

Louis Bigo

Maître de conférences en informatique, HDR

Nationalité française
né le 14/07/1986
louis.bigo@univ-lille.fr
06 77 86 56 31
<https://louisbigo.com>

Candidature à la direction du SCRIME

1	Curriculum Vitæ	1
2	Activités d'enseignement à l'Université de Lille, 2016 - 2023	5
3	Activités de recherche	6
4	Projet de recherche <i>Intelligence Artificielle musicale : texture, geste et partitions</i>	16
5	Projet pour le SCRIME	21

1 Curriculum Vitæ

Synthèse du parcours professionnel

- septembre 2023 **Professeur des universités** (ENSEIRB-MATMECA, LaBRI)
- 2016 - 2023 **Maître de conférences** (Université de Lille, CRISAL, Algomus).
Élaboration de représentations informatiques et algorithmes pour assister l'analyse et la composition musicale.
2021 - 2022 : délégation CNRS 100% (CRISAL, Algomus)
2023 : **Habilitation à diriger des recherches** *Modeling Musical Scores Languages*
- 2014 - 2016 **Postdoctorat** (Universidad del País Vasco, San Sebastián, Espagne)
Music Informatics Group (D. Conklin). Projet EU FP7 *Learning To Create Apprentissage automatique et créativité musicale computationnelle.*
- 2013 - 2014 1/2 ATER Université Paris-Est (Université Paris-Est, LACL)
- 2010 - 2013 **Thèse de doctorat en informatique** (Université Paris-Est, LACL - Ircam)
Représentations symboliques musicales et calcul spatial
dirigée par O. Michel (Paris-Est, LACL)
encadrée par A. Spicher (Paris-Est, LACL) et M. Andreatta (CNRS, Ircam)
récompensée par le **Prix jeune chercheur Sciences et Musique 2013**.
Séjour de recherche de 2 mois à Queen-Mary University of London (Royaume-Uni)
Collaboration avec E. Chew. *Analyse automatique du Rubato.*
- 2009 - 2010 **Master recherche ATIAM** (Ircam-UPMC-Telecom Paris)
Acoustique Traitement du signal Informatique Appliqués à la Musique
- 2008 - 2009 **Ingénieur informatique chez Axway**
Développement et consulting.
- 2005 - 2008 **École d'ingénieurs Polytech'Lille**
Filière Informatique, Micro-électronique, Automatique.

Distinctions

- **Best Paper Award** *Joint International Computer Music Conference & Sound and Music Computing 2014* : L. Bigo, D. Ghisi, A. Spicher, M. Andreatta, « Spatial Transformations in Simplicial Chord Spaces ».

L'article récompensé présente une formalisation mathématique originale d'un ensemble de transformations musicales, connues et inédites, à l'aide de la notion de morphisme entre complexes simpliciaux. Ces transformations offrent des applications dans le domaine de la composition musicale.

- **Prix jeune chercheur Science et Musique 2013**, organisé par l'Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires (IRISA) et financé par l'Association Française d'Informatique Musicale (AFIM) et la fondation Rennes I.

Cette distinction récompense les travaux effectués au cours de ma thèse dans le domaine de la visualisation, l'analyse, la classification et les transformations automatiques de séquences musicales dans le cadre de la discipline informatique du *calcul spatial*.

Encadrement doctoral et scientifique

Encadrement doctoral

- 2017 - 2021 : **Laurent Feisthauer** (co-encadrement avec M. Giraud et F. Levé) *Annotation automatisée des métadonnées structurelles dans les partitions musicales. Cas des modulations et des cadences pour la forme sonate*
- 2021 - 2024 : **Louis Couturier** (co-encadrement avec F. Levé) *Modélisation de la texture musicale dans les partitions pour piano*
- 2022 - 2025 : **Alexandre D'Hooge** (co-encadrement avec K. Deguernel) *Élaboration d'outils d'intelligence artificielle pour assister la composition de tablatures pour guitare*
- 2022 - 2025 : **Dinh-Viet-Toan Le** (co-encadrement avec M. Keller) *Approches de Traitement Automatique du Langage Naturel dans le domaine musical : adaptabilité, performance et limites*

Encadrement de stages niveau Master

- 2022 : **Mathieu Kermarec** (co-encadré avec M. Keller) *Pré-entraînement de modèles séquentiels musicaux.*
- 2021 : **Gabriel Loiseau** (co-encadré avec M. Keller) *What Musical Knowledge Does Self-Attention Learn ?.*
- 2021 : **Louis Couturier** (co-encadré avec F. Levé) *Modélisation de la texture pianistique. Analyse d'éléments texturaux symboliques dans les Sonates pour piano de Mozart.*
- 2021 : **Quentin Normand** *Modélisation de techniques de jeu dans les tablatures de guitare.*
- 2020 : **David Régnier** *Détection de la fonction musicale de la guitare dans les tablatures.*
- 2019 : **Jules Cournut** (co-encadré avec M. Giraud) *Créativité musicale assistée par ordinateur : modèles pour l'aide à la composition dans Guitar Pro.*

Encadrement de projets de recherche d'étudiants

2016 - 2023 : (co-)encadrement de 14 projets de recherche d'étudiants, de la L3 au M2 (M2 Data Science, Licence/Master MIASHS, M2 arts, M1 Informatique) sur des sujets liés à mes recherches dans le domaine de l'informatique musicale.

Coordination de projets

Projet ANR JCJC

Coordination du **projet ANR JCJC TABASCO** (2022 - 2026, 201K€) dédié à l'élaboration d'outils pour l'aide à la composition de tablatures pour guitare dans le champs des musiques actuelles. Le projet est inter-disciplinaire, et se déroule en collaboration avec le musicologue B. Navarret (Sorbonne Université, Iremus). L'équipe que je coordonne comprend/comprendra une thèse (A. D'Hooge, 2022-2025, contrat doctoral spécifique normalien), un postdoc (12 mois, 2023-2024), un ingénieur de recherche (16 mois 2024 - 2025), deux stages niveau M2 (6 mois, 2024 - 2025) ainsi qu'une partie de l'activité d'un chercheur (M. Giraud, 15%), un enseignant-chercheur (B. Navarret, 15%) et un doctorant (L. Couturier 20% sur deux années de thèse).

Projet de collaboration bilatéral (France - Singapour)

Coordination, avec D. Herremans (Singapore University of Technology and Design, AMAAI, Singapour), du projet de collaboration bilatéral PHC (Programme Merlion, Campus France) **Music Language Processing** (2022 - 2023, 15 000€) entre les équipes Algomus (Université de Lille, CRISAL) et AMAAI (SUTD, Singapour). Financement de deux séjours de 10 jours dans l'équipe Singapourienne en 2022 et 2023.

Action Incitative Transversale

Coordination avec M. Keller d'un soutien financier de 4480 € en 2020-2021 et 2021-2022 dédié à la construction de projets de recherches collaboratifs entre nos équipes respectives.

Implication dans des projets

Implication dans le projet CPER MAuVE *Structures Musicales*, le projet ANR *CollabScore* et l'action *Musiscale* du GDR MADICS.

Collaborations, diffusion et rayonnement

Collaboration industrielle

Depuis 2018, collaboration avec la société Arobas Music¹ qui édite le logiciel d'édition de tablatures *Guitar Pro* et maintient le corpus *MySongBook*.

Visite de recherche

En août 2022, 10 jours dans l'équipe AMAAI de D. Herremans à Singapore University of Technology and Design (SUTD) dans le cadre de notre partenariat bilatérale *Music Language Processing*.

Participation à une compétition internationale d'Intelligence Artificielle

En 2020 avec G. Micchi, M. Giraud, F. Levé et R. Groult, constitution d'une des deux équipes françaises en compétition pour la première édition de l'*AI Song Contest*² (obtention de la 4e place / 13).

Séminaires invités

Entre 2011 et 2022, 25 séminaires invités.

Activités de vulgarisation et de transmission des savoirs

- En octobre 2020, intervention avec les autres membres de l'équipe Algomus sur le sujet *Un ordinateur peut-il nous faire apprécier la musique ?* à l'Espace Culture de l'Université de Lille.
- En septembre 2017 et 2018, intervention sur le thème *La vie d'un chercheur* aux Journées Innovation Création (RIC) à l'Université de Lille.
- En octobre 2014, participation à un atelier de vulgarisation de l'informatique musicale (*Creando música automática*) lors de la Semaine de la science, à San-Sebastian, Espagne.

1. <https://www.guitar-pro.com/fr/>

2. <https://www.vprobroadcast.com/titles/ai-songcontest.html>

- En octobre 2013, séminaire grand public *Représentations et transformations spatiales de séquences musicales*, Journée Science et Musique, Rennes.
- En juin 2011, animation de l'atelier *Réseaux de notes et papier interactif* avec J. Garcia, exposition *Mathématiques et Art*, au Palais de la découverte, Paris.

