

ÉMERGENCES : DE LA POÏÉSIS AU PROTOTYPE

Paul Goutmann
CICM MUSIDANSE EA1572
EUR ArTeC
paul@goutmann.net

RÉSUMÉ

Cet article s'appuie sur l'aspect poétique d'*Émergences*, pièce électroacoustique en ambisonie 3D composée dans le cadre d'une recherche sur les interfaces pour le traitement spatial du son afin de souligner les implications technologiques et musicales de cette recherche-création. L'auteur fait ainsi état d'une pratique de compositeur-chercheur à partir de la troisième itération d'une boucle mêlant développements logiciels et compositions musicales.

1. INTRODUCTION

L'espace est une dimension fondamentale de la pensée musicale contemporaine notamment dans la pratique des musiques électroacoustique, mixte et électronique et ne peut être réduite à la spatialisation de sources ponctuelles [25][1][29][9]. Les modèles de spatialisation du son partagés par les communautés scientifiques et musicales sont dominés par des représentations euclidiennes de l'espace prenant la source ponctuelle comme objet fondamental [7]. Cette approche se retrouve par exemple dans le répertoire avec une pièce comme *Répons* de Pierre Boulez. À l'opposé, le *Prometeo* de Luigi Nono cherche dans la pluralité des voix, la profusion et l'indétermination des positions : le champ diffus [26][11]. 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 et la modélisation acoustique de salle sont les plus communément utilisées [6][2][20][10][18][19]¹. Toutefois, de nombreux travaux ont développé des approches alternatives aux techniques de spatialisation orientées sources ponctuelles [16][17][32][22][4]. Les traitements spatiaux par granulation ou par décorrélation microtemporelle héritant des approches de Iannis Xenakis et d'Horacio Vaggione en sont des exemples. En lien avec de nombreuses années de recherche et de création sur la spatialité du son au CICM, *HOALibrary* développée dans le cadre des projets du LabEx Arts-H2H a contribué au développement de ces approches et à leur prise en main par les musicien.ne.s [24].

Depuis 2020, nous menons des recherches dans le cadre de notre doctorat sur la thématique des interfaces

pour le traitement spatial du son avec une méthode de recherche-création centrée sur une boucle itérative de productions musicales et logicielles. Dans cet article, nous prenons le point de vue du compositeur électroacoustique et faisons état du pan « création » de cette recherche².

En partant des travaux du projet *HOALibrary*, d'abord éprouvés sur le plan sensible, nous avons esquissé des prototypes d'interfaces graphiques constituant notre terrain expérimental de thèse [12]. Mises à l'épreuve par notre pratique de composition, nos interfaces graphiques - jusqu'alors pensées comme objet d'étude central - se sont retrouvées projetées en périphérie de notre recherche. Au cours du processus, nous avons d'abord rencontré des difficultés pour les utiliser musicalement.

Afin de dépasser cette difficulté, nous avons d'une part changé d'échelle et considéré les interactions avec la spatialité du son au sens large, notamment au niveau du code DSP [13] ce qui nous a conduit à élargir notre définition des interfaces. Nous considérons maintenant les interfaces comme l'ensemble des points de contact entre deux systèmes complexes qui régissent (conditionnent, structurent) leurs échanges. Dans notre cas, l'interface entre la spatialité du son et le compositeur est feuilletée, comprenant notamment la partie GUI, mais aussi la partie DSP et la partie *hardware* pour interagir avec le dispositif.

D'autre part, nous avons adapté nos manières de les utiliser pour en découvrir le potentiel. Ce n'est qu'à partir du moment où nous avons cherché à les faire devenir des *instruments* que nous avons pu composer avec. En somme, cette boucle expérimentale nous a conduit à façonner notre *organon* : notre *espace composable*³.

Dans cet article, nous nous appuyons sur l'aspect poétique d'*Émergences*⁴, la troisième itération musicale de notre boucle expérimentale, pour souligner les implications musicales et technologiques de notre recherche-création. Ainsi, nous ouvrons le moteur de notre atelier, « comprendre pour faire et faire pour comprendre »⁵,

2. Nous avons écrit un premier article concernant les prototypes d'interface pour le traitement spatial aux JIM 2021, puis un article sur l'implémentation en Faust de deux traitements spatiaux dans le cadre de la conférence SMC 2022.

3. Le terme *organon* vient du grec ancien, signifiant « instrument de travail », « de musique » et « organe du corps ». L'espace composable est un instrument, c'est l'ensemble des variables sensibles que nos espaces de travail fournissent [27].

4. Version binaural de la pièce : <https://hal.science/hal-04084391>

5. Formule utilisée dans le séminaire « Composition et Re-

1. Ainsi que les GRM Tools, les plug-in IEM et de nombreux autres.

prenons un de nos *prototypes*⁶ afin de montrer ce que cette double posture a déplacé de (et éclairé sur) notre objet d'étude. Dans la première partie, nous présentons le dispositif technique, nous exposons dans un premier temps notre écosystème logiciel, puis les trois éléments principaux du moteur audio utilisé dans (et construit pour) cette pièce. Dans la deuxième partie, nous présentons les idées musicales propres à l'écriture de la spatialité dans cette pièce, nous exposons les trois morphologies spatiales travaillées : texture spatiale, enveloppe d'espace et strate.

