TRAITEMENT SPATIAL DU SON PAR DÉCORRÉLATION DES SIGNAUX EN AMBISONIE D'ORDRE ÉLEVÉ

Paul Goutmann
Université Paris 8
Musidanse/CICM (EA1572)
MSH Paris Nord (USR 3258)
EUR ArTeC
paul@goutmann.net

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous rendons compte d'une exploration en cours autour des techniques de décorrélation appliquées aux signaux issus d'un encodage ambisonique d'ordre élevé, utilisant l'implémentation en langage FAUST de la bibliothèque *HOA Library* (*hoa.lib*) développée au CICM (2012-2015) et ses traitements regroupés dans la bibliothèque *abc.lib* depuis 2020. Notre recherche a pour double objectif de déployer les approches du traitement spatial du son et de faire émerger des représentations opératoires pour manipuler la décorrélation ambisonique. Après une mise en contexte et un rappel sur les techniques employées nous présenterons les essais d'implémentations que nous avons comparés sur le plan de l'écoute musicale. Puis, nous ferons état de nos travaux en cours sur les fonctions de *mapping* utilisées pour les esquisses d'interfaces que nous proposons. Ces expérimentations constituent une partie de notre projet doctoral réalisé au sein de l'EUR ArTeC et de l'EDESTA dans lequel nous appliquerons ce protocole d'analyse et développement à d'autres traitements.

1. INTRODUCTION

Dans les différentes approches de création musicale contemporaines, la dimension spatiale du son est une dimension composable essentielle [1] . L'avènement des technologies contribue à l'établissement de nouveaux paradigmes de représentations notamment dans le domaine de la spatialisation du son [8][9]. Les modèles de représentation de l'espace partagés par les communautés scientifiques et musiciennes sont dominés par les représentations euclidiennes. Au sein des outils de spatialisation du son, les représentations vont de pair avec une pensée de l'espace prenant la source ponctuelle comme objet fondamental [7] en lien avec les modèles d'appréhension de l'espace sonore communément partagés en psychoacoustique [2][13].

Depuis les années quatre-vingt-dix, plusieurs logiciels implémentant les modèles de mise en espace du son rendent accessibles des opérations sur la spatialisation dont la modulation du positionnement des sources est la plus communément utilisée. De nombreux travaux ont développé des approches de la spatialité complémentaires à ces techniques notamment par décorrélation des signaux [11], synthèse granulaire [12], diffusion spectrale [14] ou par synthèse sonore spatiale [3].

HOA Library [2] (pour *High Order Ambisonic*) développée au CICM entre 2012 et 2015 dans le cadre des projets du LabEx Arts-H2H est une bibliothèque dédiée au traitement spatial du son en ambisonie [17]. Les développeurs ont mis en place un certain nombre de traitements audionumériques dont la décorrélation des signaux dans la continuité des travaux de G.Kendall [11] et de H.Vaggione [19]. Ces traitements ont été validés aussi bien sur le plan perceptif [3] [7] que musical [18]. Aujourd'hui la bibliothèque est disponible en langage FAUST [4] et les traitements mis en œuvre avec l'objet *hoa.process~*, adaptation de l'objet *process~* pour le traitement multicanal, ont été implémentés au sein de la bibliothèque *abc.lib* [5] . Toutefois, il n'existe pas de représentation opératoire [6] dédiée pour la décorrélation au-delà des variables accessibles dans le patch *MaxMsp*.

La décorrélation des signaux en contexte ambisonique produit un résultat qui varie selon les paramètres entre le filtrage, le décalage spatial de l'image source, son élargissement et la production d'un champ sonore assimilable à un champ diffus. Un des intérêts sur le plan musical est la possibilité de passer d'une source mono, ponctuelle et localisable à un champ diffus avec la manipulation d'un seul paramètre : le facteur de diffusion.

1 . En empruntant cette conception à G.Carvalho dans [5], la spatialité est comprise ici comme inscrite dans l'espace-temps musical, système multidimensionnel dans lequel chaque dimension peut être composée.

2 . http ://hoalibrary.mshparisnord.fr/

3 . Dans sa thèse de doctorat, J.Colafrancesco propose une généralisation multicanal de la fonction d'intercorrélation en tant que descripteur de la diffusion du son et démontre la pertinence de la décorrélation des signaux dans le domaine des harmoniques sphériques ou circulaires.

4 . Langage fonctionnel pour le traitement du signal et la synthèse sonore développé au Grame.