Activités de relecture

Relecteur pour les journaux *Journal of New Music Research*, *Music and Science*, *Transactions of the International Society for Music Information Retrieval (TISMIR)*, *Journal of Mathematics and Music*, *IEEE Transactions on Affective Computing*, pour l'ouvrage *Computational Music Analysis*, Springer 2016 ainsi que pour les conférences *Mathematics and Computation in Music (MCM)*, *International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*, *Journées d'Informatique Musicale (JIM)*. J'ai expertisé un projet ANR en 2019.

Jurys de thèse et comités de suivi de thèse

- 2021 : Examineur au jury de thèse de Valentin Gillot : *Approches algorithmiques et perceptives pour la recomposition polytopique de mélodies par critère de complexité multi-échelle*
- 2022 : Comité de Suivi de Thèse de Lydia Rodriguez de la Nava : *Modèles de représentation de la musique écrite pour la transcription d'instruments polyphoniques*.

Logiciel

Développement et maintenance du logiciel open-source HexaChord³ (langage Java, 16 000 lignes de code) utilisé par des musicologues, compositeurs et enseignants.

Organisation de colloques, conférences, journées d'étude

- 2022 : comité scientifique du colloque *1722-2022 : trois siècles du Traité de Jean-Philippe Rameau La musique-science devant la question de l'harmonie*.
- 2018 : co-président du comité d'organisation des *Journées d'Informatique Musicale* à Amiens.
- 2011 : équipe d'organisation de la conférence *Mathematics and Computation in Music* à Paris.

Collaboration artistiques

Conception et implémentation de l'algorithme permettant la recherche de *Série tous-intervalles dans une octave et en zigzag (STIOZ)* et de *Séries tous-intervalles imbriqués dans une série micro-intervallique (STISMI)* utilisées pour la composition de deux pièces du compositeur français Stéphane de Gérando :

- *Tempus est*, pièce électronique pour 120 musiciens et cloches électroniques spatialisées autour du public, interprété en public le 18 octobre 2015 à la Maison du peuple à Belfort⁴.
- *Le chant des STISMI*, ensemble de 30 flûtes en ut et ordinateur⁵.

Responsabilités collectives et d'intérêt général

- Depuis 2018, membre du bureau des enseignants en informatique de l'Université de Lille.
- commissions de recrutement d'ATER en informatique à la Faculté des Sciences et Technologies de l'université de Lille en 2018, 2019 et 2020.

3. <https://louisbigo.com/hexachord>

4. <https://www.youtube.com/watch?v=HbvxlcnrU3c>

5. <https://www.youtube.com/watch?v=eJlWnFIN5d8>

2 Activités d'enseignement à l'Université de Lille, 2016 - 2023

De 2016 à 2023, mes enseignements se sont répartis dans les domaines de l'informatique générale et l'informatique musicale. Depuis 2019, la quasi-intégralité de mes cours sont disponibles sur ma page web⁶.

Enseignements en informatique générale

Mes enseignements dans cette catégorie ont essentiellement porté sur les technologies du web et l'initiation à la programmation, dans des formations dans lesquelles l'informatique est une composante majeure, essentiellement les trois années de la Licence MIASHS (Mathématiques Informatique Appliquées aux Sciences Humaines et Sociales) et les deux années du Master MIASHS parcours Web Analyst. Il s'agit essentiellement de cours sur les langages Python, HTML/CSS, JavaScript et PHP. J'ai créé la majeure partie du contenu de ces enseignements (CM et TP, projets).

Enseignements en informatique musicale

Ces cours ont vocation à introduire l'utilisation d'outils informatiques pour le traitement de données musicales et audio. Ils couvrent un large spectre de notions comprenant une introduction à des notions de base en acoustique et traitement du signal, une prise en main de logiciels, majoritairement open-source, dédiés au son et à la musique (OpenMusic, Pure Data, LMMS, Sonic Visualizer, etc.), et une initiation à la programmation python avec l'introduction de bibliothèques de bases telles que `music21` ou `librosa`.

Encadrement de projets étudiants

Depuis mon arrivée à l'Université de Lille en 2016, j'ai (co)-encadré chaque année un ou plusieurs travaux de recherches d'étudiants (14 encadrements en tout), essentiellement des TER (Travaux Encadrés de Recherche) en L3/M1/M2 MIASHS, des PJI (Projet Individuel) en M1 Informatique, et projets de recherche en M1/M2 Data Science et en M1/M2 Arts parcours musique. L'ensemble de ces projets se situaient dans le domaine de recherche de l'informatique musicale.

Responsabilités pédagogiques

2020-2021 : **responsable des enseignements en informatique de la Licence MIASHS** (Mathématiques Informatique Appliquées aux Sciences Humaines et Sociales) à l'Université de Lille.

6. <https://louisbigo.com/teachings>

3 Activités de recherche

L'essentiel de mon parcours de recherche se situe dans le domaine de l'**informatique musicale**, et plus particulièrement l'*extraction d'information musicale* plus connue sous le terme anglophone **Music Information Retrieval (MIR)**. Notre communauté distingue couramment le traitement de données musicales *audio*, qui rendent compte d'un signal acoustique, et le traitement de données musicales *symboliques*, qui rendent compte d'informations à plus haut niveau, en général liée au contenu de la partition musicale. Mon intérêt pour la théorie musicale m'a incité à orienter mes recherches quasi-exclusivement dans le cadre des représentations symboliques. Les capacités d'abstraction des réseaux de neurones profonds dont l'usage s'est généralisé dans notre communauté contribuent toutefois à rapprocher progressivement ces deux sous-communautés.

2010 - 2014 (Thèse et ATER) : Calcul spatial et représentations symboliques musicales

Mes travaux de thèse (LACL, Université Paris-Est, Ircam) encadrés par A. Spicher, O. Michel et M. Andreatta, ont consisté à étudier les apports du *calcul spatial* au traitement des représentations symboliques musicales. Le calcul spatial est une discipline de l'informatique fournissant des outils pour la formulation d'algorithmes *en termes spatiaux*. Les structures de données y sont définies comme des *collections topologiques* et leur manipulation sont formulées comme des *transformations topologiques*. Ces outils m'ont permis de définir de manière formelle toute séquence musicale comme la progression d'une *trajectoire* dans un espace défini par une organisation topologique de hauteurs musicales. Cette approche a abouti à la formalisation du calcul de la *compacité* d'une trajectoire, et à l'étude de liens entre compacité et style musical. J'ai proposé la notion plus large de *compliance* associée à la propension générale d'un espace à faire apparaître la singularité d'une séquence musicale qui y est représentée. Mes travaux ont enfin permis la formalisation d'un ensemble de transformations géométriques de trajectoires induisant des transformations musicales inédites. J'ai développé le logiciel HexaChord⁷, permettant d'expérimenter ces concepts avec une pièce musicale arbitraire au format MIDI. Ce logiciel est depuis utilisé régulièrement dans des activités pédagogiques et de recherche, notamment par mon collègue et encadrant de thèse M. Andreatta. Mes travaux sur les transformations musicales m'ont ouvert au champs de la génération de musique dans un cadre d'aide à la composition, que j'ai conservé dans la suite de mon parcours. Ces travaux ont été récompensés par le *prix Jeune Chercheur Science et Musique 2013* ainsi que par le prix du meilleur article à la conférence *Joint SMC/ICMC 2014* [Bigo et al., 2014].

2014 - 2016 (Postdoctorat) : Génération automatique de musique par transformation

Mes travaux de postdoctorat (Music Informatics Group, Université du Pays-Basque, San Sebastián, Espagne, Projet européen *Learning To Create*) ont porté sur la génération automatique de musique guidée par la transformation de pièces existantes, en collaboration avec D. Conklin. Les méthodes que j'ai élaborées permettent de re-générer un ensemble d'aspects d'une pièce musicale, par exemple sa mélodie ou sa séquence d'accords sous-jacente, tout en conservant d'autres, par exemple son rythme et sa structure à l'aide de modèles de Markov [Bigo and Conklin, 2015]. Nous avons utilisé cette approche avec mes collègues D. Conklin, K. Agres et D. Herremans pour évaluer l'effet de la répétition d'accords sur l'appréciation musicale dans le répertoire de l'EDM (Electronic Dance Music) [Agres et al., 2017]. Contrairement au cadre de la musique acoustique, le mode de production de l'EDM nous a permis de générer du contenu musical réaliste pour la réalisation de tests d'écoute. Cette expérience m'a permis de me familiariser avec les logiciels de production musicale professionnels, tels que Logic Pro X, dans lesquels les outils d'aide à la composition que j'élabore aujourd'hui dans le cadre du projet ANR TABASCO ont vocation à s'intégrer. Enfin,

7. <https://louisbigo.com/hexachord>

l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique dans ces travaux m'a permis d'appréhender l'essor de cette discipline dans notre communauté, et d'en faire depuis une approche privilégiée dans mes recherches.

