



HAL
open science

Capture, analyse et modélisation de processus audio numérique en musicologie

Pierre Couprie

► **To cite this version:**

Pierre Couprie. Capture, analyse et modélisation de processus audio numérique en musicologie. Journées d'informatique musicale, PRISM-CNRS, May 2024, Marseille, France. pp.104-112. hal-04571495

HAL Id: hal-04571495

<https://hal.science/hal-04571495v1>

Submitted on 7 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

CAPTURE, ANALYSE ET MODELISATION DE PROCESSUS AUDIONUMERIQUES EN MUSICOLOGIE

Pierre Couprie

RASM-CHCSC Université Paris-Saclay

pierre.couprie@univ-evry.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente le développement de la version 6 du logiciel iAnalyse, qu'il met en perspective avec notre pratique de la musicologie numérique. Le contexte scientifique est décrit à partir de la mutation de l'écoute et de l'analyse musicales en régime numérique, de la difficulté à saisir des corpus audio à travers leurs traces et artefacts, de la définition de la musicologie numérique à partir de ses workflows et de l'articulation entre les méthodes et les outils au niveau de l'analyse et de l'informatique. Nous proposons la notion de « processus musicologiques », permettant de formuler ces workflows dans un contexte scientifique et dans une dynamique performative de la musicologie, c'est-à-dire la partie de la musicologie qui agit sur l'acte créatif. Les processus constituent le cœur même du développement de l'application iAnalyse 6 afin d'offrir au musicologue un logiciel adapté à ses méthodes, de l'enregistrement de performances à leurs médiations scientifiques et artistiques.

1. INTRODUCTION

Comme le rapporte l'anthropologue Philippe Descola, l'humain, par un « mouvement de mondiation », « produit un monde au sens propre » [13]. Pour le musicologue, cette « mondiation » concerne l'objet musical¹ créé par l'artiste à travers une pratique de composition, d'interprétation ou d'improvisation, et c'est à lui qu'il appartient d'en révéler le sens, la structure. Le sens d'un objet musical se situe à quatre niveaux :

1. celui de son élaboration étudiée à travers le processus de sa création ou de son interprétation ;
2. celui qui naît à l'intérieur de l'objet, la structure interne constituée par la configuration de ses paramètres. Il existe de nombreuses méthodes d'analyse permettant d'étudier cet aspect de l'objet musical ;
3. sa relation avec les autres objets au sein d'un réseau de la même œuvre ou, d'une manière diachronique,

en reliant différents objets élaborés dans le temps dans des œuvres, des performances ou des esquisses différentes. Il s'agit de cette « configuration » dont parle Michel Foucault [15] et qui fait apparaître des objets éloignés comme « [...] juxtaposés, opposés, impliqués l'un par l'autre ». Cet aspect correspond aussi de ce que nous avons étudié lors de sessions d'improvisations réparties sur une dizaine d'années [5] ou encore aux travaux de Georgina Born [3] à partir des écrits d'Alfred Gell ;

4. enfin, celui de son commentaire car le sens est aussi présent dans ce qui décrit et analyse l'objet. À travers la relation entre l'œuvre ou la performance et son commentaire, le musicologue devient un agent de l'objet musical, modifiant ainsi la manière dont il est perçu. Il est aussi possible que l'artiste change son regard sur son propre travail, ce qui constitue la forme « performative » de la musicologie. La recherche-crédation illustre parfaitement cette dimension.

Dans cet article, nous allons décrire la manière dont nous concevons l'étude d'un objet musical numérique à travers la version 6 du logiciel iAnalyse². Nous allons montrer comment les objets musicaux créés avec le numérique ont profondément modifié la pratique de la musicologie au point de provoquer une rupture épistémologique [9]. La première partie traitera des environnements théoriques en décrivant les nouvelles pratiques musicologiques. Dans la deuxième partie, nous présenterons la manière dont nous intégrons ces nouvelles pratiques dans le développement du logiciel.

