurs qui conviennent.

Pour la spatialisation de musique acousmatique, la « pré-spatialisation » effectuée en studio n'est pas applicable à une situation de performance. En effet, les DAWs et leurs modules d'extension sont traditionnellement commandés par un clavier et une souris, et ne sont donc pas suffisamment intuitifs et précis. D'autre part, la puissance informatique nécessaire aux calculs de spatialisation réduit les temps de calcul alloués à la lecture audio, et risque de la déstabiliser, ce qui n'est pas souhaitable en pratique lors d'une performance.

2.2.3. Spatialisation matérielle

La seconde approche consiste à lire une composition comportant $N < M$ canaux, et à réaliser une spatialisation en temps-réel durant le concert ; spatialiser requiert alors une utilisation plus ou moins conséquente de la console de mixage, dont le rôle était décrit en section 2.1.3. Cette solution est choisie par 58% des spatialisateurs, selon l'étude de Peters et al. [17].

Des compositeurs prévoient une utilisation intensive de la table de mixage, et ont tendance à publier leurs pièces sous format stéréophonique ou quadraphonique. C'est ainsi qu'une performance conséquente de spatialisation peut avoir lieu lors du concert [24]. Cette méthode permet également au spatialisateur de s'adapter au mieux à l'acousmonium sur lequel sera diffusée la pièce, et c'est finalement sur ce cas de performance de spatialisation sur console de mixage que l'interface MIAM Spat aura le plus grand intérêt.

2.3. Limitations actuelles

Jouer sur table de mixage offre une précision sur le volume de chaque haut-parleur séparément, mais des transitions complexes entre haut-parleurs (ou groupes de haut-parleurs) requièrent des techniques de spatialisation poussées.

Pour expliciter ceci, partons de l'exemple basique d'un système audio octophonique, dont les huit haut-parleurs sont disposés en cercle autour du centre de la salle de concert. On doit maintenant préciser que la plupart des acousmoniums sont des assemblages de paires stéréophoniques, ainsi les canaux gauche et droit d'une même paire sont représentés côte à côte sur la console de projection ; pour notre octophonie,

on aura alors les quatre paires de haut-parleurs « Avant », « Centre-avant », « Centre-arrière » et « Arrière ». Obtenir une translation sonore douce et continue de l'arrière vers l'avant de la salle semble relativement facile, avec un tel placement de curseurs, et avec huit doigts. Il suffit en effet pour le spatialisateur de se focaliser sur quatre entités spatiales, chaque entité étant constituée de deux curseurs adjacents, et contrôlée par deux doigts côte à côte.

Toutefois, une rotation sonore autour du centre de salle requiert beaucoup plus de virtuosité : considérons ici une rotation de la gauche vers la droite de la salle, en passant par les haut-parleurs arrière. Cet effet de spatialisation nécessite la participation de nombreux doigts, qui devront bouger simultanément mais de manière décoordonnée, comme montré en figure 2. Bien que simple, cet exemple montre les limites de la table de mixage, pour la production d'un effet pourtant simple à concevoir mentalement.

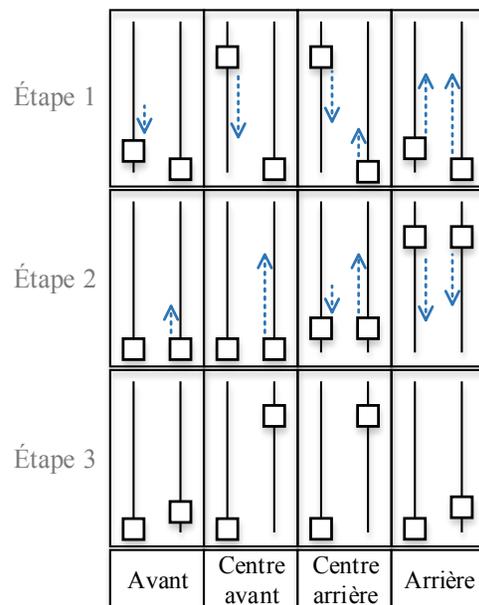


Figure 2. Exemple de rotation difficile en spatialisation, à la console de mixage, sur octophonie. Trajectoire sonore douce en 3 étapes : Gauche-Arrière-Droite.

Un acousmonium permet d'influer sur bien d'autres paramètres, tel qu'orienter le son directement vers le public ou non. Comme précisé en section 2.1.2, les haut-parleurs présentent des caractéristiques spectrales différentes, ce qui permet à la couleur sonore de devenir elle aussi un paramètre dynamique. Le timbre devient ainsi un aspect important en spatialisation, tel qu'expliqué par Normandeau [16].