2016 - 2023 (Maître de conférences) : Modélisation de partitions pour l'aide à l'analyse et la composition

Mon arrivée en tant que Maître de conférence dans l'équipe d'informatique musicale Algomus (Université de Lille, CRISAL) a permis d'introduire l'apprentissage automatique dans les travaux de l'équipe. Mon premier axe de recherche fait l'objet d'une collaboration directe avec des membres de l'équipe. Les deux suivants font l'objet de collaborations que j'ai initiées, d'une part avec la société Arobas Music⁸ et d'autre part avec l'équipe Magnet⁹ de Inria Lille.

Analyse musicale assistée par ordinateur : modélisation du langage du répertoire classique



FIGURE 1 – Une *cadence parfaite authentique* (PAC) marquant la fin d'une phrase dans l'*Impromptu No.3* de F. Schubert.

S'inscrivant directement dans le thème de recherche majoritaire d'Algomus autour de la modélisation de partition dans le répertoire classique, ma première contribution dans l'équipe a porté sur *la modélisation de cadences* [Bigo et al., 2018]. Les cadences sont des phénomènes perceptifs saillant qui donnent à l'auditeur une sensation de conclusion. Elles sont largement utilisées dans le style classique pour marquer la fin d'une phrase musicale. Jouant un rôle fondamental dans la *structure* de la musique, la modélisation informatique des cadences contribue à élever l'analyse et la composition musicale assistées par ordinateur de l'échelle locale à l'échelle de la pièce globale. Avec mes collègues L. Feisthauer, F. Levé et M. Giraud, nous avons formulé la détection automatique de cadences sous la forme d'un problème d'apprentissage supervisé. Nous avons pour cela proposé une représentation de la partition à un haut niveau d'expressivité à l'aide d'une sélection de 44 descripteurs représentatifs du langage tonal classique, calculés systématiquement à chaque pulsation. Un classifieur SVM est entraîné à prédire l'occurrence de cadences à partir de cette représentation. Nous avons expérimenté cette méthode sur deux corpus comprenant des annotations manuelles de cadence, les fugues du *Clavier bien tempéré* de J.-S. Bach ainsi qu'un ensemble de quatuors à corde de J. Haydn. Se distinguant de l'utilisation fréquente de *boîtes noires* en *Music Information Retrieval*, le calcul explicite de descripteurs haut niveau nous a notamment permis une compréhension approfondie du phénomène de cadence, situant de fait notre méthode dans un cadre d'*IA explicable*.

L'efficacité de cette approche nous a incité à la généraliser pour la modélisation d'une variété de phénomènes complexes propres à ce répertoire musical. Dans le cadre de la thèse de L. Feisthauer, nous sommes allés jusqu'à modéliser la *Medial Caesura*, un marqueur structurel fort qui n'apparaît que deux fois au cours d'une pièce de structure *Forme Sonate* [Feisthauer et al., 2019]. Nous avons par la suite appliqué cette approche à l'identification de sections dans la *Forme Sonate* à l'aide

8. <https://www.guitar-pro.com/fr/>

9. <https://team.inria.fr/magnet/>

FIGURE 2 – Partition (haut) accompagnée d’une tablature (bas) d’un solo de guitare de la chanson *Another Brick in the Wall* (Pink-Floyd).

d’un modèle de Markov caché [Allegraud et al., 2019]. Cette approche est enfin utilisée dans ses travaux de thèse par L. Couturier, afin de *modéliser la texture symbolique* dans le répertoire pour piano de W.A. Mozart [Couturier et al., 2022a]. Fondamentalement liée à la notion de style musical, la texture correspond à la manière dont interagissent les notes et les voix au sein de la partition. Les travaux de L. Couturier ont consisté à élaborer une syntaxe dédiée à la description de la texture [Couturier et al., 2022b], que nous avons évaluée sur un corpus de 9 pièces musicales dont nous avons produit collectivement les annotations de texture.

Composition musicale assistée par ordinateur : modélisation de tablatures de guitare

Cet axe de mes recherches vise à élaborer des outils d’aide à la composition de musique pour guitare dans le répertoire des musiques actuelles, incluant par exemple la pop, le rock et le jazz, à l’aide de méthodes d’apprentissage automatique. Ces outils sont destinés à être intégrés sous la forme de fonctionnalités dans des logiciels de notation et de production musicale. Ils ont pour objectif d’élargir l’accès à la composition en permettant par exemple au débutant de transformer une partition pour que son style musical se rapproche d’une autre, ou encore d’adapter une partition pour un instrument donné (par exemple le piano) pour qu’elle soit interprétable à la guitare. Ces outils ont par ailleurs vocation à encourager et diversifier la créativité du compositeur confirmé en lui suggérant des orientations qui diffèrent de ses habitudes compositionnelles.

Sur ce sujet, je coordonne le projet ANR JCJC TABASCO (2022 - 2026) et ai initié la collaboration avec l’entreprise Arobas Music, qui nous fournit un accès exclusif pour nos travaux à son corpus de 5000 tablatures (corpus MySongBook). Je co-encadre par ailleurs avec K. Deguernel la thèse d’A. D’Hooge (2022 - 2025) visant à élaborer des algorithmes d’aide à la composition ayant vocation à être intégrés sous la forme de plugins dans des logiciels de notations musicale tels que MuseScore. J’ai encadré le stage M2 de D. Régnier sur la détection de la *fonction musicale* d’une tablature (permettant par exemple de distinguer automatiquement une *partie d’accompagnement* d’un *solo*) [Régnier et al., 2021] ainsi que le stage M2 de Q. Normand (2021) sur la prédiction de techniques de jeux dans les tablatures. J’ai participé avec M. Giraud et Arobas Music à l’encadrement du stage M2 de J. Cournut portant sur le développement d’un parseur de fichiers *Guitar Pro* (format utilisé majoritairement pour l’édition et l’échange de tablatures) et d’une variété d’encodeurs représentant ces tablatures sous la forme de vecteurs binaires facilitant l’application d’algorithmes d’apprentissage automatique [Cournut et al., 2020, Cournut et al., 2021]. En 2022, j’ai élaboré un algorithme pour la continuation d’une tablature par imitation de texture, actuellement en cours de soumission.

Dans le paysage des méthodes algorithmiques pour assister la composition de tablatures de guitare, l’originalité de notre approche réside dans sa contrôlabilité et son objectif d’assister le compositeur et non de le remplacer, ainsi que dans l’utilisation de techniques d’IA modernes entraînées sur un corpus de taille et de qualité inédite. Ce corpus, MySongBook, a été produit par des musiciens professionnels chez Arobas Music à des fins pédagogiques. En comparaison avec d’autres approches en composition musicale assistée par ordinateur, le cadre des tablatures a la particularité

d’ajouter à la partition des informations de gestes (choix de doigtés, emploi de techniques de jeu) qui sont pressenties comme jouant un rôle essentiel dans l’implémentation du style musical.

Co-composition humain-machine Les méthodes élaborées dans ce projet se distinguent dans notre communauté (MIR) par le fait qu’elles visent à *assister la composition dans des tâches ponctuelles*, par exemple la modification de la texture d’une partie d’accompagnement, plutôt qu’à remplacer le compositeur en générant une pièce dans sa totalité. Nous avons suivi cette approche avec quatre autres membres d’Algomus lors de notre participation à l’*AI Song Contest 2020*, compétition internationale dans laquelle des équipes composées d’artistes et de scientifiques produisent une pièce musicale à l’aide de méthodes d’IA. Notre chanson *I Keep Counting* a obtenu la 4e place sur 13 équipes participantes¹⁰ [Micchi et al., 2021].

Techniques de Traitement Automatique du Langage Naturel en musique

Cet axe de recherche est né de discussions avec ma collègue M. Keller (Inria Lille, équipe Magnet), spécialiste du *Traitement Automatique du Langage Naturel* (TALN). Dans la communauté MIR, les approches issues du TALN sont de plus en plus employées pour modéliser l’information musicale, notamment depuis l’essor des techniques d’apprentissage profond. Cette pratique est couramment justifiée par la nature temporelle de la musique, qui facilite sa représentation sous la forme de séquence d’éléments comparable au texte, par un grand nombre de tâches communes entre les deux domaines (génération automatique de contenu, transfert de style, classification stylistique) et enfin par l’hypothèse que la musique constitue une sorte de langage bien que cette vision fasse l’objet d’un large débat dans la communauté musicologique étant donné l’absence de sémantique explicite dans la musique ainsi que sa fonction essentiellement esthétique, subjective par nature.

Ce projet vise à établir une analyse critique de cette pratique en identifiant l’adaptabilité, la performance et les limites de l’utilisation d’approches issues du TALN pour la modélisation d’information musicale. M. Keller et moi-même avons obtenu de la part de notre laboratoire (CRISAL) en 2021 et 2022 un soutien inter-équipe qui a permis de co-encadrer deux stages (G. Loiseau, M1 et M. Kermarec, M2) qui ont chacun aboutit à une publication. Depuis octobre 2022, nous co-encadrons la thèse de D.-V.-T. Le sur ce sujet. En 2022-2023, je coordonne avec D. Herremans un partenariat bilatéral France-Singapour sur ce sujet, qui a financé un séjour de recherche de 10 jours que j’ai effectué en août 2022 dans l’équipe AMAAI de ma collègue, et qui permettra un séjour similaire en 2023 dans l’équipe AMAAI pour notre doctorant D.-V.-T. Le.