2. L'ENVIRONNEMENT THEORIQUE

2.1. Audionumérique et musicologie

Il y a près de 25 ans, Peter Szendy [19] a probablement été l'un des premiers à mesurer l'ampleur du bouleversement du numérique sur l'écoute. Selon lui, la numérisation n'a pas seulement modifié la couleur des

¹ L'objet musical concerne ici tout élément constituant une œuvre ou un fragment, une interprétation, une performance ou un ensemble de performances improvisées, etc.

² La version 6 d'iAnalyse sera disponible en version bêta à la fin de l'année 2024. En attendant, il est possible de télécharger la version 5 : <http://ianalyse.pierrecouprie.fr>.

sons, elle a également modifié nos modes d'écoute, qui ont évolué de la pratique habituellement basée sur un déroulement linéaire du temps vers sa fragmentation. Si cette fragmentation peut être perçue comme le reflet d'une pratique consumériste de *zapping*, nous avons plutôt tendance à croire qu'elle a favorisé l'écoute comparative – dans un même enregistrement ou entre des enregistrements différents – et sa forme performative, soit la lecture/synthèse granulaire ou concaténative.

Il s'avère que l'écoute en régime numérique est devenue une activité, sinon la principale activité, du musicologue. Le scientifique ne travaille plus qu'avec des sources numériques, qu'elles aient été créées numériquement ou qu'elles soient le résultat d'une numérisation. Quel que soit le matériau étudié (partition, audio, vidéo, texte, manuscrit, iconographie, etc.), celui-ci se présente sous la forme d'objets dont la nature numérique est totalement transparente au scientifique. En

réalité, comme nous allons le voir plus loin, ces objets sont bien plus complexes qu'ils n'y paraissent et, surtout, ne sont pas réellement ce qu'ils prétendent être.

2.2. Traces, artefacts et êtres culturels composites

Dans le domaine de l'audio numérique, sujet principal de cet article, les objets numériques s'apparentent à des traces. Ces traces sont le résultat d'une construction technique culturelle à partir d'objets musicaux complexes. La figure 1 illustre la chaîne de construction de ces traces allant de la performance – l'objet musical source – au résultat de l'analyse – le modèle obtenu par analyse des traces et des artefacts créés à partir de l'objet musical source. Chaque étape représente le résultat d'une construction – illustrée par une flèche – qui s'éloigne du ou des objets musicaux sources.

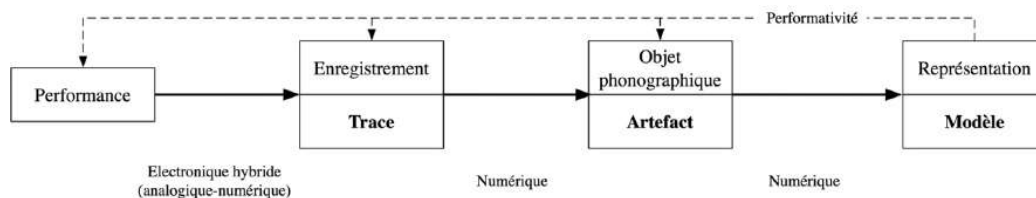


Figure 1. La construction technique culturelle d'un objet audio numérique.

Le scientifique intervient généralement aux étapes intermédiaires pour analyser les résultats d'enregistrements (traces) ou de reconstructions (artefacts) effectués par les agents – humains comme les musiciens, compositeurs, ingénieurs du son, etc., mais aussi non humains, comme les logiciels ou les machines – en injectant leur expérience, leur comportement ou des ajustements liés aux contraintes techniques, économiques ou esthétiques. Il s'agit du volet culturel de cette construction technique.