2. ASPECT POÏÉTIQUE

Dans cette section, nous présentons les éléments techniques de notre environnement de composition à différentes échelles : le matériau sonore initial (fichiers audio), l'écosystème logiciel, les manières de faire du montage ainsi que les traitements audionumériques utilisés.

2.1. Sources, écosystème logiciel et montage

Notre matériau initial est composé de trois fichiers audio mono :

1. une boucle réalisée à partir d'un son impulsionnel répété ;
2. une séquence de douze secondes composée comportant des échantillons de voix ralentis et des sons de synthèse ;
3. un son de vingt-et-une secondes issu d'un synthétiseur *Pro 2* du constructeur *Dave Smith*.

Ces trois matières sonores sont travaillées dans l'ordre énoncé sans se superposer, à l'exception de la dernière partie de la pièce dans laquelle les matières 1 et 3 se superposent.

Nous utilisons principalement une banque de filtres résonants sur les fichiers mono, du *time stretching*, la ring modulation et la décorrélation dans le domaine ambisonique. Nous décrirons plus largement ces deux traitements dans les sous-parties 2.2 et 2.3

Le montage et le mixage sont faits dans *Reaper* dans le domaine ambisonique⁷. Les parties *DSP* et décodage ambisonique sont faites avec *Max*. Les flux audios transitent entre les logiciels par des bus internes grâce à la fonction *loopback* de l'interface audio réinjectant les sorties vers les entrées de l'interface audio (voir figure 1).

Pour des raisons compositionnelles précisées dans la partie 2.2 et 3.3, nous considérons l'espace global avec

cherche »d' Anne Sèdes en 2020 référant à [21].

6. La notion de prototype fait ici référence à la fixation (composée) d'un travail en cours, une manière de rendre sensible. Pour illustrer cette notion, nous pouvons reprendre les mots d'E.During : « 'Prototype' désigne moins, en effet, une catégorie spéciale d'objets qu'un nouveau régime de production. [...] La question n'est plus alors d'éviter à tout prix de fixer quelque chose [...]. Au contraire, tout le problème est de savoir 'comment s'arrêter'. Comment donner à un projet la consistance et la solidité qui le rendra lisible ? » [8].

7. En l'occurrence dans le domaine des harmoniques circulaires (voir sous-section 2.2).

une superposition de trois plans 2D respectivement d'ambisonie d'ordres 3, 2 et 1. Les fichiers audios sur lesquels nous faisons le montage comportent 15 canaux (7-5-3). Une sommation des différents fichiers est envoyée aux décodeurs ambisoniques pour avoir un *playback*.

Pour le rendu de la pièce, nous décodons chaque plan pour un système de restitution supérieur ou égal à une situation dite régulière, puis encodons à l'ordre 3 en 3D chaque signal associé à un haut-parleur comme une nouvelle source puis stockons les 16 canaux ambisoniques (dans l'ordre suivant l'ACN et avec la normalisation SN3D). Ceci afin de pouvoir aisément décoder la pièce pour des systèmes de diffusion 3D différents de celui sur lequel nous avons composé⁸.

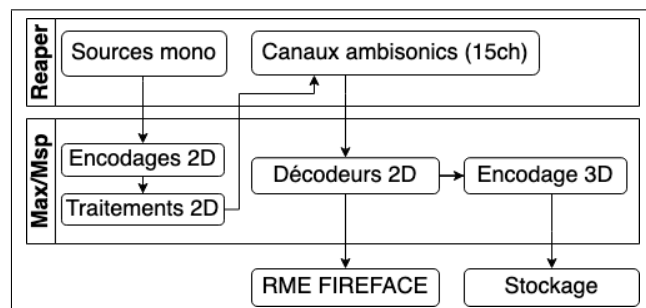


Figure 1. Dispositif logiciel utilisé pour la composition d'*Émergences*

2.2. Layer Based Ambisonics Processes - LBAmP

L'expression *Layer Based Ambisonics Processes* (LBAmP) fait ici référence à une superposition de plans de traitement en ambisonie 2D. Dans cette partie, nous expliquons l'origine de cette approche de l'espace global comme superposition de strates et sa mise en œuvre dans *Émergences*. Ni l'ambisonie, ni les traitements en ambisonie ne sont l'objet principal de cet article, toutefois nous donnons un aperçu très synthétique de ces modèles et invitons les lecteurs curieux à se référer à [14][33].