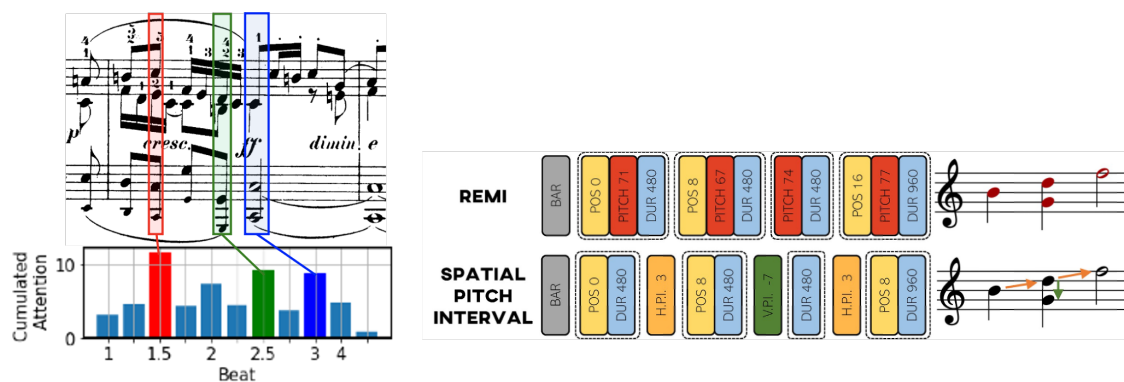


FIGURE 3 – Gauche : extrait de la Fugue n.2 du *Clavier bien tempéré* de J.-S. Bach. L’attention cumulée apparaît plus élevée sur les points de *préparation* de la cadence. Droite : comparaison de la tokenization *REMI* et de notre tokenization invariante par transposition *spatial pitch interval*.

Notre première contribution (stage de G. Loiseau) consiste en **une étude du mécanisme d’auto-attention dans les partitions** [Keller et al., 2021b]. Dans le domaine du TALN pour

10. <http://www.algomus.fr/i-keep-counting/>

lequel il a été originalement conçu, le mécanisme d'attention à la base des réseaux de neurones *transformers*, permet de modéliser des relations grammaticales complexes, par exemple le fait qu'un pronom fasse référence à un nom situé à distance dans la phrase. Nous avons évalué l'aptitude de ce mécanisme à capturer des concepts musicaux haut niveau relatifs au style musical, telles que les cadences (Figure 3, gauche). L'application de méthodes de TALN aux données musicales nécessite généralement de représenter la musique sous forme textuelle, au prix d'une approximation de sa structure, généralement bien plus élaborée que celle du texte dû à ses propriétés rythmiques et polyphoniques, absentes en texte. Partant de ce constat, notre seconde contribution (stage de M. Kermarec) a consisté à proposer une représentation rendant compte explicitement de la relation d'intervalles séparant des notes de musiques, facilitant la généralisation de l'information musicale dans toutes les tonalités [Kermarec et al., 2022p]. La partie droite de la Figure 3 compare la tokenization REMI largement utilisé dans notre communauté (en haut) et la tokenization *Spatial Pitch Interval* que nous avons proposé, qui encode les intervalles entre notes consécutives (H.P.I) et notes simultanées (V.P.I).

Liste de publications

La totalité de mes publications apparaît sur HAL¹¹ et sur ma page web¹². La quasi-totalité est disponible en pdf sur ces pages. Les noms soulignés correspondent aux étudiants que j'ai (co)-encadré.

Six publications majeures

[Couturier et al., 2022a] Couturier, L., Bigo, L., and Levé, F. (2022a). A dataset of symbolic texture annotations in Mozart piano sonatas. In *International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2022)*, Bengaluru, India. https://hal.science/hal-03860195/file/Couturier2022_TextureDataset.pdf

Contribution : Cet article rend compte des travaux effectués par L. Couturier dans la première partie de sa thèse. Un ensemble d'annotations de textures à chaque mesure de 9 mouvements de sonates pour piano de W.A. Mozart est présenté. Les annotations ont été effectuées suivant une syntaxe dédiée à la texture symbolique élaborée dans le cadre du travail de thèse de L. Couturier. L'article détaille par ailleurs des expériences préliminaires consistant à entraîner des modèles pour la prédiction automatique de texture. Avec F. Levé, j'ai co-encadré L. Couturier. J'ai participé avec eux à l'écriture de l'article.

[Régnier et al., 2021] Régnier, D., Martin, N., and Bigo, L. (2021). Identification of rhythm guitar sections in symbolic tablatures. In *International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2021)*, Online, United States. <https://hal.science/hal-03335822/file/regnier-rhythm-guitar.pdf>

Contribution : Cet article présente un algorithme permettant d'identifier si un extrait de tablature de guitare joue un rôle d'accompagnement ou pas. Cette méthode a essentiellement vocation à permettre la séparation d'un corpus d'apprentissage *consistant* pour l'entraînement de modèles dédiés à la composition de parties d'accompagnement. Il s'agit du travail de stage de D. Régnier que j'ai encadré seul. J'ai écrit l'article, après le stage de D. Régnier.

[Keller et al., 2021] Keller, M., Loiseau, G., and Bigo, L. (2021). What Musical Knowledge Does Self-Attention Learn?. In *Workshop on NLP for Music and Spoken Audio (NLP4MuSA 2021)*, Online, United States. https://hal.science/hal-03419236/file/keller_loiseau_bigo_NLP4MuSA.pdf

Contribution : Cet article vise à étudier la performance d'un réseau de neurones Transformer, conçu à l'origine pour des tâches de Traitement Automatique du Langage Naturel (TALN), pour la modélisation de séquences musicales, en particulier l'identification de compositeurs et la détection de cadences. J'ai encadré avec M. Keller le travail de stage de G. Loiseau, qui a abouti à cet article écrit par M. Keller et moi-même.

[Micchi et al., 2021] Micchi, G., Bigo, L., Giraud, M., Groult, R., and Levé, F. (2021). I keep counting : An experiment in human/ai co-creative songwriting. *Transactions of the International Society for Music Information Retrieval (TISMIR)*. <https://hal.science/hal-03399076/file/ikc-tismir.pdf>

Contribution : Cet article décrit la composition, assistée par intelligence artificielle, d'une chanson dans le cadre de la participation de l'équipe Algomus à la compétition internationale *AI Song Contest*, visant à évaluer le potentiel de l'intelligence artificielle pour la composition de musique populaire moderne. Notre équipe a reçue la 4ème place sur 13. J'ai contribué avec chacun des 4 autres auteurs aux recherches et à l'écriture de l'article.

[Bigo et al., 2018] Bigo, L., Feisthauer, L., Giraud, M., and Levé, F. (2018). Relevance of musical features for cadence detection. In *International Society for Music Information Retrieval Conference*

11. https://hal.science/search/index/?q=%2A&authIdHal_s=louis-bigo&sort=producedDate_tdate+desc

12. <https://louisbigo.com/publications>

(*ISMIR 2018*), Paris, France. <https://hal.science/hal-01801060/file/2018-ismir-cadences.pdf>

Contribution : La détection automatique de cadences dans les partitions est vue comme un problème de classification supervisée. La classification s’effectue à l’aide de machines à vecteurs de supports (SVM). La majeure partie du travail correspond au choix et à l’extraction automatique de descripteurs musicaux haut niveau, au paramétrage et à l’évaluation de l’algorithme de classification. Avec M. Giraud et F. Levé, j’ai co-encadré L. Feisthauer. C’est un travail qui avait commencé avant l’arrivée en thèse de L. Feisthauer, et j’ai contribué à la majeure partie de ce code. Nous avons rédigé à quatre cet article.

[Bigo and Andreatta, 2015] Bigo, L. and Andreatta, M. (2015). Topological Structures in Computer-Aided Music Analysis. In Meredith, D., editor, *Computational Music Analysis*, pages 57–80. Springer. https://hal.science/hal-01263349/file/Bigo_et_al_CMA15_chapter.pdf

Contribution : Ce chapitre synthétise la majeure partie de mes travaux de thèse. Il décrit la construction d’espaces de hauteurs sous la forme de complexes simpliciaux, et les méthodes d’analyse et de transformations musicales que fournit ce mode de représentation. J’ai écrit la quasi-totalité de l’article.

Autres publications

Revue internationale

[Allegraud et al., 2019] Allegraud, P., Bigo, L., Feisthauer, L., Giraud, M., Groult, R., Leguy, E., and Levé, F. (2019). Learning Sonata Form Structure on Mozart’s String Quartets. *Transactions of the International Society for Music Information Retrieval (TISMIR)*, 2(1) :82–96.

[Agres et al., 2017] Agres, K., Herremans, D., Bigo, L., and Conklin, D. (2017). Harmonic Structure Predicts the Enjoyment of Uplifting Trance Music. *Frontiers in Psychology*, 7.