5 . https ://github.com/alainbonardi/abclib

6 . Les représentations opératoires sont des outils de représentation (symbole, script, interface) façonnés, permettant d'agir sur le sonore et « d'atteindre un champ d'action morphologique.» [20]

Au regard de son potentiel musical, nous avons mené une exploration autour de ce traitement pour développer des interfaces. Ce travail nous a conduit à faire des propositions quant à l'implémentation du traitement ainsi qu'à mener un examen perceptif afin de définir des fonctions de *mapping* à appliquer à la sortie des interfaces dans l'objectif de rendre la manipulation des variables la plus opératoire possible. Nous souhaitons ainsi souligner l'importance de considérer les relations complexes entre le *design* d'interface, la conception de traitement audionumérique, la perception, la pensée musicale de la spatialité et l'espace composable qui en émerge [7]. Premièrement nous présenterons le traitement, son implémentation dans HOA, notre méthode d'écoute, le résultat perceptif et les propositions originales quant à son implémentation. Deuxièmement, nous ferons état de l'exploration menée autour des fonctions de *mapping*, puis nous présenterons les esquisses d'interface. Troisièmement, nous proposerons des pistes de réflexion quant au potentiel musical de ce traitement.

2. DÉCORRÉLATION EN AMBISONIE D'ORDRE ÉLEVÉ

Dans cette partie, nous rappelons brièvement quelques concepts liés à la synthèse de champ sonore par ambisonie et à la décorrélation des signaux avant de présenter le système étudié et la méthode d'écoute utilisée pour analyser le traitement. Après cela, nous ferons un point sur la perception du résultat sonore de la décorrélation puis nous présenterons notre proposition quant à l'implémentation.

Le format-B (M.Gerzon) et le modèle étendu aux ordres élevés (J.Daniel) sont un ensemble de techniques permettant l'enregistrement, la synthèse, la transformation et la restitution de champ sonore divisées en étapes d'encodage, d'optimisation et de décodage. Elles permettent de décrire ou de synthétiser le champ sonore aux limites d'une sphère entourant le point d'écoute ou de mesure. Le principe d'encodage est la description de la fonction sphérique pour la spatialisation 3D - ou circulaire pour la 2D - correspondant au champ sonore capté (ou à celui qu'il eût été possible de capter), en une somme pondérée de fonctions de références : les harmoniques sphériques ou circulaires ; autrement dit, des composantes spatiales. L'opération de décodage consiste à calculer en fonction d'un système de restitution - d'une matrice de décodage -, les jeux de gains envoyés aux haut-parleurs en fonction des situations spatiales décrites par la somme des harmoniques. L'originalité de la bibliothèque *HOA* réside dans l'accès laissé aux signaux associés aux harmoniques sphériques et dans les traitements audionumériques qui y sont introduits [4].

D'autre part, les termes corrélation et décorrélation réfèrent à un ensemble d'outils mathématiques saisi et adapté à différents usages dans plusieurs disciplines. En ce qui concerne les pratiques ayant un rapport au son, ces outils interviennent aussi bien en tant que traitement audionumérique pour une utilisation musicale [11][19][18] que pour l'analyse du caractère spatial du son et de sa perception [2][1][13].

2.1. Système étudié et méthode d'écoute

La décorrélation des signaux dans le formalisme ambisonique telle qu'elle est proposée dans *HOA Library* par P.Guillot, E.Paris et J.Colafrancesco intervient après l'étape d'encodage d'une source. Deux modes de décorrélation existent dans *HOA*, le mode *syn* qui encode une source mono en ambisonie et effectue la décorrélation ou le mode *fx* qui génère de la décorrélation sur des signaux issus d'un encodage ambisonique réalisé en amont comme nous pouvons le voir dans le patch d'aide de la librairie en figure 1.

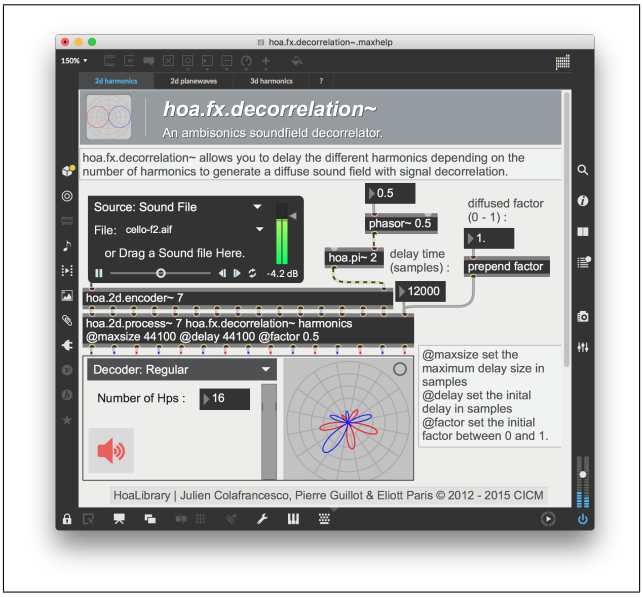


Figure 1. Patch d'aide de la décorrélation dans *HOA library.*

La décorrélation ambisonique peut être définie par le schéma en figure 2, chaque composante a un numéro i associé [8], $S[n]$ est le signal source, N l'ordre d'encodage, θ l'azimut de la source, $x_i[n]$ les signaux correspondant aux composantes spatiales, $y_i[n]$ les signaux correspondant aux composantes spatiales retardées, Δ_i le temps de retard en échantillon appliqué à chaque composante défini par :

$$\Delta_i = \begin{cases} d \times c_i, & \text{si } fa > 1 - c_i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

ou d est la fenêtre temporelle de décorrélation, fa le facteur de diffusion et avec c_i le coefficient attribué à chaque harmonique spatiale défini par :

$$c_i = \frac{i+1}{2N+1} \quad (2)$$

7 . L'espace composable est pris ici comme l'ensemble des variables sensibles que les espaces de travail fournissent aux compositeurs [16].