Le musicologue ne travaille pas en audio numérique sur des sources premières – pratique en réalité impossible, sauf à produire l'étude au moment même de l'évènement musical, ce qui en limiterait la profondeur scientifique –, mais plutôt sur des traces et des artefacts créés par des agents humains ou non humains, individuellement ou par co-créativité. Ces objets d'étude présentent des caractéristiques bien particulières. Selon Yves Jeanneret, on peut les décrire comme des « êtres culturels composites », c'est-à-dire des constructions culturelles dont les objets « [...] ne sont pas (tout à fait) ce qu'ils prétendent être [...] » [16]. En effet, le scientifique n'accède finalement jamais aux données, mais à leur représentation, qui est une adaptation³, une construction pour reprendre les termes de Bruno Latour sur la fabrique des objets scientifiques [17]. Ces objets culturels sont donc le résultat de manipulations et de transformations [1]. Cette chaîne de construction et de

manipulation se déroule sans qu'il y ait de stade intermédiaire conservé, ce qui rend pratiquement impossible de retracer l'historique des modifications ou des adaptations. Pratiquement, car, bien que les documents textuels présentent ces caractéristiques, cela ne s'applique pas tout à fait aux objets sonores numériques. L'archétype que nous écoutons garde des traces de certaines manipulations qu'il a subies. Retrouver le fil de ces traces est une pratique courante chez le professionnel, qu'il s'agisse de l'ingénieur du son, du musicien ou du compositeur⁴. Enfin, comme le souligne le Sémir Badir, les représentations manipulées par le musicologue ou par le logiciel qu'il utilise ont aussi une capacité « épivisuelle » [2] : elles (re)présentent les données et s'auto-présentent elles-mêmes. Cette thèse rejoint celle de Johanna Drucker qui montre que la visualisation de données ne sert pas à représenter de l'information, mais plutôt à produire graphiquement des objets de connaissance [14]. La représentation de données doit donc être prise à deux niveaux : comme la visualisation construite (manipulée) d'une information et comme la production d'un savoir sur la manipulation de cette information.

Nous avons donc vu que la musicologie numérique est un domaine qui allie nécessairement les connaissances en acoustique, informatique et en analyse de données. Il s'agit d'une forme d'analyse technico-musicale.

³ Par exemple, cela se traduit par des manipulations telles que le sous-échantillonnage ou la normalisation.

⁴ Il s'agit de la conduite d'écoute active taxonomique décrite par Lasse Thoresen [20].

Nous faisons également la distinction entre la musicologie numérique et la musicologie computationnelle, qui est une sous-catégorie de la première. La musicologie computationnelle se concentre sur les concepts fondamentaux de l'informatique. La musicologie numérique est centrée sur l'objet musical lui-même et les concepts fondamentaux de la musicologie. On pourrait considérer que la musicologie computationnelle constitue un cas particulier situé à mi-chemin entre la musicologie numérique et l'informatique scientifique.

2.3. Flux de travail en musicologie : le musicologue en contexte

Lors de nos recherches préparatoires sur le développement du logiciel EAnalysis⁵, nous avons mené une réflexion sur les flux de travaux en musicologie [7]. Comment le musicologue travaille-t-il pour analyser ses sources audio numériques ? Sur quels types de sources porte son étude (enregistrements de concerts,

enregistrements personnels, éditions phonographiques, etc.) ? Quelles méthodes et quels outils sont mobilisés pour l'analyse ? L'objectif était de suivre l'activité du musicologue depuis sa première étape jusqu'à la publication et même au-delà, avec celle de la médiation. Trois grands domaines ont été explorés : les outils, les formats et les méthodes audio-numériques en musicologie.

Nous avons recensé et analysé les outils développés ou détournés pour l'analyse musicale. Ces outils sont présentés dans la figure 2 qui illustre la partie audio-numérique⁶.

Associé à une étude sur les formats, cet état de l'art nous a permis d'identifier des étapes du flux de travail (figure 3) non prises en compte par les technologies existantes, et de les intégrer dans le développement d'EAnalysis. L'une de ces étapes essentielles manquait à notre connaissance : celle qui consiste à créer des compositions de représentations à partir de sources différentes. Nous avons donc développé EAnalysis sur le principe d'un « espace de travail ». Ce principe est également à la base de la version 6 d'iAnalyse⁷.