2.2.1. Format-B et HOA

Le format-B proposé par M.Gerzon et l'ambisonie d'ordre élevé par J.Daniel sont un ensemble de techniques pour l'enregistrement, la synthèse, le traitement et la reproduction de champs sonores. Ces techniques sont basées sur trois étapes : l'encodage, l'optimisation et le décodage. L'encodage consiste en la description de la fonction sphérique (ou circulaire) du champ sonore capté (ou qu'il eût été possible de capté dans le cas d'une synthèse) avec une somme pondérée de fonctions de références appelées harmoniques sphériques (ou circulaires). Le nombre d'harmoniques utilisées pour la décomposition de la fonction associée au champ sonore dépend de l'ordre ambisonique. Plus le nombre d'harmoniques est grand, plus la précision

8. La pièce a été composée au studio d'essai son de la MSH Paris Nord.

de la description sera grande. En 2D, l'encodage utilise $2(N + 1)$ harmoniques et en 3D $(N + 1)^2$ harmoniques, où N est l'ordre. L'étape de décodage consiste à projeter la fonction sphérique (ou circulaire) correspondant au champ sonore sur le dispositif de haut-parleur. Autrement dit, calculer le jeu de gain à appliquer aux haut-parleurs en fonction de la fonction sphérique et du système de diffusion

2.2.2. Traitement en ambisonie

HOALibrary a rendu accessibles les opérations sur les signaux ambisoniques et a introduit des traitements bien connus des compositeurs électroacoustiques dans le modèle ambisonique. Appliquer des traitements en ambisonie dans cet héritage consiste à appliquer les traitements numériques directement sur les harmoniques spatiales, c'est-à-dire sur les signaux entre l'étape d'encodage et de décodage. Depuis l'obsolescence de la version *Pd* de la bibliothèque et le portage des traitements en langage Faust, cette approche se retrouve dans *abc.lib* et *hoa.lib* [5][13].

2.2.3. LBAmP

Avant d'avoir implémenté les versions 3D des traitements ambisoniques, nous approchions les traitements 3D comme une superposition de traitements 2D prenant autant de plans que le système de diffusion comporte de couronnes de haut-parleurs⁹.

Dans *Émergences*, nous utilisons cette approche avec la décorrélation et la ring modulation en ambisonie¹⁰. Pour chacun de ces deux traitements, le processus est le même : autant d'encodeurs 2D, de chaînes de traitements puis de décodeurs 2D que de couronnes de haut-parleurs. La figure 2 représente un exemple de chaîne de traitements pour trois couronnes de haut-parleurs superposées. Chaque traitement de la chaîne est piloté par des variables individuelles et par des métaparamètres s'appliquant à tous les traitements avec des coefficients eux-mêmes variables.

Par exemple, dans le cas de la décorrélation telle que nous la proposons dans *hoa.lib*, il y a 4 variables : *fa* le facteur de diffusion, *del* la fenêtre de décorrélation, *tf* la fonction de distribution, *fd* le taux de réinjection. Dans le cas d'une superposition de N strates de décorrélation, nous aurons $fa_1, fa_n, \dots, fa_N, del_1, del_n, \dots, del_N, etc..$

9. Lors d'une résidence de composition au CICM, la compositrice Giulia Francavilla a utilisé *abc.lib* qui n'a pas de décodeur 3D. Pour composer l'espace 3D de sa pièce, la compositrice a mixer différents plans 2D. Lors de cette résidence, nous étions en train de travailler sur l'ajout d'une couche de VBAP au décodeur 2D de *hoa.lib*. C'est cette conjonction qui nous a amené à travailler sur cette approche de la 3D en superposition de plans 2D. Par ailleurs, pour le lecteur souhaitant compiler des décodeurs 3D en langage Faust, voir [15].

10. Dans des versions légèrement modifiées par rapport à celles disponibles en ligne. Les modifications sont principalement pour une meilleure compatibilité avec nos interfaces et pour laisser plus de variables accessibles afin d'expérimenter avant une nouvelle version du traitement.

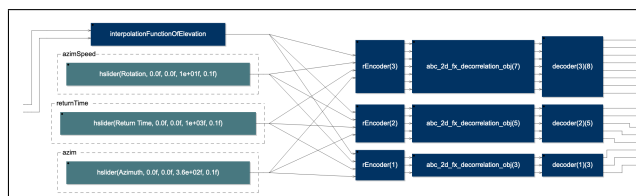


Figure 2. Exemple de chaîne de traitement pour trois couronnes de haut-parleur

Si nous nous concentrons sur les facteurs de décorrélation *fa*, nous pouvons insérer des coefficients et piloter le n^{eme} facteur avec un métafacteur (fa_{meta}) en faisant le produit :

$$fa_n \cdot c_n \cdot fa_{meta} \quad (1)$$

L'idée est de faire des couches de traitement pouvant être manipulées indépendamment. Pour passer d'un plan à l'autre, nous utilisons une portion de sinus pour l'interpolation en entrée. L'envoi du signal de la source vers les trois encodeurs est pondéré en fonction de l'élévation soustraite (voir figure 3).