[Bigo et al., 2015] Bigo, L., Ghisi, D., Spicher, A., and Andreatta, M. (2015). Representation of Musical Structures and Processes in Simplicial Chord Spaces. *Computer Music Journal*, 39(3) :9 – 24.

[Bigo and Andreatta, 2014] Bigo, L. and Andreatta, M. (2014). A Geometrical Model for the Analysis of Pop Music . *Sonus*, 35(1) :36–48.

[Bigo and Spicher, 2014] Bigo, L. and Spicher, A. (2014). Self-Assembly of Musical Representations in MGS. *International Journal of Unconventional Computing*, 10(3) :219–236.

Conférence internationale avec comité de lecture

[Couturier et al., 2022b] Couturier, L., Bigo, L., and Levé, F. (2022). Annotating Symbolic Texture in Piano Music : a Formal Syntax. In *Sound and Music Computing*, Saint-Etienne, France.

[Cournut et al., 2021] Cournut, J., Bigo, L., Giraud, M., Martin, N., and Régner, D. (2021). What are the most used guitar positions? In *International Conference on Digital Libraries for Musicology (DLfM 2021)*, pages 84–92, Online, United Kingdom.

[Feisthauer et al., 2020] Feisthauer, L., Bigo, L., Giraud, M., and Levé, F. (2020). Estimating keys and modulations in musical pieces. In *Sound and Music Computing Conference (SMC 2020)*, Torino, Italy. Simone Spagnol and Andrea Valle.

[Bigo and Andreatta, 2019] Bigo, L. and Andreatta, M. (2019). Filtration of Pitch-Class Sets Complexes. In *7th International Conference, MCM 2019, Mathematics and Computation in Music*. MCM 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11502. Springer, pages 213–226, Madrid, Spain.

[Feisthauer et al., 2019] Feisthauer, L., Bigo, L., and Giraud, M. (2019). Modeling and learning structural breaks in sonata forms. In *International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2019)*, Delft, Netherlands.

- [Bigo et al., 2017] Bigo, L., Giraud, M., Groult, R., Guiomard-Kagan, N., and Levé, F. (2017). Sketching Sonata Form Structure in Selected Classical String Quartets. In *ISMIR 2017 - International Society for Music Information Retrieval Conference*, Suzhou, China.
- [Bigo and Andreatta, 2017] Bigo, L. and Andreatta, M. (2017). Towards Structural (Popular) Music Information Research. In *European Music Analysis Conference (EuroMAC 2017)*, Strasbourg, France.
- [Agres et al., 2016] Agres, K., Bigo, L., Herremans, D., and Conklin, D. (2016). The Effect of Repetitive Structure on Enjoyment in Uplifting Trance Music. In *International Conference on Music Perception and Cognition*, San-Francisco, United States.
- [Bigo and Conklin, 2015] Bigo, L. and Conklin, D. (2015). A viewpoint approach to symbolic music transformation. In *11th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research (CMMR) 2015*, Plymouth, United Kingdom.
- [Bigo et al., 2014] Bigo, L., Spicher, A., Ghisi, D., and Andreatta, M. (2014). Spatial Transformations in Simplicial Chord Spaces. In *Proceedings ICMC/SMC/2014*, pages 1112–1119, Athens, Greece. **Best paper award**
- [Bigo et al., 2013a] Bigo, L., Giavitto, J.-L., Andreatta, M., Michel, O., and Spicher, A. (2013a). Computation and Visualization of Musical Structures in Chord-Based Simplicial Complexes. In Yust, J., Wild, J., and Burgoyne, J. A., editors, *MCM 2013 - 4th International Conference Mathematics and Computation in Music*, volume 7937 of *Lecture notes in computer science*, pages 38–51, Montreal, Canada. Springer.
- [Bigo et al., 2013b] Bigo, L., Giavitto, J.-L., and Spicher, A. (2013b). Spatial Programming for Musical Transformations and Harmonization. In *Spatial Computing Workshiop (SCW)*, AAMAS satellite workshop W09, pages p. 9–16, Saint-Paul, Minesota, United States.
- [Garcia et al., 2013] Garcia, J., Bigo, L., Spicher, A., and Mackay, W. E. (2013). PaperTonnetz : Supporting Music Composition with Interactive Paper. In *Extend Abstract on Human Factors in Computing Systems*, Paris, France.
- [Bigo et al., 2012] Bigo, L., Garcia, J., Spicher, A., and Mackay, W. E. (2012). PaperTonnetz : Music Composition with Interactive Paper. In *Sound and Music Computing*, Copenhagen, Denmark.
- [Bigo et al., 2011a] Bigo, L., Giavitto, J.-L., and Spicher, A. (2011a). Building Topological Spaces for Musical Objects. In *Mathematics and Computation in Music*, pages 1–1, Paris, France. cote interne IRCAM : Bigo11c.
- [Bigo et al., 2010] Bigo, L., Spicher, A., and Michel, O. (2010). Spatial Programming for Music Representation and Analysis. In *Spatial Computing Workshop 2010*, pages 1–1, Budapest, Hungary. cote interne IRCAM : Bigo10b.

Livres et chapitres de livre

- [Agres et al., 2019] Agres, K., Bigo, L., and Herremans, D. (2019). The impact of musical structure on enjoyment and absorptive listening states in trance music. In *Music and Consciousness 2 : Worlds, Practices, Modalities*. Oxford University Press.
- [Bigo and Andreatta, 2015] Bigo, L. and Andreatta, M. (2015). Topological Structures in Computer-Aided Music Analysis. In Meredith, D., editor, *Computational Music Analysis*, pages 57–80. Springer.

Autres publications internationales (posters, articles courts)

- [Kermarec et al., 2022p] Kermarec, M., Bigo, L., and Keller, M. (2022). Improving Tokenization Expressiveness With Pitch Intervals. 23rd International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2022), Late-Breaking Demo Session. Poster.
- [Couturier et al., 2021p] Couturier, L., Bigo, L., and Levé, F. (2021). Characterizing Texture for Symbolic Piano Music. Digital Music Research Network (DMRN+16), Londres. Poster.

- [Feisthauer et al., 2019p] Feisthauer, L., Bigo, L., Giraud, M., Levé, F. (2019). Vers une recherche automatisée du parcours tonal. *Les sciences de la musique*, Paris. Poster.
- [Feisthauer et al., 2019p2] Feisthauer, L., Bigo, L., Giraud, M., Levé, F. (2019). Modelling Keys and Modulations with Scales and Harmonic Progressions. *Digital Music Research Network Workshop (DMRN+14)*, Londres. Poster.
- [Conklin and Bigo, 2015] Conklin, D. and Bigo, L. (2015). Trance generation by transformation. In *8th International Workshop on Machine Learning and Music*, Vancouver, Canada.
- [Agres et al., 2015] Agres, K. and Bigo, L. (2015). The effect of repetitive structure on enjoyment and altered states in uplifting trance music. In *2nd International Conference on Music and Consciousness*, Oxford.
- [Bigo and Conklin, 2014] Bigo, L., Conklin, D. (2014). Music Generation using Harmonic Transformations. *Digital Music Research Network Workshop*, Londres. Poster.
- [Bigo, 2014p] Bigo, L. (2014). HexaChord : Analyse musicale et complexes d'accords. *Journées d'Analyse Musicale*, Paris
- [Bigo, 2013] Bigo, L. (2013). Spatial representations and transformations of musical sequences. *Digital Music Research Network Workshop*, Londres. Poster.
- [Bigo et al., 2011p] Bigo, L., Spicher, A., and Michel, O. (2011). Two Representations of Music Computed with a Spatial Programming Language *New Worlds of Computation*, Orléan, France
- [Bigo, 2014] Bigo, L. (2014). MCM13 : The Fourth International Conference on Mathematics and Computation in Music. *Computer Music Journal*, 38(3) :76–77. Rapport de conférence.

Revues nationales

- [Bigo et al., 2014] Bigo, L., Spicher, A. (2014). Construction et Manipulation de Collections Topologiques pour les Représentations Musicales. *Techniques et Sciences Informatiques*, 33(7-8) :627 – 650.

Conférence nationales avec comité de lecture

- [Keller et al., 2021a] Keller, M., Aksebi, K., Moreira, L., and Bigo, L. (2021a). Techniques de traitement automatique du langage naturel appliquées aux représentations symboliques musicales. In *JIM 2021 - Journées d'Informatique Musicale*, Virtual, France.
- [Cournut et al., 2020] Cournut, J., Bigo, L., Giraud, M., and Martin, N. (2020). Encodages de tablatures pour l'analyse de musique pour guitare. In *Journées d'Informatique Musicale (JIM 2020)*, Strasbourg (en ligne), France.
- [Karystinaios et al., 2020] Karystinaios, E., Guichaoua, C., Andreatta, M., Bigo, L., and Bloch, I. (2020). Musical genre descriptor for classification based on Tonnetz trajectories. In *Journées d'Informatique Musicale*, Strasbourg, France.
- [Bigo et al., 2011b] Bigo, L., Spicher, A., and Michel, O. (2011b). Différentes utilisations de l'espace en musique à l'aide d'un langage de programmation dédié au calcul spatial. In *Journées d'Informatique Musicale*, Saint-Etienne, France.