Nous avons donc des possibilités de contrôle de nombreux paramètres, sur des acousmoniums comportant tradi-

tionnellement entre $M = 20$ et $M = 50$ canaux ; les capacités gestuelles des dix doigts de la main sont alors rapidement dépassées. Tous ces éléments font ressortir le besoin d'un système polyvalent, qui puisse aider les artistes à imaginer, créer et réaliser en concert des opérations complexes de spatialisation.

3. FONDEMENTS DU PROJET

3.1. Contraintes

3.1.1. Intégration facile

Dans le cadre de la conception d'une nouvelle interface de spatialisation, et étant donné la complexité du système requis actuellement, les premières contraintes sont l'installation et l'intégration faciles et rapides à un acousmonium. En pratique, un outil dont l'installation nécessite des heures de travail supplémentaires rebuterait nombre d'artistes et de techniciens. De plus, l'objectif n'est pas de créer un système de spatialisation à partir de zéro, mais plutôt d'agrandir l'espace des possibilités, à partir du système actuel.

3.1.2. Faibles latences

Les latences que nous considérons ici seront les délais entre un geste sur un des contrôleurs relié au logiciel MIAM Spat, et la perception auditive de son action au niveau des enceintes. Les précédents prototypes de MIAM Spat se sont révélés trop peu réactifs, selon les divers testeurs du projet ; c'est ainsi que la latence est devenu un point crucial pour cette interface gestuelle. La spatialisation à la console de mixage permet des réactions instantanées de l'acousmonium, ce qui est évident pour les consoles analogiques, et également vrai en pratique pour les consoles numériques modernes. Un nouveau système de spatialisation se doit donc de proposer des performances équivalentes aux systèmes pré-existants, afin d'être adopté par des spatialisateurs.

3.1.3. Sorties audio par matériel RME

En termes de matériel, notre prototype nécessite que l'ordinateur de lecture sorte M canaux audionumériques par le biais d'une interface du fabricant RME [20]. La principale raison est que toutes les interfaces RME comportent en interne un mixeur numérique matriciel, fonctionnant en temps-réel dur, et contrôlable à distance par un logiciel nommé TotalMix [20]. Ce mixage matriciel sera au cœur du projet MIAM Spat, et ses principes sont décrit en section 3.2.3.

Le respect de cette condition permet à MIAM Spat de s'intégrer à un acousmonium de l'une des manières suivantes :

- Si le CNA est lui-même de marque RME, on le contrôle directement depuis TotalMix.
- Si le convertisseur numérique/analogique (CNA) est contrôlable par protocole Multichannel Audio Digital Interface (MADI, [1]), on doit le contrôler par une simple interface MADI de marque RME. Ce cas regroupe la quasi-totalité des acousmoniums, le contrôle par MADI étant disponible sur la majorité des CNA pour l'audio ; c'est le cas pour l'acousmonium de Musiques & Recherches [15] et pour celui du GRM [8]. Il faut par contre passer à l'utilisation d'un interface MADI de marque RME si cela n'était pas le cas.
- Si le CNA accepte des entrées ADAT [21], on doit le contrôler depuis un matériel RME équipé de sorties ADAT.

3.2. Concepts

3.2.1. Nouvelles interfaces gestuelles

Avec la démocratisation de l'accès à des écrans tactiles multipoint [23], l'idée de les utiliser pour la spatialisation a émergé en collaboration avec Musiques & Recherches. Théoriquement, la détection de dix points de contacts permet de remplacer entièrement la console de projection pour une performance de spatialisation, en jouant par exemple sur une console graphique, virtuelle. En pratique, l'intérêt est bien sûr l'ajout de nouvelles fonctionnalités.

Il reste toutefois une différence majeure entre un système mécanique (la console de projection) et un système tactile à composants virtuels : la présence de retour d'effort de la part de l'interface. On notera alors ici que les consoles d'acousmonium ne comportent pas de potentiomètres rectilignes motorisés (cas de Musiques & Recherches), ou bien que la motorisation n'est pas utilisée en performance de spatialisation (cas du GRM). Même s'il reste meilleur que celui d'une interface tactile nue, le retour d'effort de la console est donc moindre.

Étant donné la quantité et la diversité des contrôleurs de type Musical Instrument Digital Interface (MIDI, [13]) disponibles à l'heure actuelle, il a été décidé qu'ils devraient eux aussi être des entrées du système MIAM Spat. Leur objectif premier est de permettre l'adaptation de gestes instrumentaux à des figures de spatialisation, que ces gestes soient bien connus du spatialisateur, ou plus abstraits et créés pour l'acousmonium.

Enfin, en compensation du manque de retour d'effort d'un écran tactile, les contrôleurs MIDI doivent fournir une alternative, au sein du projet MIAM Spat.