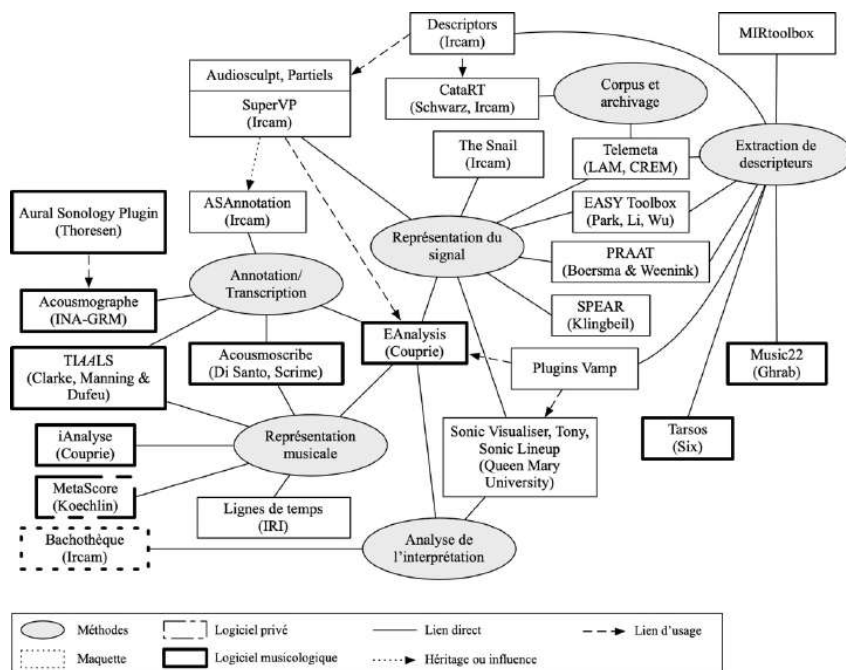


Figure 2. Les outils audio-numériques de l'analyse musicale.

⁵ Le logiciel EAnalysis (http://logiciels.pierrecooprie.fr/?page_id=402) a été développé entre 2010 et 2014 pour aider à l'analyse de sources audio.

⁶ Celle-ci est complétée par une partie sur les données symboliques.

⁷ iAnalyse (<http://logiciels.pierrecooprie.fr>) est un logiciel développé depuis 2006 pour aider à l'analyse musicale et à la création de guides d'écoute. Depuis sa version 5 [8], il intègre EAnalysis, qui est devenu obsolète.

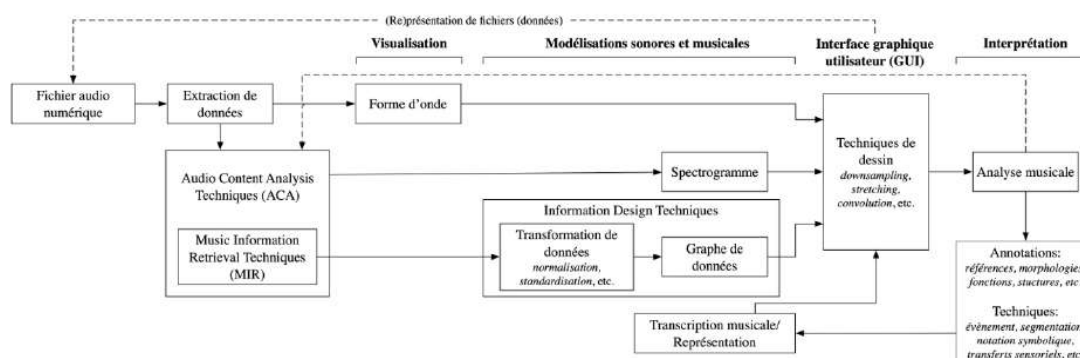


Figure 3. Le flux de travail utilisé en musique pour étudier des documents audio numériques.

