

Textures génératives vivantes dans l'espace

Directeur de thèse : Gérard Assayag (STMS, Représentations Musicales) ; co-encadrants : Markus Noisternig (STMS, Espaces Acoustiques et Cognitifs), Alain Bonardi (Musidanse / CICM - Université Paris 8).

Ce projet de recherche doctorale s'inscrit dans l'axe-programme du Collegium Musicæ "Improvisation, Apprentissage, Intelligence artificielle"

Contexte

La confrontation des artistes et la puissance générative de la machine conférée par l'IA suscite de nouveaux contextes créatifs inédits et puissants. L'appropriation artistique de ces outils reste l'un des défis créatifs les plus déterminants de ces systèmes d'apprentissage. Par ailleurs, la dimension d'espace est au cœur de la pensée musicale et de la recherche sonore contemporaines. Nous pensons que les outils technologiques (comme ceux développés à l'Ircam ou au CICM) possèdent désormais une finesse et richesse permettant d'imaginer de nouveaux paradigmes spatio-musicaux, à la fois spécifiques à l'artiste et généralisables comme processus créatifs. La combinaison de ces deux approches, encore peu explorée à ce jour, pourrait offrir aux musiciens un large champ d'expérimentation, tout en suscitant une réflexion sur des formes hybrides novatrices, à la croisée de l'écriture formelle et de l'improvisation, à l'articulation des dimensions timbrales et spatiales, de l'instrumentation acoustique et numérique.

Outils et recherches avancées

Les puissants outils déjà existants, tels que le *Spat* (Carpentier & al 2015) et *Somax2* (Assayag & al 2022) développés à l'Ircam, ainsi que ceux du CICM (*libraries HOA* et *abclib*), s'appuient sur les recherches menées par les encadrants et leurs équipes, notamment J.-M. Fernández qui a initié l'exploration de la notion de compétence spatiale d'un agent dans *Somax2Collider* (Fernandez & al 2019). Ces travaux fondateurs constituent un point de départ solide pour cette thèse. Les recherches et perspectives artistiques envisagées y vont au-delà de la réflexion classique sur les sources sonores et leur localisation. Nous proposons d'explorer en profondeur la notion de *textures spatiales*, et en particulier les dynamiques collectives d'émergence de ces dernières telles qu'elles peuvent être déployées par les modèles d'IA créative. Une manière d'y parvenir est d'enrichir les agents numériques, au cœur d'un système comme *Somax2*, en leur intégrant des capacités dynamiques d'"orchestration spatiale", ouvrant ainsi de nouvelles possibilités d'interaction et de coopération dirigées vers l'espace sonore.

Espace sonore : vers de nouvelles formes hybrides, alliant interaction, immersion et pensée formelle

L'équipe Représentations Musicales (RepMus) a mené des recherches sur la synthèse des textures en 3D, en contrôlant les densités de l'espace avec *OpenMusic* (Schumacher & al 2016, Garcia & al 2017). Cette approche consiste à diviser l'espace en zones de différentes densités granulaires, développant ainsi une synthèse en 3D. L'exploration de l'idée de « source étendue » a ainsi été développée à partir de la recherche d'une synthèse spatiale coordonnée de sources multiples ayant des comportements spatiaux cohérents. Ces recherches étaient inscrites dans un dialogue constant avec les expérimentations artistiques sous forme d'installations déambulatoires. Le travail de recherche sur les textures audio-spatiales se poursuit dans la même équipe avec le logiciel en temps réel *Antescollider* (Fernandez 2019) avec comme aboutissement deux pièces immersives.

Les travaux de l'équipe Espace Acoustiques et Cognitifs (EAC) portent sur la modélisation physique du champ sonore en vue du développement d'un cadre formel d'analyse et de synthèse. L'application de ces techniques ouvre la voie à l'imagination de champs sonores « non-réalistes » et permet d'accompagner et d'élargir la notion d'espace. Ces techniques de spatialisation audio 3D, associées aux dispositifs de captation des mouvements de l'interprète ou de l'auditeur dans l'espace, constituent une base organologique essentielle pour aborder les questions d'interaction musicale, sonore et multimédia.

Après ces recherches à l'interface EAC-RepMus une collaboration s'est nouée avec A. Bonardi, centrée sur la question de la synthèse spatiale du son. En effet, depuis 2012, le CICM (Centre de recherches en Informatique et Création Musicale de Paris 8) travaille sur l'imbrication du traitement et de la synthèse sonores avec leur mise en espace que ce soit en 2D ou en 3D : la spatialisation n'est plus pensée comme post-production, mais comme une construction de sons nativement spatialisés dès leur origine, selon trois étapes : décomposition / transformation / recomposition.