3.2.2. États de l'acousmonium, et transitions

Le concept fondamental de MIAM Spat est sans doute celui d'« état d'acousmonium », que l'on définit ici comme

la position de tous les curseurs de la console de projection, à un instant donné. En figure 2 par exemple, les étapes 1, 2 et 3 sont en fait trois états distincts de l'octophonie de haut-parleurs.

La notion état d'acousmonium est très souple, et on peut relier un état à n'importe quel effet de spatialisation. Par exemple, pour la figure 2, l'étape 1 pourrait être l'état « gauche », l'étape 2 être l'état « arrière » et la 3 l'état « droite », avec des états d'acousmonium reliés à des zones de l'espace. Les états peuvent tout aussi bien désigner des couleurs sonores, telles que « diffus », « aigü » ou bien encore « lointain ». Chacun de ces derniers états peut impliquer une grande quantité de haut-parleurs, à l'inverse de l'exemple de la figure 2 où un état implique 4 enceintes.

Ceci étant posé, une performance de spatialisation peut alors être définie comme un ensemble de transitions entre divers états d'acousmonium. Ces transitions seront contrôlées de manière précise par le spatialisateur, tandis que MIAM Spat se charge des calculs nécessaires. Des interpolations devront en effet être réalisées de manière transparente pour l'utilisateur ; c'est cette idée qui résoud le problème de la trop grande complexité de certaines transitions, lors de la diffusion de musiques acousmatiques.

3.2.3. Mixage matriciel

Comme évoqué en section 3.1.3, le mixage (ou routage) matriciel est lui-aussi un composant essentiel pour MIAM Spat. Formellement, posons \mathbf{I} et \mathbf{Q} les vecteurs de taille M d'entrée et de sortie d'un mixeur matriciel, L'emploi de ce dernier à des fins de spatialisation est équivalent au calcul suivant, avec $R(t)$ la matrice de routage de taille $M \times M$, à l'instant t :

$$\mathbf{Q} = R(t)\mathbf{I} \quad (1)$$

L'utilisation classique d'un acousmonium, avec spatialisation à la console, nécessite que cette matrice soit diagonale. Une entrée m doit en effet être routée sur la sortie m , avec un éventuel coefficient d'atténuation. On remarque alors que jouer sur le $m^{\text{ième}}$ coefficient de la matrice, équivaut à jouer avec le $m^{\text{ième}}$ curseur de la table de mixage : c'est de cette manière que MIAM Spat va prendre le contrôle d'un acousmonium.

Pour aller plus loin, on peut repenser la spatialisation, et considérer un routage dynamique et non plus statique de pistes de la composition acousmatique vers certaines enceintes. Il s'agit là d'utiliser la matrice de mixage entière, plutôt que sa diagonale uniquement, et on obtient donc de nouvelles possibilités de diffusion.

Les concepts de mixage matriciel et d'état d'acousmonium sont très liés, puisqu'une matrice $R(t)$, à t fixé, représente l'état complet de l'acousmonium (grâce à l'équivalence entre coefficients diagonaux et curseurs de la console

de projection). On peut ainsi introduire l'indice k pour représenter un état d'acousmonium, de sorte que la matrice R_k , de taille $M \times M$, soit l'unique matrice de mixage associée à cet état.

3.2.4. Représentations graphiques, transitions entre états

MIAM Spat va donc se baser sur des matrices R_k , dont la dimension atteint habituellement $M = 40$ ou $M = 50$; dessiner $R(t)$ sur un écran n'est donc pas envisageable pour une performance. Après plusieurs tentatives et études de représentations graphiques, et de nombreux tests par des spatialisateurs, il a été décidé qu'un état d'acousmonium devrait être associé à une surface en deux dimensions, dessinée sur l'écran tactile multipoint.

Ces surfaces auraient pu être de simples disques, s'inspirant par exemple des objets Nodes de Max/MSP [9]. De manière plus complexe, il aurait pu s'agir de « surfaces infinies » comme dans le travail de Momeni et Wessel [14], où l'on peut percevoir une surface en faisant varier une intensité de couleur selon une loi normale en deux dimensions.

Afin de maximiser la liberté de représentation, et les possibilités d'abstractions, ces surfaces seront dans MIAM Spat des polygones formés d'un nombre arbitraire de points, comme on peut le voir en figure 3.