8 . Suivant une adaptation pour la 2D de l' *Ambisonic Channel Number* une composante de degré l et d'ordre azimutal m a un numéro i associé qui est $i = 2|m|$ si $m > 0$ et $i = 2|m| - 1$ si $m < 0$

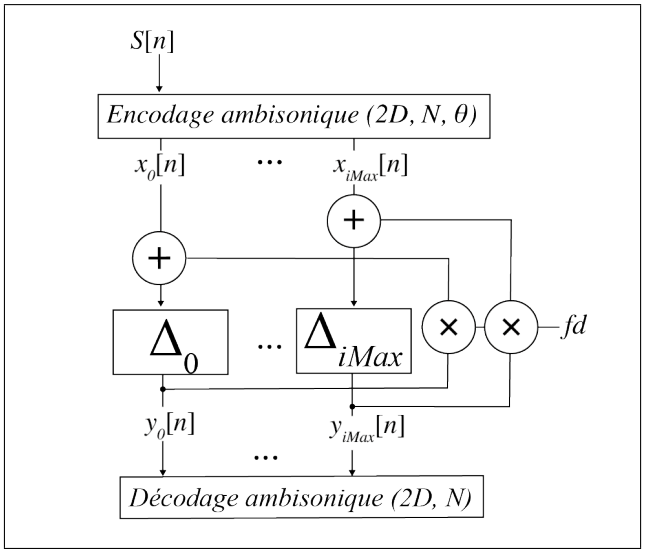


Figure 2. Schéma fonctionnel de la décorrélation dans *HOA library.*

L'utilisateur peut manipuler trois paramètres : le facteur de diffusion, un paramètre global (ici noté *fa*) pour contrôler le nombre de composantes retardées - plus le facteur augmente, plus le nombre de composantes retardées est élevé -, la taille de la fenêtre temporelle de décorrélation (*d*) et la réinjection (*fd*).

Dans cette situation, au-delà d'un seuil du facteur de diffusion, la première composante est retardée [9] , nous avons expérimenté une version pour laquelle elle ne l'est pas [10] .

Au regard du système de *gate* dans l'application du retard aux signaux, seuls deux états sont possibles. Soit le signal est retardé à valeur constante, soit il ne l'est pas. Lorsque le facteur de diffusion augmente progressivement (avec un pas de 0.01 par exemple), le nombre de composantes retardées augmente de manière discontinue et laisse entendre une progression « en escalier ». Pour remédier à cette discontinuité, nous avons expérimenté deux solutions en insérant le facteur de diffusion (*fa*) dans la définition du temps de retard et en supprimant le système de *gate*. Les résultats sont à l'évidence différents sur le plan perceptif et semblent pouvoir se justifier pour des utilisations musicales particulières.

Le temps de retard appliqué à chacun des signaux est distribué avec un incrément fixe à mesure que l'ordre azimutal et le degré de la composante augmentent. Nous avons à partir de là, expérimenté différents types de distribution que nous présenterons dans la section 2.3.

Pour mettre à l'épreuve et analyser le résultat de ce traitement, toutes les écoutes ont été réalisées au studio d'essai son de la Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord en octophonie, portion d'un dôme de 16 haut-parleurs (genelec 8030 A). Les tests ont été réalisés à l'ordre 3, pour une fréquence d'échantillonnage de 48kHz, alternant des échantillons musicaux de référence et un bruit impulsionnel sommé à un bruit blanc à amplitude constante. Le choix de cette source est motivé par ce que nous cherchons à entendre, à savoir les différences des attaques et le filtrage.