2.4. Questions d'épistémologie

La partie « méthodes audionumériques » de ces études préparatoires au développement d'EAnalysis a permis d'élaborer progressivement le concept de « laboratoire numérique d'expérimentation » en musicologie [12]. Toutefois, avant d'introduire cette notion, il convient de revenir sur les conclusions de cette étude afin de comprendre leurs rôles dans le développement des logiciels EAnalysis et de la version 5 d'iAnalyse. Ces conclusions se présentent en trois points essentiels pour la musicologie numérique :

1. il n'existe pas de format musicologique. Cela signifie qu'il est toujours difficile de travailler avec plusieurs logiciels en partageant les données. Le musicologue passe généralement beaucoup de temps à bricoler des solutions peu maniables pour combiner des données provenant de logiciels différents ;
2. les technologies développées en acoustique musicale ou en informatique pourraient être très utiles en musicologie. Toutefois, elles sont d'un abord très ardu pour le chercheur en sciences humaines, généralement peu familier avec les langages informatiques. Installer Python et ses packages, gérer les problèmes de dépendances, maintenir des scripts fonctionnels sur plusieurs années sont des activités généralement hors de portée d'un musicologue ;
3. les visualisations du sonore ne sont bien souvent pas adaptées à l'étude de l'objet musical. Le spécialiste d'acoustique étudie le son lui-même et l'informaticien va se concentrer sur l'optimisation algorithmique. Les deux ne prendront pas en compte les méthodes proprement musicologiques de l'analyse musicale aux questions patrimoniales en passant par des aspects esthétiques ou sociologiques.

Ce sont ces conclusions qui nous ont amenés à développer une méthodologie de recherche en musique

numérique, et plus particulièrement à adapter la terminologie d'Yves Jeanneret pour étudier les objets musicaux numériques ou ces êtres culturels composites musicaux.

2.5. La part performative de la musicologie

À partir de 2015, nous avons entamé un projet de recherche sur l'enregistrement, l'étude et la transmission de l'interprétation acousmatique⁸ [11]. En parallèle, nous avons exploré l'analyse de performances de musique électroacoustique improvisée [6, 10]. Un aspect commun à ces deux projets est l'interaction entre l'étude musicale et la pratique artistique. Dans nos analyses de performance improvisées, il s'agissait de comprendre des phénomènes de construction formelle et leur articulation avec l'élaboration de gestes d'espace ou de timbres. Lors de la performance, la position de musicien déforme l'écoute, l'immersion dans l'évènement et dans le son relève des « conduites d'écoute immersive » et « physiquement active ». Ces types de conduites, proposées par Lasse Thoresen [20], décrivent bien le phénomène du musicien immergé dans sa performance. Il s'agissait donc, à posteriori, de comprendre les raisons de certaines interactions musicales ou de décrire les stratégies individuelles dans la globalité de la construction de la performance. Cette compréhension a alors fortement influencé l'évolution de notre jeu instrumental. Dans le projet sur l'analyse de l'interprétation acousmatique, le développement du logiciel MotusLabTool⁹, au cœur de l'enregistrement, mais aussi de la formation de jeunes musiciens, a permis d'intégrer la pratique de l'interprétation dans le processus scientifique de musicologie. En effet, l'interprète devient alors une source d'étude, ce qui lui permet de prendre part à l'analyse et aux résultats de celle-ci, lesquels serviront ensuite à influencer sa pratique musicale.

Cette articulation particulièrement fructueuse est au cœur de la pratique de la recherche-création. Dans notre cas, l'enjeu est aussi et surtout de l'articuler avec le développement de technologies indispensables à l'étude

⁸ Un carnet hypothèses présente le travail réalisé jusqu'à présent : <https://acousmatique.hypotheses.org>.