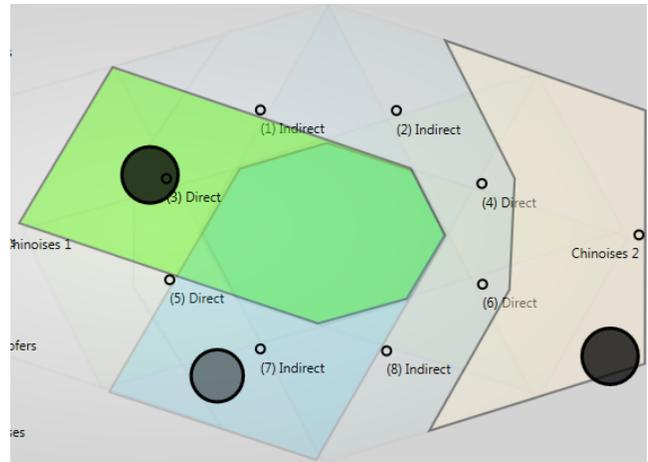


Figure 3. Capture d'écran de MIAM Spat, avec 3 états d'acousmonium « activés ».

Le rôle principal de MIAM Spat est donc de calculer des transitions sonores entre ces surfaces polygonales, à partir de données tactiles et MIDI ; les procédés employés sont décrits dans la section suivante.

4. RÉALISATION

4.1. Développement en C#

La réactivité étant un point critique, MIAM Spat n'est pas développé dans les environnements usuels de prototy-

page tels que Max [9] ou Processing [18]. Un langage de plus bas niveau, mais orienté-objet était nécessaire ; le C# s'est imposé par rapport au C++ grâce à ses fonctionnalités permettant un prototypage relativement aisé [12]. La dernière version de MIAM Spat est donc développée uniquement pour le système d'exploitation Windows. Il permet de plus d'accéder de manière simple et robuste aux données tactiles multipoint, à travers la Windows Application Programming Interface (API).

4.2. Interpolations entre états d'acousmonium

4.2.1. Préambule

La fonction d'interpolation, qui permet les transitions désirées entre différents états d'acousmonium, nécessite tout d'abord l'introduction de quelques objets mathématiques et géométriques liés aux surfaces polygonales. On notera également que les matrices de routage $R(t)$ et R_k ne comportent que des coefficients *normalisés*, et non pas des valeurs de volume en dB .

Il existe déjà de nombreuses solutions techniques pour les calculs de spatialisation, tels que l'algorithme Vector Base Amplitude Panning (par Pulkki [19]), ou le logiciel Space-Map [10]. Ces derniers ont cependant une approche de la spatialisation très différente de la spatialisation sur acousmonium : leur rôle est le déplacement précis de sources sonores dans l'espace, alors que MIAM Spat se focalise sur le concept d'états d'acousmonium. Les deux technologies citées précédemment sont de plus conçues pour des systèmes comportant des haut-parleurs identiques, localisés à des points précis de l'espace, avec un emplacement prévu pour le public. Ceci ne convient pas pour un acousmonium, les haut-parleurs étant placés différemment à presque chaque concert.

4.2.2. Poids d'interaction simple

Tout d'abord, chaque zone k possède un unique *centre d'interaction*, strictement à l'intérieur de son polygone, et qui sera nommé G_k . En figure 3, ces centres d'interaction sont les petits cercles noirs. À partir de ces centres, on définit un *poids d'interaction* entre un doigt et la surface k , noté w_k , dont les contraintes seront :

$$\begin{cases} w_k = 1 & \text{au centre d'interaction} \\ w_k = 0 & \text{sur le polygone ou à l'extérieur} \\ w_k \text{ est une grandeur continue du plan} \end{cases} \quad (2)$$

Pour expliciter le calcul de poids d'interaction, un polygone de S sommets sera subdivisé en S triangles, tel que présenté en figure 4 avec $S = 4$. On constate d'ores et déjà qu'un tel découpage va contraindre la forme globale du polygone et le placement du centre d'interaction : il faudra que les triangles soient toujours inclus dans le polygone.

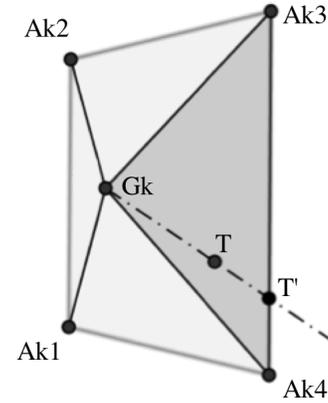


Figure 4. Projection T' du point d'interaction T sur la bordure du k^e polygone. G_k est le centre d'interactions du polygone défini par les points A_{k1}, \dots, A_{k4} .

Une fois le découpage du polygone réalisé, un doigt à l'intérieur (à la position notée T) appartient à une unique subdivision triangulaire. C'est dans cette subdivision que sera réalisée la projection sur l'arête du polygone, puis le calcul du poids d'interaction, par la formule suivante :

$$w_k = 1 - \frac{\| \overrightarrow{G_k T} \|}{\| \overrightarrow{G_k T'} \|} \quad (3)$$

Le poids d'interaction, une fois calculé pour chaque état d'acousmonium, pourra rentrer dans la fonction d'interpolation f , que l'on peut prendre arbitraire, telle qu'exprimée en équation 4.