2.2. Seuils perceptifs et échelles temporelles

La décorrélation en ambisonie relève du principe de la ligne à retard et lui est en partie analogue sur le plan perceptif. Curtis Roads dans son ouvrage *Microsound* caractérise le comportement perceptif de la ligne à retard sur certaines échelles temporelles : altération spectrale (0 - 10 ms), décalage de l'image spatiale (10 ms - 50 ms), écho de tête de lecture (50 ms - 100 ms) et écho (> 100 ms). Bien que ce découpage soit communément partagé, les seuils entre ces caractéristiques sont plus des zones floues que des frontières bien définies : elles sont poreuses et mobiles. La caractérisation du résultat sonore émerge dans un processus alliant perception et écoute. Sur le plan de l'écoute musicale, dans une perspective opératoire, nous pouvons faire émerger autant de groupements caractéristiques que de « manettes » qui nous permettent d'y accéder [11] . Autrement dit, il existe autant de groupements caractéristiques qu'il nous est possible de discerner des continuités et discontinuités, similarités et différences, puis de les manipuler. Ainsi, le nuancier des échelles temporelles différentiables n'est pas limité à ces quatre catégories. Ces caractéristiques mises à l'épreuve d'un dispositif multicanal - avec un traitement par décorrélation ambisonique par exemple - ne sont que partiellement pertinentes. Comment caractériser une échelle temporelle sur laquelle nous pouvons écouter des mouvements, de l'altération spectrale et des degrés d'immersion comme c'est le cas pour une décorrélation ambisonique entre 0 et 10 ms ? Nous devrons élaborer, pour ce traitement (et pour les autres sur lesquels nous travaillerons) une géométrie de l'écoute spatiale qui réponde aux nécessités opératoires de la composition en situation multicanal [12] .

2.3. Approche originale : distribution des retards

Dans un premier temps, nous avons testé cinq types de distributions de temps de retard [13] puis nous avons élargi l'approche aux fonctions dites de *easing* et ajouté un mode permettant de définir la distribution manuellement.

9 . Par exemple, pour une fenêtre de décorrélation de 48000 échantillons, avec une fréquence d'échantillonnage à 48kHz et un encodage en ambisonie 2D à l'ordre 3 - donc avec 7 composantes - le retard appliqué à la première composante serait approximativement de 143 ms.

10 . Nous avons défini le coefficient de chaque composante non plus comme $\frac{i+1}{2N+1}$ mais $\frac{i}{2N}$

11 . Le terme de « manette » est employé ici pour référer à ce qui est manipulable, aux variables sensibles. Il est emprunté à H.Vaggione qui le définit dans [20] comme ce que le musicien " utilise pour atteindre un certain niveau opératoire et morphologique ".

12 . Dans la suite de cet article, nous garderons en transparence ces quatre zones caractéristiques de la ligne à retard afin de permettre aux lecteurs d'approcher ce que nous décrivons, tout en sachant que cela ne répond que partiellement au problème et qu'il nous faudra l'investir à l'avenir.

13 . $f(c_i x) = c_i$, $g(c_i) = c_i^2$, $h(c_i) = sin(c_i . \frac{\pi}{2})$, $i(c_i) = \frac{log(1+c_i)}{log(2)}$, $j(c_i) = \sqrt{(}c_i)$

Le code FAUST de cette implémentation est disponible sur le Github de la bibliothèque *abc.lib*.

Pour mettre à l'épreuve cette nouvelle dimension de la décorrélation, une investigation musicale sera nécessaire. En amont de cela, nous avons cherché à appréhender et décrire l'impact des différentes distributions dans leur évolution. Pour comparer les distributions de retard, nous avons procédé en deux temps. Premièrement, l'accroissement manuel de la fenêtre temporelle (d) afin de comparer les valeurs données par C.Roads, puis nous avons fait des écoutes comparatives avec accroissement linéaire en 10 secondes de la fenêtre temporelle entre les extremums de chaque plage de valeurs (les zones correspondantes aux seuils perceptifs définis par C.Roads). Nous avons répété ce type d'écoute avec un facteur de diffusion à 0.25, 0.5, 0.75 et 1. Nous avons complété cela par une recherche de résultats sonores équivalents pour les extremums des plages de valeurs selon les distributions de retard. Toutefois, l'absence de vocabulaire et d'outil de description rend complexe la caractérisation du résultat sonore. Les écoutes sont de surcroît complexifiées par le nombre de situations et le temps nécessaire au déroulement de chacune d'elles.

Pour chacune de ces distributions, les retards appliqués aux signaux sont différents et *de facto* le résultat sonore aussi. Si la fenêtre temporelle engendre des altérations spectrales, changer le type de distribution laissera entendre des différences d'altération spectrale, si la fenêtre temporelle engendre un décalage de l'image spatiale (pour reprendre l'expression de C.Roads), changer le type de distribution laissera entendre des différences de même nature, *etc.*.

Nous pouvons déjà entrevoir que sur le plan musical, suivant la fenêtre temporelle de décorrélation, les différentes distributions n'auront pas le même impact et de fait n'auront potentiellement pas la même fonction. L'exploration des différentes distributions semble alors justifiée pour une utilisation musicale qu'il s'agisse du domaine fréquentiel ou du domaine temporel, toujours en relation profonde avec le caractère spatial du son.

Pour donner un exemple plus précis, nous illustrons en figure 3 la comparaison des retards appliqués aux signaux post-encodage à l'ordre 3 en 2D (7 composantes) avec les cinq types de distribution pour une fenêtre temporelle d'une seconde. La dernière composante ($Y_{3,3}$), ici représentée avec un segment gris à l'extrémité droite de la figure 3, sera retardée d'une seconde et toutes les autres auront des retards proportionnels à leur coefficient. En fonction des retards qu'engendre la décorrélation sur cette fenêtre temporelle, nous pouvons considérer que les différentes distributions forment des figures rythmiques. Pour donner un ordre d'idée, avec une noire à 60 bpm, la croche dure 500 ms, la double 250 ms, et la triple 125 ms.