IA générative interactive : de nouvelles formes émergent de l'interaction co-créative entre agents humains et artificiels

Somax2 est une application IA d'improvisation et de composition musicale comportant un modèle d'écoute, un module d'apprentissage, une mémoire cognitive réactive, une architecture multi-agents dans un environnement Max/MSP et Python capable de participer en *live* à une expérience collective d'improvisation musicale. *Somax2* peut écouter et contrôler plusieurs dimensions musicales dont le pitch, la texture harmonique, le rythme, le timbre, et est désormais équipé de "labels" définis par l'utilisateur qui ouvrent à tout un univers de paramètres dont la prosodie linguistique ou la description de modes de jeux instrumentaux.

Objectifs

A partir de cet éco-système liant générativité, espace et textualités, nous souhaitons explorer et étendre largement les possibilités inhérentes aux textures spatiales et à leurs dynamiques d'émergence collective par des moyens d'IA (co)créative, impliquant des agents autonomes interactifs dotés de compétences de perception, de génération, de localisation et d'orchestration augmentées dans la dimension spatiale. Ce projet est riche d'applications créatives nouvelles, comme la projection spatiale de textures génératives organiques et évolutives, la création de relations subtiles entre texture spatiale et objets localisés, la perception spatiale du "silence", les mouvements collectifs résultant de l'auto-organisation des agents cocréatifs et de leurs interactions avec les musiciens humains.

Il s'agit d'explorer la relation dynamique entre la génération "vivante" et interactive des matériaux sonores et leur distribution spatiale sans se limiter à la notion de localisation de source à partir de matériaux sonores préétablis ou engendrés en temps réel, et de paramètres tels que la directivité, l'étendue, ou la profondeur.

L'interaction avec le mouvement (et donc la localisation) du musicien pourrait également instaurer des relations intéressantes entre l'exploration de l'espace et la construction semi-improvisée du temps (et du récit) dans une perspective scénographique avec des passages semi-contrôlés, des formes préétablies ou imaginées.

De même que les agents IA de *Somax2* interagissent déjà avec les musiciens et entre eux en échangeant des informations relevant de dimensions musicales (pitch, chroma, descripteurs audios, temporalité etc), ils possèdent également un modèle de mémoire réactive (basé sur l'apprentissage de corpus) qui est lui-même sensible à ces dimensions. Il s'agira donc ici de procéder à l'agrégation des nouvelles dimensions spatiales à ces représentations de sorte à étendre la compétence des agents et leurs capacités de communication et d'interaction au champ physique de l'espace. Ainsi des dynamiques spatiales collectives seraient susceptibles d'"émerger" à partir du jeu naturel de l'interaction des agents numériques entre eux et avec le contexte musical.

Pour atteindre cet objectif, il pourra s'agir à titre d'exemple d'analyser les réponses impulsives spatiales (SRIRs) sous forme de descripteurs, en s'appuyant sur les recherches de l'équipe EAC (Alary et al., 202 ; Massé et al., 2025) afin d'étendre

le vocabulaire de Somax2, Ces descripteurs serviront de base à la génération de nouvelles réponses via des transformations temporelles et spatiales (*time stretch*, temps rétrograde, morphismes, Schütz et al., 2025). Cette approche ouvrira des perspectives inédites pour l'improvisation musicale et la spatialisation sonore en recomposant dynamiquement les espaces acoustiques.

Méthodologie

Nous mettrons en place un écosystème de recherche et de développement structuré, capable d'aborder les enjeux artistiques et esthétiques en lien étroit avec l'expérimentation. Une mise en contexte et un état de l'art approfondis sont essentiels pour aborder les enjeux globaux, tels que l'intelligence artificielle et le travail dans l'espace sonore. Cela inclut une analyse détaillée des outils technologiques existants (Somax2, Spat, OM, librairie HOA) et de leurs possibilités d'interconnexion, de projection, ainsi que de leur pertinence pour la recherche sur les textures spatiales génératives et la création de nouveaux paradigmes spatiaux. La recherche se concentrera d'abord sur l'analyse des aspects théoriques, conceptuels et philosophiques, puis sur la mise en relation de ces concepts explorés, la projection de nouvelles idées et les processus d'expérimentation.

Elle inclura des tests simplifiés et le développement progressif des outils, en mettant particulièrement l'accent sur leur capacité d'interconnexion et leur fonctionnalité en temps réel. Les expérimentations, présentées sous forme d'esquisses structurées, viendront nourrir cette recherche, facilitant l'exploration, la connexion et la création de nouvelles perspectives technologiques, tout en approfondissant la compréhension des outils et de leurs potentialités.