⁹ MotusLabTool est disponible en open source sur <https://github.com/pierrecouprie/MotusLabTool>.

de pratiques artistiques complexes et peu documentées. La pratique de la recherche-création révèle la part de performativité des sciences interdisciplinaires et transdisciplinaires portant sur des objets artistiques. L'étape scientifique est intégrée à la création elle-même – au quatrième niveau de sens que nous avons introduit en début d'article – ou à sa propriété « sui-référentielle », dont parle Barbara Cassin [4]. La recherche musicologique peut ainsi faire partie intégrante de l'acte artistique lui-même.

2.6. Le développement comme laboratoire de musicologie numérique

L'étape suivante a été d'intégrer le développement de logiciels au cœur de notre pratique musicologique. EAnalysis, puis iAnalyse sont devenus des laboratoires d'expérimentation [12] permettant de tester des modes de visualisation de données adaptées aux pratiques de la musicologie ou des représentations musicales pertinentes pour l'analyse de structures musicales. En retour, ces expérimentations nous ont permis de développer des méthodes pour étudier des objets musicaux complexes résistants bien souvent à l'analyse musicale.

Bien évidemment, l'objectif de cette pratique de la musicologie, articulée d'une manière transdisciplinaire les méthodes de plusieurs domaines scientifiques, ne se situe pas dans le développement de nouvelles méthodes en acoustique, en informatique ou en visualisation de données. Les représentations proposées dans EAnalysis puis iAnalyse n'ont rien de nouveau pour l'acousticien ou l'informaticien. Certains y voient même un détournement « peu scientifique » ou une dégradation de la qualité de la visualisation des données.   contrario, elles sont nouvelles en musique et cette « dégradation » correspond en réalité à une amélioration de la qualité musicale des visualisations proposées. Le musicologue n'a pas forcément besoin d'une précision redoutable sur la variation d'une fréquence, mais plutôt d'outils lui permettant d'analyser cette variation à travers les morphologies qui l'intègrent et dans son contexte musical en relation avec d'autres données, voire avec une multitude de données, représentées d'une manière musicale. C'est-à-dire dans un contexte scientifique, artistique, esthétique et créatif. Penser la musicologie numérique, c'est appliquer la méthode scientifique au prisme d'une œuvre musicale plutôt qu'exemplifier l'informatique à l'aide d'études musicales.

3. VERS UNE MUSICOLOGIE DE PROCESSUS

3.1. Le développement d'iAnalyse 6

iAnalyse 6 est la dernière version du logiciel développé depuis 2006. Cette nouvelle version stabilisée

certaines éléments en développement depuis plusieurs versions, notamment le format de fichier, l'extraction de descripteurs et la création de représentations musicales. Les principales améliorations portent sur trois aspects : l'extension de l'espace de travail, l'intégration de processus musicologiques et la caractérisation des données et du travail musical sous la forme d'une ontologie sémantique.

Une des particularités les plus importantes est qu'iAnalyse 6 fonctionne aussi sur iPadOS. L'utilisateur y retrouve pratiquement toutes les fonctions, seules celles nécessitant beaucoup d'espace disque sont pour le moment limitées : nombre de fichiers importés dans les documents de type Corpus¹⁰ et des fonctions d'enregistrement audio et vidéo. L'architecture et les classes modèles sont les mêmes sur les plateformes macOS et iPadOS. L'interface iPad a évidemment exigé des adaptations. Concernant le langage, iAnalyse 6 est développé, comme la version 5, en Swift et, pour iPadOS, en partie en SwiftUI, notamment pour les parties interactives de l'interface ; les représentations, quant à elles, sont toujours développées avec UIKit.

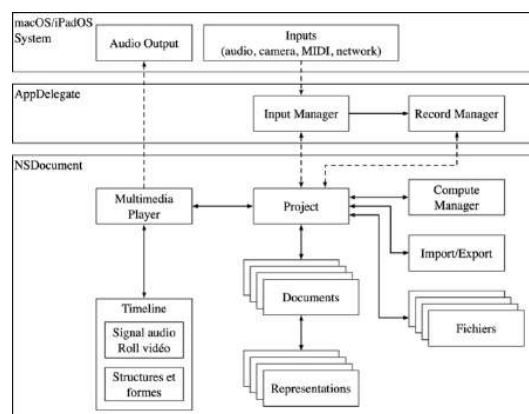


Figure 4. L'architecture de iAnalyse 6.