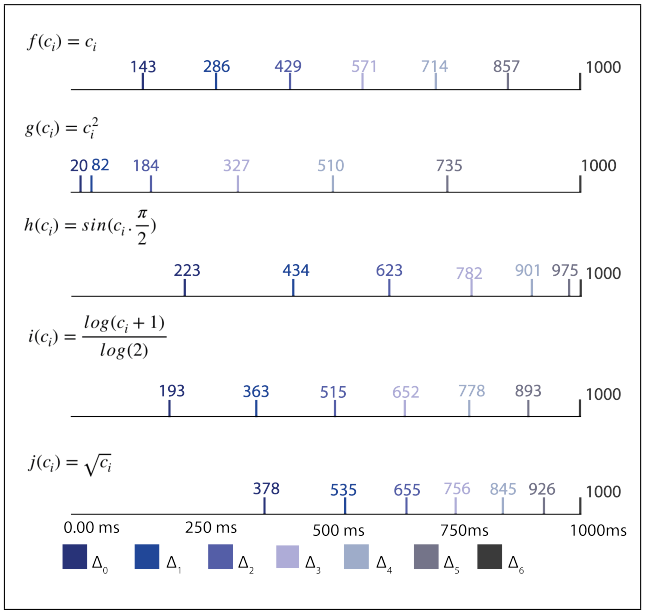


Figure 3. Temps de retard appliqués aux signaux en fonction des types de distribution (ordre 3 en 2D avec *d*=1000 ms).

3. VERS DES REPRÉSENTATIONS OPÉRATOIRES

Penser des représentations pour le traitement spatial du son nécessite de savoir ce que nous pouvons manipuler et comment nous percevons le résultat de ces manipulations. Au regard de la loi de Fechner-Weber, la réponse du système sensoriel à la variation d'un stimulus n'est pas nécessairement linéaire [6]. Ainsi, il est important d'appréhender les fonctions de *mapping* à appliquer à la sortie des interfaces pour manipuler les variables du traitement et donner le maximum de maniabilité aux utilisateurs.

Dans ce contexte, nous avons entamé une exploration élémentaire du résultat sonore de la décorrélation en ambisonie afin d'établir les échelles en jeu dans l'évolution de la variable temporelle. Après un point les fonctions de *mapping* testées, nous ferons état de deux esquisses d'interface.

3.1. Fonctions de mapping

Les plages temporelles correspondant aux caractéristiques proposées par C.Roads n'ont pas la même durée : la plage temporelle correspondant aux altérations spectrales est de 10 ms, 40 ms pour le décalage de l'image spatiale, 60 ms pour l'écho de tête de lecture et potentiellement une infinité pour l'écho. Suivant le type de distribution et l'ordre utilisé pour l'encodage ambisonique, les seuils correspondant aux changements perceptifs ne sont pas les mêmes. Toutefois, il s'agit d'une approximation assez pertinente pour qu'elle puisse nous servir de base au déploiement de notre investigation.

L'inégalité des plages de valeurs associées aux différentes caractéristiques rend difficilement accessibles les

opérations précises. à défaut d'avoir défini une fonction de *mapping* qui permettrait de manipuler la fenêtre temporelle en ayant une impression linéaire de variation sur toute sa course, nous avons cherché à élargir les portions correspondant aux deux premières plages à l'aide de fonctions mathématiques bien définies. Autrement dit, nous avons expérimenté différentes façons de présenter la répartition des échelles temporelles sur des interfaces (*slider* et PLF - voir figure 5 -).

Pour déterminer la fonction de *mapping* à appliquer à la manipulation de la fenêtre temporelle, nous avons dans un premier temps cherché à évaluer les seuils différentiels sur l'intégralité de la course de la variable entre 0 et 1 seconde avec un pas à la milliseconde. Dans la mesure où le résultat sonore du traitement dépend de l'implémentation ainsi que du type de distribution des retards, nous avons abandonné cette méthode pour le moment.

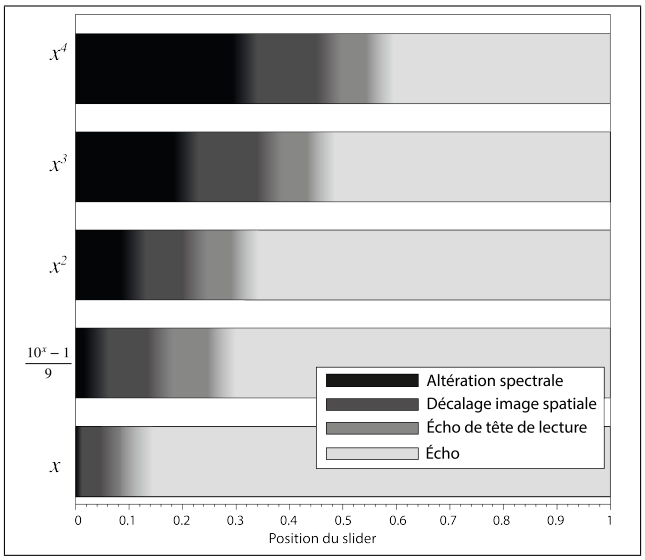


Figure 4. Distribution des caractéristiques sur un axe pour une manipulation de ($d \in [0, 1000]$).