Dans MIAM Spat, une fonction d'interpolation linéaire basique a été choisie. On peut donc donner une première formule d'interpolation complète, en équation 5, en gardant à l'esprit qu'elle sera complexifiée. À partir cette interpolation linéaire, le libre positionnement d'un centre d'interaction à l'intérieur de son polygone permettra au spatialisateur d'obtenir des dynamiques de transitions différentes.

$$R(t) = f(R_1, w_1, \dots, R_k, w_k, \dots) \quad (4)$$

$$R(t) = \frac{\sum_k R_k w_k}{\sum_k w_k} \quad (5)$$

4.2.3. Excitateur d'état d'acousmonium - Poids d'interaction multiples

Afin de tirer parti au mieux des fonctionnalités multitactiles disponibles, le concept d'*excitateur d'état d'acousmonium* a dû être introduit. Un excitateur est un objet graphique déplaçable à l'écran ; en figure 3, on a par exemple 3 excitateurs représentés par 3 disques noirs. Son rôle peut

être résumé comme l'activation du routage décrivant un état d'acousmonium, de manière analogue à l'excitation (l'activation) d'une corde de violon par un archet, tel qu'expliqué par Cadoz, Luciani et Florens [4].

Ces excitateurs sont déplacés par les doigts à la surface de l'écran multitactile, et permettront de contrôler les transitions entre états d'acousmonium. Leur nombre est défini librement par le spatialisateur, ainsi on désignera un excitateur quelconque par l'indice p . Pour une zone k , il faut alors calculer un poids d'interaction avec chaque excitateur p ; on obtient ainsi une matrice d'interaction composée des poids d'interaction w_{kp} . Ces poids seront intégrés à la fonction d'interpolation linéaire de la manière la plus basique possible, tel qu'exprimé en équation 6 :

$$R(t) = \sum_p \frac{\sum_k R_k w_{kp}}{\sum_k w_{kp}} \quad (6)$$

4.2.4. Distorsions logarithmiques

Le calcul présenté en section 4.2.2, qui était implémenté tel quel dans les premières versions de MIAM Spat, a montré un manque de finesse pour les excitations faibles. Pour augmenter la résolution des domaines de faibles volumes, plusieurs types de distorsions ont été testés, et c'est une courbe logarithmique qui a été retenue, telle qu'exprimée en équation 7 et illustrée en figure 4.2.4. La formule d'interpolation (en équation 8), reste toutefois quasiment identique.

$$w'_{kp} = \frac{\log(\alpha w_{kp} + 1)}{\log(\alpha + 1)} \quad \text{avec } 1 \leq \alpha \leq 10^6 \quad (7)$$

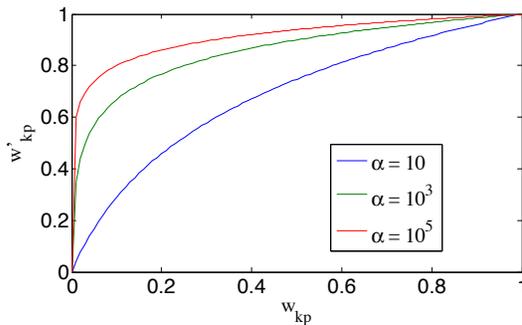


Figure 5. Fonction de distorsion paramétrable pour les poids d'interaction.

$$R(t) = \sum_p \frac{\sum_k R_k w'_{kp}}{\sum_k w'_{kp}} \quad (8)$$

4.3. Fonctionnalités supplémentaires

4.3.1. Pondération des excitateurs

Pour aller plus loin avec la notion d'excitation, un curseur de volume est disponible sur chaque excitateur. Ceci permet également de garder un lien avec la spatialisation sur console de mixage. Comme visible en figure 6, ceci complexifie quelque peu MIAM Spat, c'est pourquoi cette fonctionnalité est désactivable.

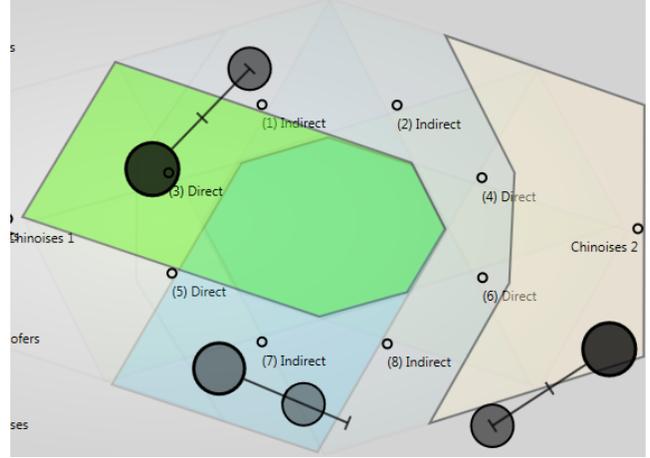


Figure 6. Capture d'écran de MIAM Spat. 3 états d'acousmonium sont excités, avec des intensités d'excitation différentes.