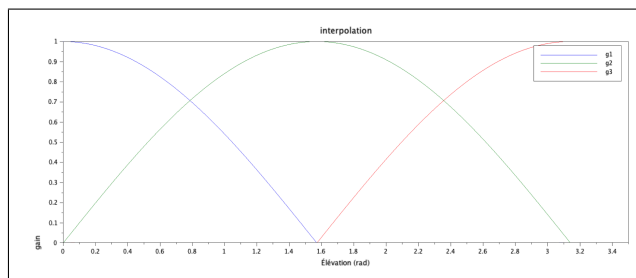


Figure 3. Facteur de gain par encodeur 2D en fonction de l'élévation

Dans un deuxième temps, nous avons testé d'associer des traitements à des plans de haut-parleurs qui ne respecte pas les couronnes. Nous avons considéré des plans ayant une certaine « courbure ». Par exemple, en sélectionnant les haut-parleurs aux numéros pairs pour un premier plan et impairs pour un deuxième plan, une rotation de source sur l'un des deux plans aura un rendu qui ne sera pas une trajectoire linéaire. Cette approche, tout en étant contraignante pour une pratique de la spatialisation, a l'avantage de nous inviter à imaginer des systèmes de figurations spatiales (trajectoires, strates de traitements, etc.) pouvant être intégrés dans un système de composition.

2.3. Décorrélation de décorrélation

La décorrélation micro-temporelle appliquée à la composition réfère à des techniques de décalages micro-temporelles (ou application de filtres all-pass). D'abord présentée par Kendall [16] pour des traitements globaux de type réverbération, largement saisie par Horacio Vaggione [30][31] puis Anne Sèdes [23], elle fut introduite dans le modèle ambisonique dans *HOALibrary* puis finalement dans *abc.lib* et *hoa.lib* en Faust. La décorrélation

en ambisonie n'est pas l'objet de cet article, le lecteur intéressé peut se référer à [13] pour plus de précisions sur les choix d'implémentation.

La décorrélation dans le domaine ambisonique consiste en l'insertion de lignes à retards dans les signaux associés aux harmoniques circulaires ou sphériques tout en pilotant le temps de retard de chaque harmonique par deux paramètres : la fenêtre de décorrélation et le facteur de diffusion. Si le facteur est nul, aucun retard n'est appliqué aux harmoniques. Dans le cas contraire, un retard variable est appliqué à chaque harmonique en fonction de la taille de la fenêtre de décorrélation, du facteur, d'un coefficient lié au numéro de l'harmonique et un coefficient lié au type de distribution parmi vingt-deux types de distributions du retard (linéaire, carré, racine carrée, portion de sinus, etc.).

Afin d'enrichir le résultat perceptif du traitement, nous avons utilisé différents modules de décorrélations en parallèles pour les mêmes signaux ambisoniques d'entrées. Cette approche nous permet d'attribuer à chaque module de décorrélation un paramétrage particulier, et ainsi décorréler les modules de décorrélation. Par exemple, un encodeur ambisonique d'ordre 3 en 2D envoie les 7 signaux associés aux harmoniques circulaires vers n modules de décorrélation ayant tous 7 entrées et 7 sorties. Maintenant, imaginons que ces n modules aient un facteur de diffusion au maximum, une même fenêtre de décorrélation mais des types de distribution de retards différents. Une fois les $7n$ signaux fusionnés et envoyés vers un seul décodeur 2D, la multiplicité des lignes à retards engendre une complexification du résultat largement perceptible.

À la suite de ces essais, nous avons implémenté une approche de métadécorrélation, dans laquelle les modules de décorrélation se décorrélent entre eux. Un étage de décorrélation contrôle le type de distribution des autres modules parmi les 22 types de distributions (4). En utilisant l'objet *preset* et *patternstorage* ainsi qu'un script dans *jsui*, nous pouvons faire des interpolations entre chaque type de distribution pour chacun des 7 modules de décorrélation. Dans la pièce, nous avons choisi de façon arbitraire d'utiliser sept modules de décorrélation pour la couronne au niveau des oreilles, cinq modules pour la couronne centrale et trois modules pour la couronne en haut du dôme.

2.4. Gain le domaine des ondes planes

Le troisième traitement utilisé dans *Émergences* est une approche originale du contrôle de gain dans le domaine des ondes planes. Dans la version *Max* de *HOA-Library*, une série d'objets et de patches permettent de faire des opérations dans le domaine des ondes planes (signaux associés à des haut-parleurs virtuels ou réels) notamment le patch « *hoa.fx.gain* » contrôlable avec l'interface « *hoa.space* ». Ce traitement lorsqu'il permet de contrôler le gain dans la direction de chaque haut-parleur (virtuel).