La figure 4 représente des glissières horizontales (*slider*) utilisées pour manipuler la fenêtre temporelle d comprise entre 0 ms et 1000 ms avec une distribution linéaire des retards. Les quatre teintes définissent les zones des glissières qui correspondent aux caractéristiques des échelles temporelles (altération spectrale, décalage de l'image spatiale, écho de tête de lecture, écho) en utilisant quatre fonctions de *mapping* et une référence en première ligne (*mapping* linéaire). Au regard des différentes expérimentations, nous ne pouvons pas conclure sur une solution optimale. Le choix de la fonction de *mapping* nous semble être dépendant des envies de l'utilisateur. Par exemple, si un utilisateur cherche à travailler plus finement le filtrage ayant un caractère spatial alors qu'un autre préférera travailler les figures rythmico-spatiales des échos, les fonctions de *mapping* à appliquer ne seront pas les mêmes. Ainsi, nous pensons laisser le choix aux utilisateurs de la fonction de *mapping* à appliquer à l'interface.

3.2. Esquisses d'interface

Afin d'établir des interfaces pour la manipulation de la décorrélation, nous avons avancé dans deux directions. D'une part, la représentation des trois paramètres (*fa, d, fd*) dans le temps. D'autre part, la mise en place d'une interface pour manipuler le traitement hors temps. En l'occurrence la répartition des temps de retards appliqués aux composantes spatiales. Ces deux esquisses sont réalisées en Javascript 1.6 dans l'objet *JSUI* de *MaxMsp*.

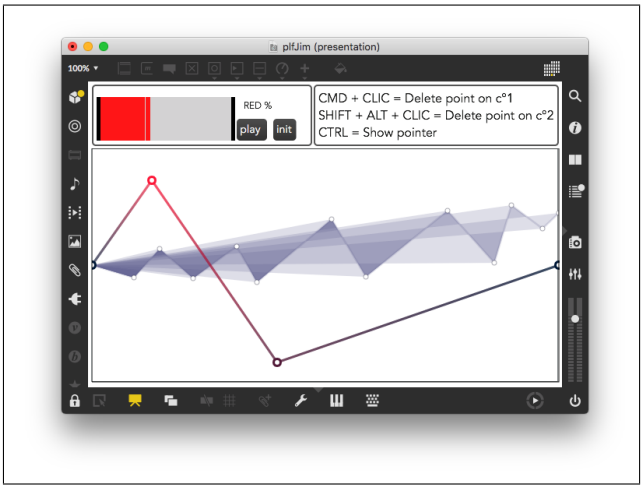


Figure 5. Esquisse d'interface n°1 (*PLF*).

La première interface nommée *PLF* (*piecewise linear function*) s'inspire des lignes d'automations que nous trouvons dans les *DAW* et de l'objet *mc.function* dans *MaxMsp*. Elle permet de décrire le comportement de trois paramètres au cours du temps (axe des abscisses). La figure 5 présente l'interface avec ses trois degrés de liberté utilisable pour le contrôle des paramètres choisis par l'utilisateur : la position des points sur la première courbe, leur niveau de rouge et la position des points sur la deuxième courbe. Nous avons trouvé que laisser le tracé à partir de l'origine pour la deuxième courbe permettait d'accentuer la différenciation entre la première courbe et la deuxième. Les différentes actions (insérer un point, modifier la position d'un point, affichage d'un pointeur) se commandent avec les touches du clavier. Un exemple d'utilisation peut être le mapping suivant : la position des points sur la première courbe utilisée pour contrôler la durée maximale de retard, la position des points sur la deuxième courbe pour le facteur de diffusion et le niveau de rouge pour le *feedback*.

La deuxième interface nommée *DTD* (*delay time distribution*) en figure 6, permet de définir le type de distribution des retards appliqués aux composantes spatiales soit avec différentes fonctions soit manuellement en manipulant l'interface. Les composantes retardées sont affichées en rouge et celles auxquelles aucun retard n'est appliqué sont affichées en gris.

Il est intéressant de noter que ces deux représentations opératoires ne représentent pas l'espace bien que toutes les opérations qu'elles nous permettent de faire engendrent de la spatialité.