Rapports de recherche

- [Bigo and Conklin, 2016] Bigo, L. and Conklin, D. (2016). Four-part chorale transformation by harmonic template voicing. Rapport de recherche, Universidad del País Vasco.
- [Bigo and De Gérando, 2017] Bigo, L. and De Gérando, S. (2017). Invention algorithmique du matériau compositionnel : les séries tous intervalles dans une octave et en zigzag (STIOZ), les séries tous intervalles imbriqués dans une série micro-intervallique (STISMI). Rapport de recherche, 3icar icarEditions.

Thèse et habilitation

- [Bigo, 2013] Bigo, L. (2013). *Représentations symboliques musicales et calcul spatial*. Theses,

Université Paris-Est.

[Bigo, 2023] Bigo, L. (2023). *Modeling Musical Score Languages*. HdR, Université de Lille.

4 Projet de recherche

Intelligence Artificielle musicale : texture, geste et partitions

Mon projet de recherche porte sur l'élaboration d'outils informatiques dédiés à l'analyse et la composition musicale. Le premier axe vise à élaborer des méthodes pour *assister la composition musicale dans des situations ponctuelles*, qu'on approchera en premier lieu à travers la notion de *texture dans les partitions*, à l'aide de techniques d'apprentissage automatique. Cet axe aura vocation à aboutir à des outils qui seront expérimentés par des compositeurs. Le second axe vise à réunir la modélisation informatique de partitions et celle du geste instrumental associé à l'interprétation de la partition ou à sa composition. Cette modélisation conjointe fournira un cadre pour *l'estimation de difficulté d'une partition* ainsi que *l'étude du style musical dans les partitions informée par le geste instrumental*. Le troisième axe est plus théorique et consiste à étudier l'aptitude de techniques et pratiques en apprentissage automatique à s'adapter à la structure complexe et singulière de la musique. Nous mènerons des expériences dans ce cadre sur les *architectures de réseaux de neurones*, ainsi que sur *l'augmentation de données*.

Ce projet s'intègre naturellement dans les activités scientifiques et artistiques du **SCRIME** (*Studio de création et de recherche en informatique et musiques expérimentales*). À horizon 2026, mon projet est largement lié au projet ANR TABASCO (2022 - 2026) dont je suis le coordinateur, et aux thèses entamées que je co-encadrerai jusqu'en 2025 (L. Couturier) et 2026 (A. D'Hooge et D.-V.-T. Le). Les axes détaillés ci-dessous proposent l'élargissement et la continuité de ces projets en collaboration avec des membres de l'équipe Traitement et Analyse de Données du département Image et Son du LaBRI, de l'équipe Makutu d'INRIA Bordeaux et d'artistes et scientifiques du SCRIME.

4.1 Modélisation de la *texture symbolique* pour l'aide à la composition

Projet long terme Mon projet inclut l'élaboration de méthodes informatiques pour assister la composition musicale. D'une part, ces méthodes ont vocation à élargir et faciliter l'accès à la composition, y compris auprès de musiciens n'ayant que peu ou pas d'expérience en pratique instrumentale¹³. D'autre part, ces outils ont vocation à s'adresser à des musiciens confirmés en leur suggérant des solutions se distinguant de leurs habitudes compositionnelles. Ce projet porte essentiellement sur des répertoires musicaux faisant généralement l'objet d'un large public, comme la pop, le rock ou le jazz et la musique classique.

Contrastant avec une large part des travaux actuels de la communauté *Music Information Retrieval* dans le champ de la génération automatique de musique, les outils élaborés dans le cadre de ces recherches n'ont pas vocation à remplacer, ou rivaliser avec le compositeur, mais plutôt à faciliter l'expression de sa créativité en l'assistant ponctuellement sur des tâches constitutives du processus de composition, par exemple la notation, l'harmonisation, l'orchestration, ou tout autre tâche relevant de l'arrangement musical sur lesquels le compositeur manque d'inspiration, de compétences ou tout simplement d'intérêt. Ces tâches ont par ailleurs l'avantage de pouvoir se décrire de manière plus précise que le processus global de composition, ce qui facilite leur formulation sous la forme de problèmes d'apprentissage automatique, que j'emploierai majoritairement dans ce projet.

Imitation de texture Dans les prochaines années, mon projet portera essentiellement sur la composition de la *texture symbolique*, qui correspond à l'organisation des notes et des voix dans la partition, en s'appuyant sur les résultats des travaux de thèse de L. Couturier et A. D'Hooge dans les cas du piano et de la guitare. Ces approches auront par la suite vocation à être généralisées à

13. Cet objectif est analogue à celui de *MidiFilePerformer*, développé par des membres du SCRIME, dans le domaine de la performance musicale [Chabassier et al., 2021] (<https://www.youtube.com/watch?v=0hD1WxA6S1Y>)

d'autres instruments représentatifs du répertoire des musiques actuelles, en particulier la guitare basse et les percussions.

Le premier objectif porte sur l'élaboration de modèles génératifs proposant des partitions de partie d'accompagnement qui suivent une séquence d'accords arbitraire et imitent une texture de référence. L'utilisateur de telles méthodes fournit la séquence d'accords de manière explicite et indique la texture à imiter en faisant référence à une pièce musicale tierce ou au passé de la composition en cours. La disponibilité dans notre communauté de corpus de partitions multi-instruments étiquetées par des symboles d'accord (DadaGp, POP909) permet d'adresser l'imitation de texture à l'aide de méthodes d'apprentissage supervisé et non supervisé. Nous utiliserons en particulier les réseaux de neurones LSTM et *transformers* qui seront entraînés à reproduire des textures en étant conditionnés par une séquence d'accords. Nous expérimenterons également les auto-encodeurs variationnels dont l'entraînement non supervisé produiront des espaces de texture organisés dans lesquels le compositeur pourra naviguer de manière intuitive, dans la lignée de travaux récents dans le domaine audio [Esling et al., 2018].

Poursuivant l'intuition d'une analogie entre texture musicale et image, je souhaite également élaborer des méthodes inspirées par le domaine de la colorisation, dans lequel une image arbitraire en nuance de gris est colorisée par imitation des couleurs d'une image de référence, tâche pour laquelle M. Clement et A. Bugeau (équipe TAD, LaBRI) élaborent des architectures de réseaux de neurones dédiées [Camilo et al., 2022]. Je souhaite par ailleurs que cette collaboration permette une réflexion commune sur le principe de *retouche* qui est adressé par M. Clement et A. Bugeau [Coloma et al., 2022] pour la restauration de régions détériorées, qui je pense peut s'adapter au cadre d'une partition dont le compositeur souhaite modifier la texture d'une région en accord avec son contexte (passé, futur, autres instruments).

Implémentation d'outils L'élaboration d'outils fonctionnels implémentant ces méthodes s'appuiera sur les résultats d'une étude que je coordonne en 2023-2024 dans le cadre du projet TABASCO, visant à spécifier les fonctionnalités, en terme d'objectif et d'interface, pouvant bénéficier au compositeur au sein de logiciels dédiés à la composition, en particulier les logiciels de notation et de production musicale. Essentiel dans un cadre d'utilisation par des compositeurs, une attention particulière sera accordée au rendu sonore proposé par ces outils. Je souhaite que ce rendu sonore puisse bénéficier des travaux de T. Vanhatalo et P. Legrand (Université de Bordeaux, IMB) sur la modélisation de non-linéarités dans les systèmes d'amplification de guitare électrique [Vanhatalo et al., 2022]. De manière analogue, les rendus de texture pianistique pourront être améliorés à l'aide des modèles physiques proposés par J. Chabassier (INRIA Bordeaux, équipe MAKUTU), aujourd'hui utilisés dans le logiciel PianoTeq [Chabassier et al., 2013].

Impact Les algorithmes d'aide à la composition de texture ont vocation à bénéficier aux logiciels dédiés à la composition musicale, libres ou commerciaux, tels que MuseScore ou Guitar Pro. Mon projet est par ailleurs en alignement avec les activités de la startup *Symbals* qui regroupe deux enseignants chercheurs du LaBRI en disponibilité, P. Hanna et M. Robine. Cette startup constitue une opportunité pour le transfert industriel de technologies développées dans le cadre de mon projet. Enfin, je souhaite que ces outils puissent être expérimentés, et si possible utilisés dans des cadres de composition réelle, par des compositeurs et enseignants constituant le réseau artistique et pédagogique du SCRIME, en particulier les écoles de musique Rock & Chansons ainsi que le CIAM (voir Section 5).

4.2 Modélisation conjointe geste/partition

En collaboration avec J. Chabassier et A. Ernout de l'équipe MAKUTU d'INRIA Bordeaux, cet axe de mon projet de recherche porte sur l'étude conjointe de la partition et de la performance musicale.