La figure 4 présente l'architecture du logiciel et du projet – c'est-à-dire du document (NSDocument) crée ou ouvert par l'utilisateur. Un projet peut contenir des fichiers importés et un ou plusieurs documents¹¹. Les documents sont composés de visualisations de données ou de représentations musicales. La Timeline est commune à tous les documents. Elle contient la visualisation du fichier audiovisuel (signal audio ou roll vidéo) en cours de lecture et peut inclure une représentation des segments, des structures et des formes musicales. Le projet est complété par un ComputeManager chargé de gérer et de générer de nouvelles données ou représentations à partir des fichiers (FFT, descripteurs audio, matrice de distance, etc.). Le

¹⁰ Dans cet article nous avons choisi d'indiquer les noms des types ou des parties de documents du logiciel en anglais sans italiques avec une majuscule : Slideshow, Representation, Video, Corpus, Live, Composition, Timeline, etc. Les fonctions ou classes en Swift sont indiquées avec la police Courier New.

¹¹ Dans le langage informatique le fichier crée par l'utilisateur est un document, pour l'utilisateur, il s'agit d'un projet qui peut contenir plusieurs documents, c'est-à-dire plusieurs interfaces de représentation.

projet dialogue avec l'AppDelegate¹² qui contient l'InputManager et le RecordManager. Le premier est responsable de la gestion des entrées pour les documents de type Live, qui permettent d'afficher en temps réel les entrées audio depuis la carte son, les caméras, le MIDI ou l'OSC. Le second enregistre ces données. Finalement, le projet et l'InputManager fonctionnent aussi de concert avec le système pour les entrées et les sorties.

3.2. L'espace de travail

En ce qui concerne le développement de l'interface autour de la notion d'espace de travail, iAnalyse 6 fait un pas supplémentaire par rapport à la version 5 afin d'être au plus près des besoins du musicologue dans l'organisation des données, la création de projets et leurs mises en relation, l'étude de corpus de fichiers audio numériques et la destination du travail des analyses.

Cette nouvelle version de iAnalyse permet d'accéder à tout moment à l'ensemble des fichiers importés ou créés à travers un navigateur de fichiers offrant la possibilité de les prévisualiser sans avoir besoin de passer par une interface d'analyse ou d'annotation. Les fichiers de données sont aussi modifiables, ce qui permet par exemple de redimensionner les données, de les normaliser, de supprimer certaines valeurs hors normes ou les erreurs¹³.

iAnalyse 6 permet également la création de divers documents au sein d'un même projet. La version 5 comprenait quant à elle la possibilité de naviguer entre

trois interfaces : le diaporama, qui s'inspirait des fonctionnalités des logiciels de présentation comme Keynote ou PowerPoint ; la représentation temporelle, qui permettait de visualiser et d'annoter le signal audio ; et la représentation en temps réel, qui offrait une vue dynamique du signal ou des données durant leur lecture. Ces trois interfaces deviennent des documents dans la version 6 et sont complétées par trois autres types¹⁴.

L'espace de travail inclut également des outils d'annotation pouvant être utilisés avec tous les types de documents. La bibliothèque d'annotations, quant à elle, reprend les fonctionnalités de la version 5.

3.3. Processus

La pratique du laboratoire expérimental nous a permis de débiter une nouvelle phase du travail en musicologie numérique, que nous appelons « musicologie de processus¹⁵ ». Il s'agit de pratiquer la musicologie à partir de processus de développement, d'analyse de données, de visualisations, de comparaisons ou de l'appui de technologies audio ou vidéo numériques. Toutefois, la notion de processus implique aussi un flux de travail permettant de passer d'une étape à l'autre dans une dynamique de construction du savoir sur un corpus ou d'intégrer la construction du corpus dans le processus lui-même. Les étapes qui sont couramment utilisées en musicologie numérique, comme la visualisation de données, la segmentation formelle ou l'annotation de fichiers audio, s'inscrivent dans cette dynamique.