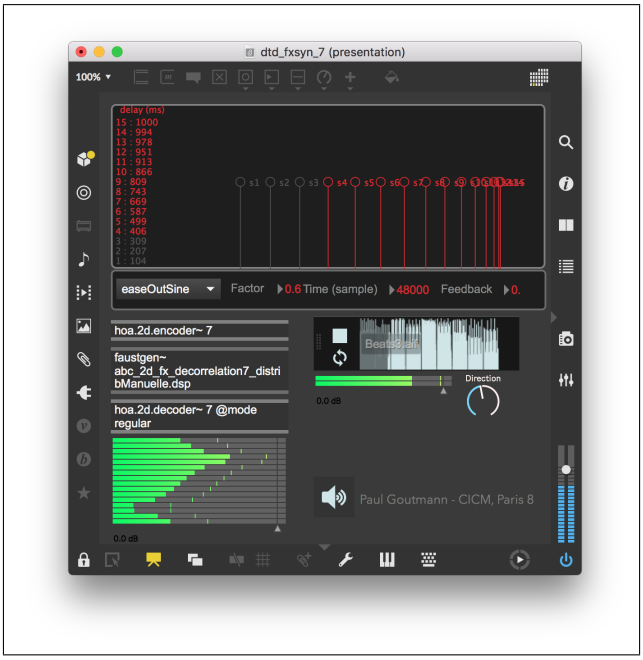


Figure 6. Esquisse d'interface n°2 (*DTD*).

4. DIMENSIONS COMPOSABLES : "LES MANETTES"

Comme toute proposition organologique, l'établissement de représentation en relation avec le façonnage de traitement audionumérique offre de nouvelles « manettes » aux compositeurs et compositrices. Concevoir des traitements et des interfaces amène à construire son espace composable. Les variables de la décorrélation doivent être pensées comme telles. Dans cette partie nous esquisserons des pistes balbutiantes pour une pensée musicale de la décorrélation ambisonique.

4.1. Facteur de diffusion

Le facteur de diffusion est un paramètre global permettant de passer d'une source ponctuelle localisable à une source diffuse et immersive. Cette dimension a été largement explorée par Anne Sèdes sur le plan musical [18]. L'opposition entre source ponctuelle et source diffuse se retrouve bien au-delà de la décorrélation. Nous pouvons illustrer cela en empruntant à Kevin Gohon [10] la mise en perspective du compositeur Pierre Boulez dans *Répons* (1981) qui compose dans un espace géométrique à deux dimensions les trajectoires de sources ponctuelles directes, dans un esprit de précision formelle et le *Prometeo* (1984) de Luigi Nono qui cherche dans la pluralité et l'hétérogénéité des voix venant de toutes directions, la multiplicité confuse des champs acoustiques diffus, non assimilables à des sources ponctuelles.

4.2. Fenêtre temporelle et type de distribution

Comme nous l'avons précisé dans la section 3, le type de distribution des retards permet d'opérer sur divers régimes du traitement suivant la taille de fenêtre temporelle utilisée. D'opérations spectro-spatiales aux opérations rythmico-spatiales - avec tout un nuancier entre ces deux extrêmes -, la fenêtre temporelle et le type de distribution, deux dimensions intimement liées, donnent accès à un terrain nécessitant d'être exploré musicalement. Un des avantages de ces deux dimensions est qu'à un changement d'échelle près, ce que nous manipulons n'est plus sur le même plan. Avec une fenêtre inférieure à 10 ms, le changement de distribution produira des différences de filtrage qui impacteront à la fois le spectre de la source et sa spatialité. Manipuler la première composante (l'harmonique spatiale 0) ou la dernière n'aura pas le même impact. Avec une fenêtre comprise entre 50 ms et 100 ms, la décorrélation des attaques engendrera à la fois des différences timbrales et spatiales.

4.3. *Feedback*

Le *feedback* est largement exploré musicalement comme en témoignent entre autres les pièces d'Éliane Radigue composées dans les années 60-70 [14] . Dans un contexte de décorrélation des signaux en ambisonie, la réinjection demande à être pensée comme une opération assemblant des modifications spectrales, temporelles et spatiales. Cette variable nous permet de passer du discontinu au continu, du rythme au caractère grave-aigu, d'amplifier l'effet de filtrage en peigne sur certaines échelles temporelles allant jusqu'à modifier en profondeur la réponse perceptive du traitement.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article nous avons présenté un processus de recherche associant le développement de traitement audionumérique, le *design* d'interface, la perception et la pensée musicale dans le cadre de l'étude du cas de la décorrélation en ambisonie d'ordre élevé comme un exemple de traitement spatial du son. Nous souhaitons ainsi mettre en lumière un terrain d'exploration fertile autour des représentations pour le traitement spatial du son dans l'objectif d'enrichir la pensée de la spatialité en musique. Après une analyse de la décorrélation dans *HOA*, nous avons proposé des modifications et des ajouts : les différentes distributions de retard. Afin de mettre en place des interfaces manipulables pour la décorrélation, nous avons cherché à définir les fonctions de *mapping* qui rendraient le plus maniables possible les interfaces. Deux esquisses découlent de cette exploration. Pour finir, nous avons amorcé des pistes de réflexion sur les manières dont les paramètres de la décorrélation peuvent être utilisés et pensés dans des créations musicales. Dans les mois à venir, nous continuerons ces explorations au travers de mises à l'épreuve dans des compositions personnelles. Nous continuerons à développer le traitement notamment en ajou-