Projet long terme Nous souhaitons avec J. Chabassier et A. Ernoult étudier les actes d'*interprétation instrumentale de partition* et de *composition musicale sur instrument* en les plaçant dans un contexte disciplinaire élargi. D'une part, l'interprétation instrumentale d'une partition s'étudiera à travers l'acte de performance *complété* par le contexte de la partition qui est interprétée. D'autre part, la composition musicale sur instrument s'étudiera à travers la partition qui en résulte *complétée* par des informations de pratique propre à l'instrument en question.

Modélisation de la difficulté technique des partitions Le premier objectif de cet axe consistera en l'élaboration d'un modèle d'apprentissage automatique estimant la difficulté d'interprétation d'une partition. La difficulté d'interprétation relève de facteurs variés. Au niveau de l'instrument, les différentes notes et positions varient en facilité gestuelle, notamment pour des raisons de doigtés ou de production de souffle dans le cas des instruments à vent [Huron and Berec, 2009]. La difficulté résulte également de la manière dont doivent *s'enchaîner* ces gestes.

Nos modèles de prédiction de difficulté seront entraînés et évalués à l'aide d'un corpus de partitions comprenant des indicateurs de difficulté au cours du temps. Les corpus de partitions dans la communauté MIR comprenant rarement ce type d'information, nous prévoyons de constituer nous même ce jeu de données à partir de manuels et plateformes pédagogiques, qui organisent les partitions par degré de difficulté, ainsi que via des rencontres avec des instrumentistes et des enseignants dans le réseau du SCRIME. La constitution d'un tel corpus et son exploitation dans un cadre d'apprentissage automatique se situe dans mon domaine de compétences. La diffusion de ce corpus constituera une contribution inédite dans la communauté MIR pour ce champ de recherche. La difficulté d'interprétation résultant d'un enchaînement de gestes, nous utiliserons en priorité des modèles dédiés aux données séquentielles, comprenant des couches de *récurrence* (GRU, LSTM) et d'*attention* (*transformers*), auxquels seront fournis en entrée des encodages séquentiels de partitions initialement décrites dans des formats symboliques type MusicXML. La représentation des partitions fournies en entrée du modèle pourra par ailleurs être enrichie par le principe de *s-mot* [Desainte-Catherine et al., 2022] qui offre un formalisme original pour la modélisation de l'espace des interprétations possibles d'une partition.

Nos modèles d'apprentissage seront comparés à des modèles *rule-based* qui estimeront la difficulté d'une partition à partir de la dérivée temporelle de l'évolution des paramètres gestuels du musicien, que nous distinguerons en deux catégories. Les *paramètres gestuels annotés* (doigtés, techniques de jeux) sont directement accessible depuis la partition. Les *paramètres gestuels non annotés* (force d'appui des lèvres, pression buccale) nécessitent au contraire pour être estimés l'utilisation de modèles acoustiques dont la constitution et l'interprétation se situent dans les domaines de compétence de J. Chabassier et A. Ernoult. Nous utiliserons en particulier des modèles indiquant pour un instrument donné l'évolution des *plages de geste*, plus ou moins étroites, qu'impose l'interprétation d'une série de notes constituant une partition [Colinot et al., 2021]. La Figure 4 synthétise l'approche que nous proposons pour adresser l'estimation de difficulté de partition.

Dans la lignée de ces travaux, je souhaite expérimenter l'utilisation de modèles génératifs en intelligence artificielle pour transformer une partition musicale de façon à modifier sa difficulté d'interprétation en veillant à en préserver au maximum son orientation stylistique. Nous entraînerons pour cela des réseaux de neurones *autoencodeurs* à reconstruire des fragments de partitions, en conditionnant la phase de décodage par l'indication de difficulté du fragment. Ce mécanisme aura vocation à encourager l'encodeur à s'abstraire de la notion de difficulté, et de permettre à l'inférence un décodage du fragment paramétré par un niveau de difficulté arbitraire.

Impact L'estimation et l'ajustement de la difficulté d'interprétation d'une partition offrent des perspectives dans le domaine de la pédagogie musicale dans lequel enseignants et apprenants sont continuellement confrontés à ces questions. Je souhaite que nos méthodes puissent être expérimentées par des écoles de musique, en particulier *Rock & Chanson* et le CIAM qui ont déjà collaboré avec le SCRIME.

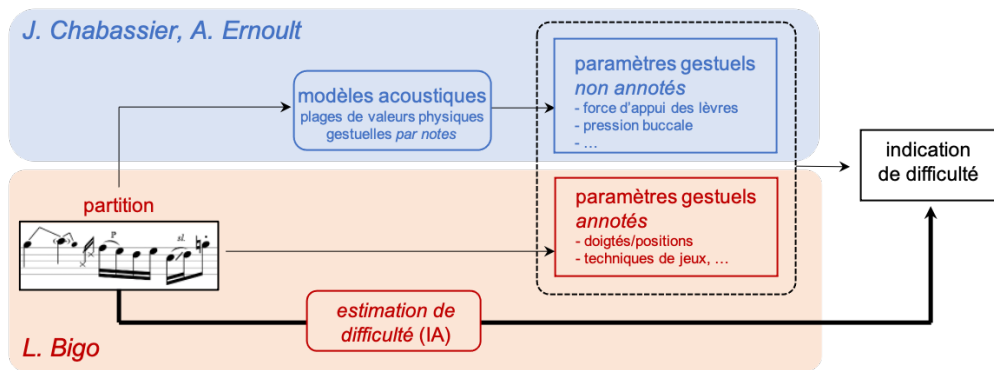


FIGURE 4 – Estimation de la difficulté d’interprétation d’une partition. L’estimation par IA nécessite l’entraînement d’un modèle sur un corpus de partitions étiquetées. L’estimation *rule-based* se base explicitement sur une représentation gestuelle de la partition construite en partie à l’aide de modèles acoustiques.

Les entreprises produisant des outils informatiques dédiés à l’apprentissage de l’instrument, comme Arobas Music avec le logiciel Guitar Pro, manifestent leur besoin de tels outils afin d’orienter les systèmes de recommandations de partitions et permettre à leurs partitions de couvrir un ensemble d’utilisateurs plus large.

Perspectives Les recherches que je souhaite entamer avec J. Chabassier et A. Ernoult sur l’estimation et l’ajustement de difficulté de partition ont vocation à ouvrir des applications plus larges autour de la modélisation geste/partition. Dans la lignée de mes travaux passés, je souhaite élaborer des méthodes pour l’étude du style musical des partitions dans le contexte des interactions musicien/instrument qui les conditionnent. Par exemple, la facilité d’enchaînement de trois notes données sur un certain instrument, pour des raisons de géométrie de l’instrument, peut donner lieu à une prépondérance de cet enchaînement dans le répertoire, et donc sur tout un style musical. Les compétences de J. Chabassier et A. Ernoult en pratique instrumentale, touchant aux champs de la facture et de l’acoustique, permettront d’établir des approches formelles pour l’interprétation de ces idiomatismes gestuels constitutifs du style musical.

Mes compétences en apprentissage automatique ont par ailleurs vocation à enrichir les approches de J. Chabassier et A. Ernoult dans différentes tâches d’acoustique musicale. Nous pressentons un potentiel particulièrement fort de l’apprentissage automatique pour adresser le *problème inverse*, consistant à reconstituer les paramètres physiques caractérisant l’interaction musicien/instrument (force d’appui des lèvres, pression buccale, etc.) en partant du signal acoustique résultant accompagné d’informations sur la géométrie de l’instrument.

4.3 Techniques d’apprentissage automatique en représentations symboliques musicales

L’apprentissage automatique constitue dans mon projet l’approche privilégiée pour la modélisation du style musical dans des cadres d’analyse comme de composition. Mon projet de recherche s’intègre par conséquent dans l’axe transverse IA du LaBRI. Je compte notamment sur cet axe pour me rapprocher de membres de l’équipe BKB du département Systèmes et données, qui travaillent autour des humanités numériques et l’IA explicable.

Dans un cadre plus théorique que les précédents, le dernier axe de mon projet de recherche a pour objectif d’élaborer des techniques d’apprentissage automatique dédiées à la spécificité de l’information musicale. Nous nous pencherons en particulier sur les architectures de réseaux de

neurones et le principe d’augmentation de données, dont je souhaite expérimenter des approches inédites dans le cadre des deux précédents axes de recherche.

Architectures dédiées Une large part des travaux en traitement d’information musicale emprunte des techniques algorithmiques à d’autres domaines comme le traitement d’image ou du langage naturel. Pour pouvoir appliquer des algorithmes issus de ces domaines, il est généralement nécessaire d’adapter, voir de déformer/simplifier la manière singulière dont est structurée l’information musicale en temps et hauteurs. Dans la lignée des travaux de thèse de D.-V.-T. Le, cet axe de mon projet vise à concevoir des architectures de réseaux de neurones dédiées à la spécificité de la musique, en particulier sa précision sur le plan temporelle, induite par le phénomène du rythme, et son caractère polyphonique, induite par la simultanéité potentielle des notes. Les premières expériences viseront à élargir le mécanisme d’attention mutuelle des modèles *transformers* afin qu’il rende compte de positionnements relatifs dans l’échelle des hauteurs musicales en plus des positionnements structurels dans les séquences fournies aux modèles suivant des résultats récents sur le sujet [Guo et al., 2023].