Plan de travail envisagée :

1. **Recherche théorique (conceptuelle) et prototypage technologique :**
 - Mise au point du modèle général des agents spatiaux dans Somax2
 - Etude des descripteurs spatiaux (acoustiques et perceptifs), des réponses impulsionnelles spatiales (SRIRs), et de leurs transformations
 - Intégration des descripteurs et des transformations aux agents spatiaux Somax2
 - Étude de la prosodie et du texte comme matériau sonore et guide du récit spatial
2. **Expérimentation Musicales**
 - Expérimentation pratique en studio et dans les lieux d'écoute, scénarios d'interaction musicale, tests et validation avec les musiciens
3. **Mise en relation des recherches théoriques, esthétiques, des outils technologiques et des esquisses :**
 - Premières esquisses mettant en œuvre les textures spatiales dynamiques
 - Croisement des approches théoriques et des résultats expérimentaux.
 - Retour sur les modèles d'agents spatiaux et de descripteurs spatiaux, itération sur la modélisation et le développement technologique
4. **Production musicale et pluridisciplinaire en lien avec les esquisses :**
 - Élaboration de nouvelles productions musicales et/ou pluridisciplinaires basées sur les nouveaux outils, validation en grandeur réelle .
5. **Conclusions et perspectives d'ouverture :**
 - Bilan des résultats obtenus et identification des voies de développement futur.

Nous mettrons en place des résidences artistiques pour l'expérimentation et la production d'esquisses, et l'évaluation de la pertinence des outils. Le contexte artistique unique de l'Ircam, ainsi que celui du CICM, en dialogue avec les scientifiques et en tirant partie de leurs studios spécialement dédiés à la spatialisation, permettra d'avancer rapidement selon plusieurs chemins et directions artistiques. Cela conduira également à des projets artistiques pluridisciplinaires documentés utiles à l'analyse musicologique. Cette recherche alimentera la réflexion générale sur la forme, en explorant les tensions entre générativité (attente, surprise), le travail sur des temporalités ouvertes et sur une conception de la forme à la fois préconçue et évolutive, déployée dynamiquement dans une structure d'espace se construisant à mesure.

L'approche scientifique articulant travaux de pointe en IA créative et fine modélisation acoustique de l'espace ouvre la possibilité d'une innovation technologique dans un contexte de stimulation de la création artistique, permettant l'exploration de nouvelles formes musicales et multimedia et de nouveaux types de récits sonores.

Adéquation à l'Institut/Unité de recherche

Les équipes Représentations Musicales et Espaces Acoustiques et Cognitifs de l'Ircam-STMS, en collaboration avec l'équipe CICM de l'Université Paris 8, constituent un cadre idéal pour cette recherche centrée sur les aspects génératifs et compositionnels de l'espace sonore, en garantissant un co-encadrement harmonieux et productif, faisant suite à de nombreux travaux communs et productifs.

Bibliographie

- Alary, B., Massé, P., Schlecht, S. J., Noisternig, M., and Välimäki, V., "Perceptual analysis of directional late reverberation," J. Acoust. Soc. Am., vol. 149, pp. 3189–3199, May 2021.
- Assayag, G., Bonnasse-Gahot, L., Borg, J., "Cocreative Interaction: Somax2 and the REACH Project." Computer Music Journal, 2022, 46 (4), pp. 7-25. <hal-04826750>
- Barrett, N. 2019. "Spatial Music Composition." In Paterson, J., Lee, H. (eds.) 3D Audio. Routledge. Chapter 9.
- Bonardi, A., "Composer l'espace sonore." Revue Francophone d'Informatique Musicale, no. 7-8, Culture du code, 2020. [Online]. Available: <https://revues.mshparisnord.fr/rfim/index.php?id=624>
- Carpentier, T., Noisternig, M., Warusfel, O., "Twenty Years of Ircam Spat: Looking Back, Looking Forward", 41st Int. Computer Music Conference (ICMC), 2015, Denton, United States. pp. 270-277.
- Fernandez, J.M., Giavitto, J.L., Donat-Bouillud, P., "AntesCollider: Control and Signal Processing in the Same Score." ICMC 2019 - International Computer Music Conference, 2019, New York. <hal-02159629>
- Fiorin, M. "Being the Artificial Player: Good Practices in Collective Human-Machine Music Improvisation." EAI ArtsIT 2024, Nov 2024, Abu Dhabi, UAE. <hal-04760154>
- Garcia, J., Carpentier, T., Bresson, J., "Interactive-compositional Authoring of Sound Spatialization." Journal of New Music Research, Volume 46, 2017 - Issue 1: Interactive Composition.
- Goutmann, P., Bonardi, A., "Approaching Spatial Audio Processing by Means of Decorrelation and Ring Modulation in Ambisonics." Proceedings of the 19th Sound and Music Computing Conference, June 5-12, 2022, Saint-Étienne (France).
- Massé, P., Gallien, A., Kreuzer, W., and Noisternig, M., "Echo detection using the Herglotz wavefunction in spatial room impulse responses measured with spherical microphone arrays," 2025. Manuscript submitted for publication.
- Schumacher, M., "A Framework for Computer-Aided Composition of Space, Gesture, and Sound. Conception, Design, and Applications," PhD McGill, Ircam, 2016. <tel-01491794>
- Schumacher, M., Giménez Comas, N., "Computer-aided Composition of Spatial Sound Sculpture," Ircam Forum Review.
- Teixeira, W., Fiorini, M., Malt, Mikhail, Assayag, G., "The Application of Somax2 in the Live-Electronics Design of Roberto Victório's Chronos III," Musica Hodie, 2024, 24. <hal-04760169>