14 . Notamment *Jouet électronique* (1967), *Accroméga* (1968), *Elemental I* (1968), *In memoriam — Ostinato* (1969), $\Sigma = a = b = a + b$ (1969), *Usral* (1969), *Omnht* (1970), *La noire = 40* (1970), *Vice-Versa, etc...* (1970), *Stress Osaka* (1970).

tant une matrice de ré-injection ainsi qu'un système de rétroaction vers la distribution des paramètres à partir de l'analyse du résultat spatial. Les investigations autour des deux interfaces nécessitent d'être approfondies. Les fonctions de *mapping* applicables à une glissière ou à *PLF* devraient être complétées par d'autres fonctions et notamment celle correspondant à l'accroissement linéaire de sensation des différences. Nous souhaitons ajouter à *DTD* la possibilité d'enregistrer et rappeler différentes distributions qui ont été faites par l'utilisateur.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'EUR ArTeC financée par l'ANR au titre du PIA ANR-17-EURE-0008 et est accueilli à la Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord.

7. REFERENCES

[1] Beranek, L., *Concert and Opera Halls : How they sound ?* Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 1996.

[2] Blaeurt, J. *Spatial Hearing : The Psychophysics of Human Sound Localization*. MIT Press, Cambridge, Mass, 1983.

[3] Bonardi, A., "Composer l'espace sonore", *Revue Francophone d'Informatique Musicale*, Saint-Denis, France, 2020.

[4] Bonardi, A., Guillot, P. "Concevoir des traitements sonores ambisoniques en 2D et en 3D - l'exemple de Pianotronics 2", *Actes des Journées d'Informatique Musicale*, Montréal, Canada, 2015.

[5] Carvalho, G., "Multidimensionnalité de l'espace-temps musical" dans *Espaces Sonores : actes de recherches*, Sèdes A., Editions Musicales Transatlantiques, Paris, 2003.

[6] Castellengo, M., *écoute musicale et acoustique*, Eyrolles, 2015.

[7] Colafrancesco, J., *Spatialisation de sources auditives étendues : applications musicales avec la bibliothèque HOA sous la direction de Anne Sédès*, Paris 8, 2015.

[8] Fober, D., Bresson, J., Couprie, P., Geslin, Y., "Les nouveaux espaces de la notation musicale" *Groupe de travail AFIM JIM 2015*, Montréal, Canada, 2015.

[9] Garcia, J., Carpentier, T., Bresson, J., "Interactive-Compositional Authoring of Sound Spatialisation", *Journal of New Music Research* Taylor, 2017.

[10] Gohon, K., *Critique du discours musical et émergence d'une pensée "mixte" dans les œuvres électroacoustiques de Pierre Boulez et Luigi Nono*, sous la direction de Antoine Bonnet, Rennes 2, 2018.

[11] Kendall, G. S., "The Decorrelation of Audio Signals and Its Impact on Spatial Imagery", *Computer Music Journal*, MIT Press, USA, 1995.

[12] Kim-Boyle, D. "Spectral and Granular Spatialization with Boids", *ICMC*, Michigan Publishing, 2006.

[13] Moore, B., *An Introduction to the Psychology of Hearing*, Sixth edition, Brill, 2013.

[14] Pihlajamäki, T., Santala, O., Pulkki, V., "Synthesis of Spatially Extended Virtual Sources with Time-Frequency Decomposition of Mono Signal", JAES Volume 62 Issue 7/8 pp. 467-484 ; July 2014.

[15] Roads, C., *Microsound*. MIT Press, Cambridge, Mass, 2001.

[16] Sèdes, A., "La notion d'appareil empruntée à W. Benjamin, appliquée à la création musicale en studio électroacoustique, et à sa diffusion", Appareil, vol. 11, 2013.

[17] Sèdes, A., Guillot, P., Paris, E., "The HOA library, review and prospects", *Proceedings ICMC/SMC*, Athènes, Grèce, 2014.

[18] Sèdes, A., "Approche musicale de la dé-corrélation microtemporelle dans la bibliothèque HOA", *Actes des Journées d'Informatique Musicale*, Montréal, Canada, 2015.

[19] Vaggione, H., "Décorrélation microtemporelle, morphologies et figurations spatiales", *Actes des Journées d'Informatique Musicale*, Marseille, France, 2002.

[20] Vaggione, H., "Représentations musicales numériques : temporalités, objets, contextes", dans Manières de faire des sons, Soulez, A., Vaggione, H., L'Harmattan, Paris, 2010.