Augmentation de données Le traitement informatique de représentations symboliques musicales met généralement en jeu des corpus de données de taille limitée et des annotations expertes sur ces données qui sont coûteuses à produire. La modélisation de données symboliques musicales met ainsi régulièrement en jeu le principe d’augmentation de données, qui vise à produire des données synthétiques facilitant l’entraînement des algorithmes d’apprentissage automatique. Bien que n’ayant pas pour l’instant de projet court terme sur ce sujet, je souhaite mettre en commun ces réflexions avec les membres de l’équipe TAD, en particulier Nicholas Journet, dont l’augmentation de données et l’apprentissage sur des données et annotations en quantité limitée constituent un axe de recherche central.

Impact Ce projet a l’ambition d’encourager un usage plus raisonné des techniques d’apprentissage automatique sur des données musicales dans la communauté scientifique du *Music Information Retrieval*.

5 Projet pour le SCRIME

Depuis plus de 20 ans, le SCRIME regroupe des scientifiques et artistes autour de projets conjoints recherche/création dans le cadre d'une structure qui a aujourd'hui la forme d'un groupement d'intérêt scientifique et artistique, labélisé plateforme de recherche de l'Université de Bordeaux.

Bénéfices mutuels avec les équipes du LaBRI

Le SCRIME représente une opportunité pour toute équipe de recherche du LaBRI dont les compétences et spécialités peuvent intervenir au cours du processus de création d'une oeuvre artistique. Je souhaite que le SCRIME acquière une visibilité optimale sur les projets de recherche des équipes du LaBRI afin de pouvoir sensibiliser les chercheurs et artistes de son réseau sur les collaborations arts et sciences qui peuvent en découler. Les travaux des équipes dans les domaines des interactions humain machine (MANAO, POTIOC), des humanités numériques et de l'IA explicable (BKB), de l'IA, des données autour de l'image et de la vidéo (TAD) me semblent avoir un important potentiel pour des projets de création musicale.

Intensifier et élargir le réseau du SCRIME

Je souhaite par ailleurs intensifier et élargir le réseau du SCRIME, en particulier avec des lieux similaires de création, en particulier l'Ircam, qui constitue un acteur majeur et historique dans le domaine de la recherche pour la création musicale. La réalisation de ma thèse à l'Ircam m'a permis de créer des liens que je conserve aujourd'hui, en particulier avec l'équipe Représentations Musicales et une variété de projets de recherche allant de la co-improvisation musicale humain/machine (G. Assayag) au suivi de partitions (J.-L. Giavitto). Je souhaite que le réseau du SCRIME bénéficie également des collaborations que j'entretiens actuellement avec le CREAA (Centre de Recherche et d'Expérimentation sur l'Acte Artistique, M. Andreatta) à l'Université de Strasbourg ainsi que l'équipe AMAAI (Audio, Music, Affective computing and AI team, D. Herremans) de l'Université de technologie et design de Singapour. Je souhaite enfin poursuivre et intensifier le réseau du SCRIME dans le milieu industriel (Simbals, Arobass Music) et pédagogique (Rock et Chansons, CIAM). J'espère enfin pouvoir établir des échanges entre les résidences artistiques du SCRIME et celles de l'Ircam, ainsi qu'avec celles qui auront lieu dans l'équipe lilloise Algomus dans les années à venir.

Présence du SCRIME dans les domaines de la pédagogie, des musiques actuelles et expérimentales

Le SCRIME constitue un cadre privilégié pour l'expérimentation des approches informatiques décrites dans mon projet de recherche, dans des cadres de créations réelles, dans le champ des musiques contemporaines, en particulier celui de la musique électro-acoustique, comme dans celui des musiques actuelles (musique populaire, rock, jazz) associées à un large public et que je souhaite particulièrement promouvoir dans mes recherches. Dans le champ des musiques actuelles, le SCRIME collabore depuis plusieurs années sur le plan pédagogique avec l'école de musique Rock & Chansons. Je souhaite renforcer cette collaboration, notamment en organisant des événements visant à communiquer sur les outils ainsi que sur les manifestations scientifiques et culturelles du SCRIME auprès des membres de cet institut. Je souhaite également proposer une connexion analogue avec CIAM, centre de formation professionnelle des métiers de la musique et du spectacle vivant. Dans l'esprit de l'AI Song Contest auquel j'ai participé avec Algomus en 2020 et dans la continuité des résidences artistiques de l'académie MIXTE portées par le SCRIME et l'ensemble Proxima Centauri, je souhaite promouvoir à l'échelle régionale et nationale l'organisation de rencontres et d'événements culturels visant à encourager l'emploi de technologies issues de recherches en informatique et acoustique musicale, en particulier celles développées au SCRIME.

Je souhaite également renforcer les collaborations entre scientifiques et compositeurs dans le milieu de la musique électro-acoustique, qui contribuent à la renommée du SCRIME. Ce répertoire fait généralement l’objet de démarches compositionnelles variées et pointues, par exemple la recherche et l’organisation des sons en musique concrète ou les besoins de contrôle de la spatialisation (J.-M. Rivet, SCRIME), ou encore l’invention de systèmes de notation musicale originaux pour la description des sons (J.-L. Di Santo, SCRIME). Je pense que le SCRIME peut fortifier la visibilité de ces initiatives, en encourageant par exemple leur présentation aux *Journées d’Informatique Musicale*.

Positionnement en Intelligence Artificielle

L’intelligence artificielle va très probablement entraîner un renouveau fondamental dans les pratiques de composition et de performance musicale dans les années à venir, ainsi que dans la conception de technologies liées à la musique dans le monde industriel. Je souhaite que le SCRIME soit positionné de manière privilégiée dans ce renouveau, en encourageant par exemple ses interactions avec les membres de l’axe transverse IA du LaBRI et à travers des collaborations extérieures avec les laboratoires spécialisés en intelligence artificielle musicale (Ircam, Algomus).

Structuration du SCRIME

Dans la perspective des départs de M. Desainte-Catherine et de G. Kurtag, je suis prêt à participer à une réflexion collective sur l’évolution de la structure et de l’organisation du SCRIME, afin de poursuivre et amplifier son rayonnement national et international, dans les sphères de la production artistique, de l’industrie musicale ainsi que dans les communautés académiques des différentes disciplines scientifiques dans lesquelles se situent ses travaux de recherche.

Références

- [Camilo et al., 2022] Camilo, H., Clément, M., and Bugeau, A. (2022). Super-attention for exemplar-based image colorization. In *Proceedings of the Asian Conference on Computer Vision*, pages 4548–4564.
- [Chabassier et al., 2013] Chabassier, J., Chaigne, A., and Joly, P. (2013). Modeling and simulation of a grand piano. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(1) :648–665.
- [Chabassier et al., 2021] Chabassier, J., Desainte-Catherine, M., Haury, J., Pobel, M., and Serpette, B. P. (2021). Midifileperformer : a case study for chronologies. In *Proceedings of the 9th ACM SIGPLAN International Workshop on Functional Art, Music, Modelling, and Design*, pages 13–22.
- [Colinot et al., 2021] Colinot, T., Vergez, C., Guillemain, P., and Doc, J.-B. (2021). Multistability of saxophone oscillation regimes and its influence on sound production. *Acta Acustica*, 5 :33.
- [Coloma et al., 2022] Coloma, B., Aurelie, B., Samuel, H., Simone, P., and Patricia, V. (2022). An analysis of generative methods for multiple-image inpainting.
- [Desainte-Catherine et al., 2022] Desainte-Catherine, M., Durand, I., Haury, J., Serpette, B. P., and Schwer, S. (2022). Algebraic Framework for Design and Qualitative Evaluation of Interactive Musical Systems Temporality. In *Sound and Music Computing*, Saint-Etienne, France.
- [Esling et al., 2018] Esling, P., Bitton, A., et al. (2018). Generative timbre spaces : regularizing variational auto-encoders with perceptual metrics. *Proceedings of the 21st International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-18)*.
- [Guo et al., 2023] Guo, Z., Kang, J., and Herremans, D. (2023). A domain-knowledge-inspired music embedding space and a novel attention mechanism for symbolic music modeling. In *Proceedings of the 37th AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Washington DC. AAAI, AAAI.

- [Huron and Berc, 2009] Huron, D. and Berc, J. (2009). Characterizing idiomatic organization in music : A theory and case study of musical affordances.
- [Vanhatalo et al., 2022] Vanhatalo, T., Legrand, P., Desainte-Catherine, M., Hanna, P., Brusco, A., Pille, G., and Bayle, Y. (2022). A review of neural network-based emulation of guitar amplifiers. *Applied Sciences*, 12(12) :5894.