L'objet *hoa.space* prend la liste des amplitudes des haut-parleurs virtuels en entrée. Pour contrôler cet objet avec un plus haut niveau, nous avons écrit un script (*directivite.js*) permettant de faire des distributions d'ampli-

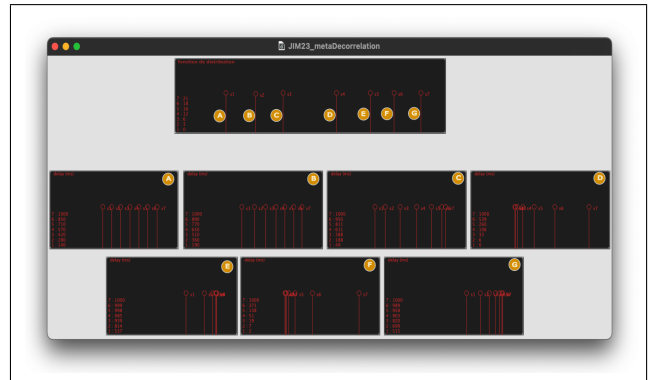


Figure 4. Illustration du contrôle du type de distribution de 7 instances de décorrélation par un étage de décorrélation avec l'interface *ddd.js*

tudes inspirées des diagrammes de directivité des microphones (voir figure 5). Le script prend en entrée un angle et un facteur de directivité. Plus le facteur de directivité est élevé, plus la zone écoutée sera étroite, à l'inverse plus le facteur sera grand, plus la zone écoutée sera large. Cette approche nous permet de contrôler le rendu global d'un plan de traitement avec simplement deux variables.

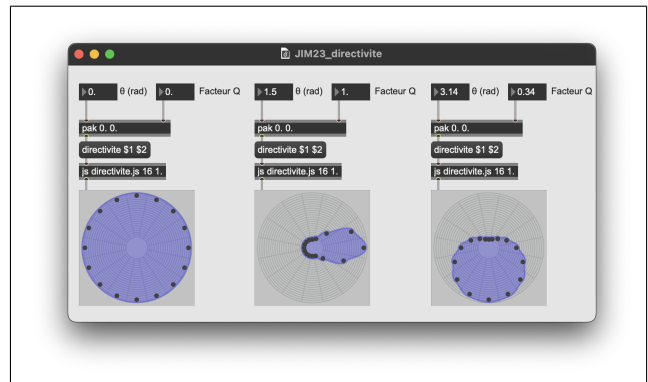


Figure 5. Illustration du contrôle de l'objet *hoa.map* avec le script *directivite.js*

3. MORPHOLOGIES SPATIALES

Dans cette partie, nous exposons les morphologies ¹¹ composées dans *Émergences*. Nous nous concentrons ici sur les opérations, manipulations et objectifs musicaux liés à ce que nous nommons *morphologies spatiales*. Dans

¹¹. La notion de morphologie traverse de façon diverse et polysémique la pensée musicale moderne et contemporaine (Schaeffer, Xenakis, Smalley, Bayle, Vaggione) notamment dans les musiques électroacoustiques. Nous employons ici le terme dans le sens de H.Vaggione. Cette notion feuilletée est présente dans la grande majorité de son œuvre théorique et n'est pas l'objet de cet article. Retenons ici que les morphologies sont « les termes qui émergent de faisceaux de relations qui sont à leur tour confrontés à des nouveaux faisceaux de relations déterminant des nouveaux termes et ainsi de suite » [28]. Il s'agit pour nous de pointer vers des entités sonores composables, multi-échelles, émergentes de l'interaction avec d'autres entités.

cette pièce, le paradigme de la source ponctuelle n'est employé que de façon anecdotique. Nous ne considérons pas les objets dans l'espace, mais l'espace lui-même, nous faisons des opérations nativement spatiales [4]. Autrement dit, nous ne faisons pas des opérations sur des morphologies sonores que nous projetons dans l'espace, nous faisons des opérations sur l'espace lui-même : nous travaillons avec et sur des morphologies spatiales qui se déclinent en trois types (textures, enveloppes et strates).

La pièce peut être scindée en trois parties : la première allant jusqu'à 3'50", dans laquelle nous travaillons principalement les textures spatiales et ce que nous appelons les enveloppes spatiales, la deuxième allant jusqu'à 5'10" au cours de laquelle nous travaillons la décorrélation directement sur les signaux envoyés aux haut-parleurs ainsi que du *time stretching*, et la troisième partie dans laquelle nous travaillons la stratification et le traitement par ring modulation.

3.1. Textures spatiales / texturer l'espace

Ce que nous appelons ici « texture spatiale » pointe vers la morphologie spatiale que nous travaillons à partir de la décorrélation de décorrélation en ambisonie (voir 2.3) et la superposition de multiples prises de ces mêmes textures. Nous faisons cette analogie avec la matière, car elles semblent partager certains attributs comme l'agencement d'unités à différentes échelles pouvant être homogène ou hétérogène. Ce que nous cherchons dans le travail de ces textures est de donner à l'auditeur des sensations de variations d'ordre spatial, sans donner la possibilité de pointer aisément vers l'origine de ces variations. Les attributs sonores que nous travaillons sont : (1) la densité, (2) la distribution spectrale, (3) la profondeur, (4) l'agitation.