Soit v_p le volume normalisé pour l'excitateur p , qui correspond à la position normalisée du curseur de volume; ce volume subira lui aussi une distorsion, afin d'obtenir un comportement personnalisable (en équation 9). La formule d'interpolation est alors de nouveau modifiée pour prendre en compte (en équation 10).

$$v'_p = \frac{\log(\beta v_p + 1)}{\log(\beta + 1)} \quad \text{avec } 1 \leq \beta \leq 10^3 \quad (9)$$

$$R(t) = \sum_p v'_p \frac{\sum_k R_k w'_{kp}}{\sum_k w'_{kp}} \quad (10)$$

4.3.2. Contrôleurs MIDI - Excitateurs virtuels

Les données MIDI utilisables par MIAM Spat sont actuellement les informations de notes, d'« aftertouch » et de « control change ». Par des procédés sur lesquels nous ne nous étendrons pas ici, les données MIDI sont assignables à certains états d'acousmonium. Des *excitateurs virtuels* sont en fait gérés par le logiciel : par exemple, un excitateur virtuel peut être créé à la réception d'un message « note on », positionné virtuellement sur un état d'acousmonium, puis détruit à la réception du message « note off ». L'expression de la formule d'interpolation donnée en équation 10 n'est ainsi pas modifiée, seule la quantité d'excitateurs augmente.

4.4. Envoi des données de spatialisation

4.4.1. Interfaçage avec l'acousmonium

Après le calcul en temps-réel de $R(t)$, cette matrice est transmise au logiciel TotalMix par les moyens développés en section suivante. L'intégration de MIAM Spat à un acousmonium est décrite par la figure 7.

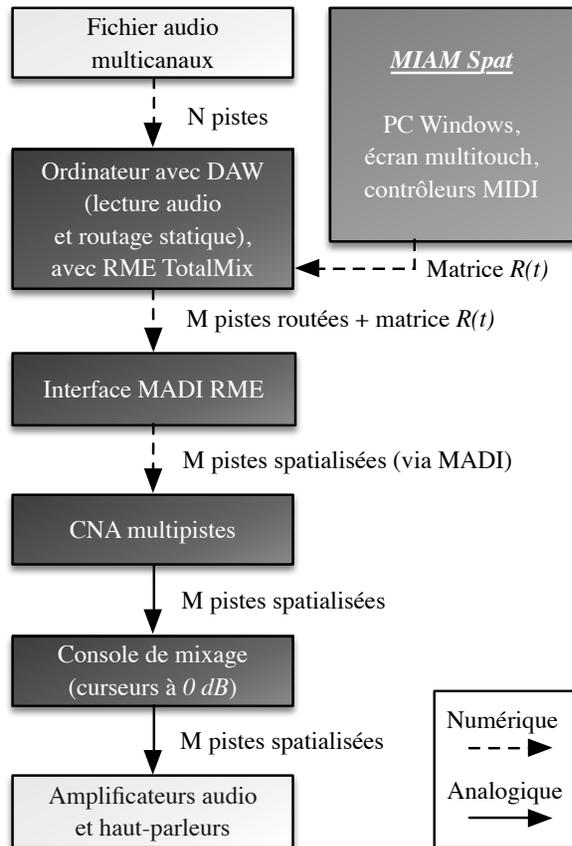


Figure 7. Interfaçage de MIAM Spat avec un acousmonium.

4.4.2. Contrôle de TotalMix

TotalMix est contrôlable par MIAM Spat en MIDI, mais ce protocole ne convient que pour des acousmoniums de petite taille. Le débit maximum de données est fixé à 3125 octets/s, ce qui ne permet pas d'envoyer des matrices de grande taille, à haute fréquence, sans saturer le canal de communication. Sans développer les calculs, on affirmera ici que MIAM Spat peut spatialiser en temps-réel par MIDI 16 haut-parleurs, pour un routage strictement diagonal.

La solution a été l'asservissement de TotalMix par le protocole Open Sound Control (OSC, [28]), qui offre une bande passante beaucoup plus grande. Raccorder MIAM Spat à un acousmonium devient alors très simple : il suffit de créer un

réseau local entre l'ordinateur lisant la composition, et l'ordinateur sur lequel fonctionne MIAM Spat. Ceci peut être réalisé par câble Ethernet, ou par Wi-Fi.