1. La densité est principalement contrôlée par le nombre de prises que nous superposons, le nombre de modules de décorrélation utilisés en parallèle ainsi que leur taux de décorrélation les uns avec les autres ;
2. La distribution spectrale est liée à la bande de fréquence de chacune des prises que nous superposons et le comportement des filtres en amont et en aval des traitements ;
3. Nous contrôlons la profondeur par la composition de plans sonores - eux-mêmes émergents des assemblages de densité et distribution spectrale - ainsi qu'à la superposition de prises avec des opérations à des échelles temporelles différentes ;
4. L'agitation est construite là aussi de façon empirique comme la quantité (et la qualité) des variations par unité de temps.

Une limitation de cette approche est l'absence de variable sur des zones précises de l'espace. Cette limitation nous a conduit à utiliser le gain dans le domaine des ondes planes (voir 2.4).

3.2. Enveloppe d'espace

La deuxième morphologie spatiale que nous travaillons dans *Émergences* est ce que nous décrivons comme des *enveloppes d'espace* (de 2' à 3'50"). Les opérations permettant de les faire émerger consistent à projeter le champ sonore - dans notre cas des textures spatiales - dans le domaine des ondes planes, et écrire temporellement le comportement des gains dans chaque direction. Pour cela, nous utilisons le processus que nous avons décrit dans la sous-section 2.4. Nous utilisons le terme enveloppe pour plusieurs raisons. D'une part, nous faisons référence au critère utilisé pour l'évaluation de la qualité d'une acoustique de salle : la sensation d'enveloppement (*Listener Envelopment LEV*) [3]. Par là, nous cherchons à pointer vers une sensation d'enveloppement variable par le son dont les deux extrêmes pour nous seraient la source ponctuelle et le champ diffus. Nous faisons aussi référence aux enveloppes d'amplitudes, car nous utilisons une interface graphique de type *piecewise linear function* pour contrôler l'objet *hoa.space* en passant par le script *directivite.js* (voir figure 6).

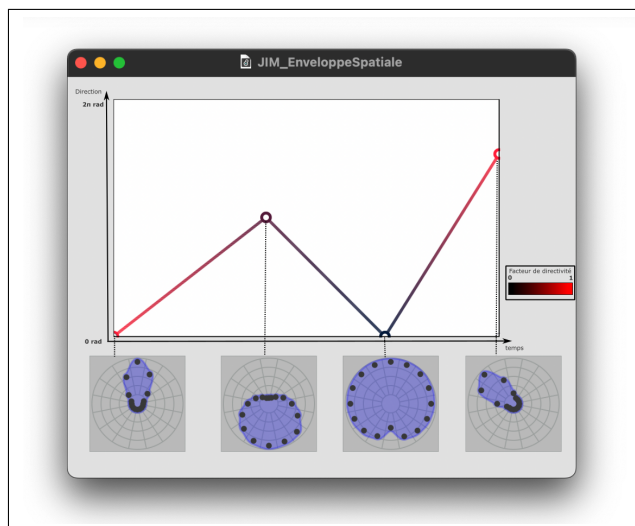


Figure 6. Illustration de l'écriture d'enveloppe spatiale avec *2plf.js*, *directivite.js* et *hoa.map*

Nous cherchons par ailleurs à composer des morphologies spatiales dont le feuilletage dépasse le seuil d'intelligibilité des éléments qui la constituent tout en laissant à l'auditeur la sensation que quelque chose se passe - sans perdre l'attention. Pour cela, nous superposons plusieurs modules d'enveloppement en jouant sur l'écriture de leur comportement temporel. Nous démultiplions les textures, écrivons des enveloppes spatiales pour chacune d'elles, en les mettant en boucle sur des temporalités différentes. Nous cherchons à garder un contrôle sur la globalité, tout en brouillant les pistes de nos actions. En somme, nous cherchons des modalités d'écriture d'un contrepoint spatial.

3.3. Stratification

L'idée de considérer l'hémisphère de haut-parleurs comme un tout ou comme un assemblage de plans (plus ou moins courbes), nous a semblé avoir un potentiel compositionnel à investir. Nous explorons avec cette morphologie les possibilités sensibles par la superposition de plans de traitement aux paramétrages différents. L'idée principale que nous avons explorée est la possibilité de jouer avec les sensations d'élévation de plans entiers. Nous ne cherchons pas à donner la sensation d'une trajectoire ascendante d'une morphologie, mais la transformation de la morphologie spatiale au cours de son élévation. Pour cela, nous avons notamment essayé de paramétrer les trois strates de traitement avec de légères différences puis de faire passer progressivement la boucle de clics d'une strate à l'autre. D'abord de la première strate à la dernière en 1 seconde, puis 10 secondes et enfin 60 secondes. Toutefois, nous n'avons pas réussi à trouver un résultat satisfaisant.

Dans cette pièce, nous avons testé cette idée avec trois traitements :

1. la décorrélation avec différents paramétrages de feedback par strate, ainsi que le nombre de lignes à retard par strate (ce qui a tendance à impacter la sensation de densité) ;
2. la ring modulation avec des fréquences modulantes différentes par strate ;
3. vitesse de rotation différentes par strate.

Ces tentatives ont ouvert un niveau opératoire sur lequel nous commençons à peine à nous aventurer.

4. CONCLUSION

Dans cet article, nous nous appuyons sur l'aspect poétique d'*Émergences* considérée comme un prototype de notre atelier afin de souligner les implications technologiques et musicales de notre recherche-création sur les interfaces. Dans la partie 1, nous avons exposé les difficultés rencontrées lors de la confrontation musicale des esquisses d'interfaces graphiques (*2plf.js*, *dtd.js*). Nous avons expliqué la nécessité que nous avons eu de modifier notre dispositif expérimental et d'adapter nos manières de composer. Nous avons vu par la suite que ce point de tension a mis au centre de nos recherches la notion d'instrument et d'interactions nous amenant à reconsidérer notre définition d'interface.

Dans la partie 2, nous avons présenté les différents éléments constituant la partie technique de notre *espace composable* toujours considéré en mouvement. Nous avons explicité dans la sous-partie 2.1 notre écosystème logiciel et nos manières de faire du montage dans le domaine ambisonique. Puis dans la sous-partie 2.2, après un rappel sur l'ambisonie (2.2.1) et sur les traitements en ambisonie (2.2.2) nous avons présenté l'approche que nous avons appelé *Layer Based Ambisonics Processes*, utilisant chaque couronne de haut-parleur d'un dispositif 3D comme un plan 2D sur lequel nous venons faire des opérations. Par la suite dans les sous-parties 2.3 et 2.4, nous avons explicité

les approches originales de traitement pour atteindre le niveau opératoire souhaité dans cette pièce. D'abord dans l'approche de la décorrélation de décorrélation, utilisant plusieurs modules de décorrélations en parallèle décorrés entre eux (2.3), puis avec une utilisation de la gestion du gain dans le domaine des ondes planes (2.4).

Dans la partie 3, nous avons esquissé un éclairage particulier du concept de morphologie : les morphologies spatiales. Nous avons présenté dans cette section les trois morphologies spatiales principalement composées dans *Émergences* : les textures spatiales, les enveloppes d'espace et la stratification. Elles sont toutes les trois à penser comme des opérations musicales sur l'espace et pas dans l'espace. La première émerge d'un feuilletage de modules de décorrélation et de superposition de prises, la deuxième d'un jeu avec l'écriture temporelle en contrepoint du comportement des textures dans le domaine des ondes planes, et la troisième émerge d'un travail sur la superposition en élévation de plans de traitements.

Toutes ces manières de faire sont les marqueurs d'un trajet articulant recherche, composition et développement. Cette posture du compositeur-chercheur nous permet de construire une approche singulière de la spatialité du son, nous interrogeant sans cesse sur ce qui fait émerger notre instrument. Aujourd'hui, nous souhaiterions formaliser les traitements esquissés dans cette pièce afin de pouvoir les partager. D'autre part, nous souhaiterions continuer l'exploration musicale des strates de traitements, notamment sur les sensations d'élévation des morphologies spatiales. Pour finir, nous souhaitons formaliser et générer de nouvelles morphologies spatiales.

5. 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.

6. REFERENCES

- [1] Natasha Barrett. Spatio-musical composition strategies. *Organised Sound*, 7(3) :313–323, 2002.
- [2] Charles Bascou. Adaptive spatialization and scripting capabilities in the spatial trajectory editor holoedi. In *Proceedings of the 7th Sound and Music Computing Conference (SMC)*, pages 404–408, Barcelone, 2010.
- [3] Leo Beranek. *Concert and opera halls : how they sound*. Published for the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, Woodbury, NY, 1996.
- [4] Alain Bonardi. Composer l'espace sonore. In *Revue Francophone d'Informatique Musicale*, volume 7-8 Culture du code, 2020.
- [5] Alain Bonardi. La librairie abclib : un ensemble de codes Faust rassemblant 20 ans de recherche,