5. RÉSULTATS D'UTILISATION

5.1. Respect des contraintes

5.1.1. Latence

Une quantification précise de la latence est relativement difficile pour ce système, dont l'entrée est un geste surfacique et la sortie une onde acoustique reçue par l'oreille. À l'aide d'une caméra vidéo classique enregistrant à $60Hz$, la latence a pu être approximée à moins de $33ms$, mais une caméra à plus haute fréquence d'enregistrement sera la solution pour des valeurs plus précises.

On retiendra alors seulement que les délais nécessaires au traitement des données et à l'envoi de $R(t)$ n'ont pas été perçus par les différents testeurs de MIAM Spat. Ce résultat qualitatif est pour l'instant tout à fait satisfaisant, puisque la réactivité est suffisante pour ne pas gêner les artistes.

5.1.2. Intégration aux systèmes actuels

Comme évoqué en section 4.4.2, le système est facile à connecter à un acousmonium. Tout d'abord, il s'agit d'installer les interfaces tactiles, contrôleurs MIDI et ordinateur portable, de manière indépendante du reste de l'acousmonium. Une fois ce dernier prêt pour la spatialisation, il suffit de connecter un câble Ethernet entre deux ordinateurs, de mettre les curseurs de la console de mixage à $0dB$, et MIAM Spat est opérationnel. On pourra même spatialiser depuis un endroit quelconque d'une salle de concert, en Wi-Fi, avec une tablette tactile multipoint exploitée par Windows.

5.2. Nouveautés pour la performance de spatialisation

5.2.1. Au niveau du geste

Initialement, c'est l'interface qui impose une gestuelle au musicien. C'est le cas par exemple avec les instruments acoustiques et, dans le cas de la spatialisation, la console de mixage.

La surface multitactile est quant à elle paramétrable et personnalisable à souhait. Il est facilement possible d'adapter l'interface en fonction du type de geste et du type d'énergie gestuelle que l'on recherche. Dans ce cas-ci c'est donc le geste qui guide la forme et l'aspect que prendra l'interface et non l'interface qui impose une gestuelle. La surface tactile multipoint permet dès lors une plus grande diversité de gestes.

Elle offre aussi une échelle de vitesse de mouvement plus grande que la console de mixage et permet des transitions complexes, continues ou discontinues. Il est par exemple possible d'effectuer une transition entre deux groupes de

20 haut-parleurs et des rotations rapides sur une octophonie avec un seul doigt.

Notons enfin que la surface tactile incite au mouvement et à l'action tandis qu'une console peut parfois impressionner et paralyser le jeu de certains spatialisateurs. Lorsque les interprètes jouent sur un système qui leur est étranger, il n'est pas rare d'en voir certains déconcentrés par la complexité du système et déstabilisés par le trop grand nombre d'éléments à maîtriser.

5.2.2. Retours visuels et nouvelles représentations graphiques

Une interface peut fournir trois catégories de retours : sonore, visuel et haptique [6]. Comparons la console de mixage et la surface tactile sur ces trois catégories.

D'un point de vue sonore, il n'y a ici aucune différence entre les deux interfaces puisque le système de diffusion reste le même.

Sur le plan haptique, l'écran n'offre malheureusement pas encore de retours. Aucune sensation tactile ne vient informer le musicien des ses mouvements et de son action sur l'instrument.

En revanche, sur le plan visuel et ergonomique, les possibilités sont infinies. Il est possible pour chaque musicien de personnaliser le nombre de zones, l'état de la matrice RME correspondant, leur disposition et leur agencement sur l'écran ainsi que la couleur, la forme et le nom de chaque zone.

6. CONCLUSION

MIAM Spat répond donc bien aux problématiques actuelles de spatialisation de musiques acousmatiques. À travers l'utilisation d'interfaces tactiles et de contrôleurs MIDI, on peut affirmer que ce projet permet l'exploration de nouveaux gestes instrumentaux pour la spatialisation, tout en offrant des outils de représentation, de visualisation et d'abstraction.

Enfin, son intégration à un acousmonium est rapide et aisée, ce qui a déjà permis d'en faire de nombreux tests et démonstrations. Ceux-ci vont être renouvelés, afin de continuer les recherches de nouvelles fonctionnalités et possibilités gestuelles, améliorant encore l'expérience de spatialisation.

7. REMERCIEMENTS

Nous adressons nos remerciements à l'association Musiques & Recherches pour sa collaboration, et tout particulièrement à Annette Vande Gorne pour ses idées et prêts de moyens matériels, ainsi que Philippe Dao pour son aide avec l'acousmonium du GRM.