- enseignement et création en musique mixte. In *Journées d'Informatique Musicale 2021*, Visioconférences, France, July 2021. AFIM.
- [6] Thibaut Carpentier, Markus Noisternig, and Olivier Warusfel. Twenty Years of Ircam Spat : Looking Back, Looking Forward. In *41st International Computer Music Conference (ICMC)*, pages 270 – 277, Denton, TX, United States, September 2015.
- [7] Julien Colafrancesco. *Spatialisation de sources auditives étendues : applications musicales avec la bibliothèque HOA*. phdthesis, Université Paris 8 Vincennes Saint-Denis, 2015.
- [8] Elie During. Prototypes. *L'étincelle (Ircam)*, 7 :6–12, Juin 2010.
- [9] Yvan Etienne. *De l'espace sonore*. Haute école des arts du Rhin, Les Presses du réel Présence graphique, Strasbourg, France Dijon, France Monts, Frances, 2014.
- [10] Jérémie Garcia, Thibaut Carpentier, and Jean Bresson. Interactive-compositional Authoring of Sound Spatialization. *Journal of New Music Research*, 46(1) :74–86, nov 2016.
- [11] Kevin Gohon. *Critique du discours musical et émergence d'une pensée « mixte » dans les œuvres électroacoustiques de Pierre Boulez et Luigi Nono*. PhD thesis, Université Rennes 2, 2018.
- [12] Paul Goutmann. Traitement spatial du son par décorrélation des signaux en ambisonie d'ordre élevé. In *Journées d'Informatique Musicale 2021*, Visioconférences, France, July 2021. AFIM.
- [13] Paul Goutmann and Alain Bonardi. Approaching Spatial Audio Processing by Means of Decorrelation and Ring Modulation in Ambisonics. In *Sound and Music Computing*. Université Jean Monnet, GRAME, INRIA, 2022.
- [14] Pierre Guillot. *La représentation intermédiaire et abstraite de l'espace comme outil de spatialisation du son*. Theses, Université Paris 8 Vincennes Saint-Denis, December 2017.
- [15] Aaron Heller, Eric Benjamin, Richard Lee, and Pandit Litoral. A toolkit for the design of ambisonic decoders. In *Linux Audio Conferece*, Stanford University, California, 2012. CCRMA.
- [16] Gary S. Kendall. The decorrelation of audio signals and its impact on spatial imagery. *Computer Music Journal*, 19(4) :71, 1995.
- [17] David Kim-Boyle. Spectral and Granular Spatialization with Boids. In *ICMC*, pages 139–142. Michigan Publishing, 2006.
- [18] Pierre Lecomte. Ambitools : Tools for Sound Field Synthesis with Higher Order Ambisonics - v1.0. In *Proceedings of the 1st International Faust Conference (IFC-18)*, Mainz, Germany, July 2018.
- [19] David Ledoux, Robert Normandeau, Olivier Bélanger, and Christophe Lengelé. Vers une approche immersive de la composition musicale par le développement d'outils de spatialisation sonore : ControlGRIS et ServerGRIS. In *JIM 2019 Journées d'Informatique Musicale*, Bayonne, France, May 2019. LaBRI.
- [20] Chikashi Miyama and Götz Dipper. Zirkonium 3.1-a toolkit for spatial composition and performance. In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, volume 313, page 312, 2016.
- [21] Jean-Louis Le Moigne. « une fureur sacrée de comprendre pour faire et de faire pour comprendre ». *e-Phaïstos*, IX-1, apr 2021.
- [22] Tapani Pihlajamäki, Olli Santala, and Ville Pulkki. Synthesis of spatially extended virtual source with time-frequency decomposition of mono signals. *J. Audio Eng. Soc.*, 62(7/8) :467–484, aug 2014.
- [23] Anne Sèdes. Approche musicale de la decorrélation microtemporelle dans la bibliothèque HOA. In université de Montréal, editor, *Journées d'Informatique Musicale 2015*, Montréal, Canada, May 2015. Université de Montréal.
- [24] Anne Sèdes, Pierre Guillot, and Eliott Paris. The HOA library, review and prospects. In *International Computer Music Conference | Sound and Music Computing*, Proceedings ICMCISMC, pages 855 – 860, Athènes, Greece, September 2014.
- [25] Marco Stroppa. *Accorder musicalement un espace réel et un espace inventé*. Presses universitaires de France, Paris, 2007.
- [26] Anne Sèdes. L'espace sonore du prometeo de luigi nono. In Giordano Ferrari, editor, *L'opéra éclaté - La dramaturgie musicale entre 1969 et 1984*, pages 223–238. L'Harmattan, 2006.
- [27] Anne Sèdes. La notion d'appareil empruntée à W. Benjamin, appliquée à la création musicale en studio électroacoustique, et à sa diffusion. *Revue Appareil [En ligne]*, 11, 2013.
- [28] Horacio Vaggione. L'approche morphologique. In *Musique électroacoustique : expérience et prospective : actes IV*, pages 140–145, Bourges, 1998.
- [29] Horacio Vaggione. *L'espace composable. Sur quelques catégories opératoires dans la musique électroacoustique*. L'Harmattan, 1998.
- [30] Horacio Vaggione. Composing musical spaces by means of decorrelation of audio signals. In *Proceedings of the DAFx Conference on Digital Audio Effects.*, University of Limerick, December 2001. University of Limerick, Limerick (Irlande).
- [31] Horacio Vaggione. Décorrélation microtemporelle, morphologies et figurations spatiales. In *Journées d'Informatique Musicale*, Marseille, France, May 2002.

- [32] Charles Verron, Mitsuko Aramaki, Richard Kronland-Martinet, and Grégory Pallone. A spatialized additive synthesizer. In *The Inaugural International Conference on Music Communication Science*, page 4, Sidney, Australia, December 2007.
- [33] Franz Zotter and Matthias Frank. *Ambisonics : A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*. Springer, 2019.