Enfin, nous tenons à remercier Sophie Delafontaine, Todor Todoroff et Robert Normandeau, pour leur temps et leurs conseils à l'occasion des présentations de l'interface MIAM Spat.

8. REFERENCES

- [1] Audio Engineering Society. « AES Recommended Practice for Digital Audio Engineering — Serial Multichannel Audio Digital Interface (MADI) », 2008.
- [2] Battier, M. « What the GRM brought to music : from musique concrete to acousmatic music », *Organized Sound*, vol. 12 (3), p. 189, 2007.
- [3] Bayle, F. « À Propos de l'Acousmonium », *Recherche Musicale au GRM*, vol. 397, p. 144–146, 1989.
- [4] Cadoz, C., A. Luciani, J.-L. Florens. « Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux, transducteurs gestuels rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental », *Revue d'acoustique*, vol. 4 (59), p. 279–292, 1981.
- [5] Cabaud, B., L. Pottier. « Le contrôle de la spatialisation multi-sources, nouvelles fonctionnalités dans Holophon version 2.2 », *9^e édition des Journées d'Informatique Musicale*, Marseille, France, p. 269–271, 2002.
- [6] Couturier, J.-M. « Utilisation avancée d'interfaces graphiques dans le contrôle gestuel de processus sonores », *Thèse de doctorat*, Université de la Méditerranée, Marseille, France, p. 10, 2004.
- [7] FLUX - IRCAM SPAT, site commercial. <http://www.scvwhitech.fr/html/flux/spat.html>
- [8] Groupe de Recherches Musicales. « L'Acousmonium », <http://www.inagrm.com/accueil/concerts/lacousmonium>, visité en décembre 2014.
- [9] Max, site commercial. <http://cycling74.com/products/max/>
- [10] Meyer Sound, site commercial. « SpaceMap Multichannel Surround Panning », visité en décembre 2014.
- [11] Møller, H. « Fundamentals of Binaural Technology », *Applied Acoustics*, vol. 36 (3), p. 171–218, 1992.
- [12] Microsoft Developer Network. « Why Use C# », <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa664274%28v=vs.71%29.aspx>, visité en novembre 2014.
- [13] MIDI Manufacturers Association. « Tech Specs & Info », <http://www.midi.org/techspecs/>, visité en novembre 2014.
- [14] Momeni, A., D. Wessel. « Characterizing and Controlling Musical Material Intuitively with Geometric Models », *Proceedings of the 2003 Conference on New Interfaces for Musical Expression*, Montréal, Canada, p. 54–62.

- [15] Musiques & Recherches. « Dispositifs Techniques », <http://www.musiques-recherches.be/fr/concerts/dispositions-techniques>, visité en novembre 2014.
- [16] Normandeau, R. « La spatialisation timbrale ou le médium, c'est l'espace », *Actes des Journées d'Informatique Musicale*, vol. 14, p. 1–3, 2012.
- [17] Peters, N., G. Marentakis, S. McAdams, « Current Technologies and Compositionnal Practices for Spatialization : A Qualitative and Quantitative Analysis », *Computer Music Journal*, vol. 35 (1), p. 10–27, 2011.
- [18] Processing, site officiel. <http://www.processing.org/>
- [19] Pullki, V. « Virtual Sound Source Positioning Using Vector Based Amplitude Panning », *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 45 (6), p. 456–466, 1997.
- [20] RME, site du fabricant. http://www.rme-audio.de/en_index.php
- [21] Robjohns, H. « Digital Interfacing », *Sound on Sound*, vol. 22 (4), p. 105, 2007.
- [22] Schumacher, M., J. Bresson, « Spatial Sound Synthesis in Computer-Aided Composition », *Organized Sound*, vol. 15 (3), p. 271–289, 2010.
- [23] Technology Quarterly. « Touching the future », *The Economist*, 4 septembre 2008.
- [24] Tutschku, H. « On the interpretation of multi-channel electroacoustic works on loudspeaker-orchestras : some thoughts on the GRM-acousmonium and BEAST », *Journal of Electroacoustic Music*, vol. 14, 2002.
- [25] University of Birmingham. « Studios, Facilities and Equipment », <http://www.birmingham.ac.uk/facilities/beat/studios/index.aspx>, visité en novembre 2014.
- [26] Vande Gorne, A. « L'interprétation spatiale. Essai de formalisation méthodologique », *Revue DEMéter*, Université de Lille-3, France, décembre 2002.
- [27] Vande Gorne, A. *Vous avez dit Acousmatique ?*. Musiques & Recherches, Ohain, Belgique, 1991.
- [28] Wright, M. « Open Sound Control - A New Protocol for Communicating with Sound Synthesizers », *Proceedings of the 1997 International Computer Music Conference*, p. 101–104.