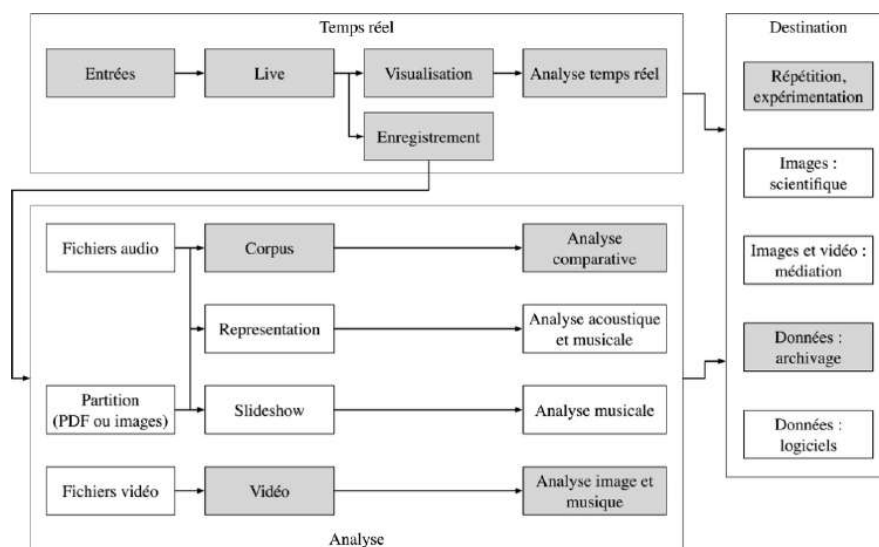


Figure 5. Quelques exemples de processus dans la version 6 de iAnalyse.

¹² L'AppDelegate est le cœur de iAnalyse. Cette classe orchestre la gestion des projets.

¹³ Ce point peut sembler étrange, mais l'objectif n'est pas ici de représenter les données telles quelles – ce qui, comme nous l'avons présenté précédemment, est impossible, chaque représentation restant

une construction – mais plutôt de produire des visualisations adaptées à l'étude d'un objet artistique.

¹⁴ Voir le détail dans la section suivante.

¹⁵ Le terme « processus » est ici utilisé dans le sens de « procédé » ou de son équivalent anglais « process ».

La version 6 d'iAnalyse applique cette notion de processus en s'appuyant sur les documents déjà présents dans la version 5 et en y ajoutant trois nouveaux types adaptés aux usages musicologiques :

1. le document **Slideshow**¹⁶ permet de créer des animations sur le modèle des présentations en synchronisant l'ensemble des éléments graphiques (diapositives, images et annotations) sur un support multimédia ;
 2. Le document **Représentation** permet de visualiser le signal audio, des données extraites du signal grâce à des méthodes de MIR, ou encore des données importées. Les visualisations sont temporelles et peuvent être annotées ;
 3. le document **Video** permet quant à lui d'analyser une vidéo en y ajoutant des annotations. Cette fonction, déjà intégrée à iAnalyse 5, facilite l'analyse de l'image ;
 4. le document **Corpus**¹⁷, destiné à contenir plusieurs fichiers audio ou vidéo intégrés ou liés au projet global, présente des visualisations pertinentes pour l'analyse audiovisuelle comparative ;
 5. le document **Live** permet de visualiser en direct les entrées du logiciel : audio, vidéo, MIDI et OSC ;
- le document **Composition** regroupe l'ensemble des fonctionnalités de visualisation des autres documents afin

d'offrir à l'utilisateur un espace où il pourra disposer librement les représentations.

Un projet iAnalyse 6 peut contenir plusieurs documents de différents types partageant les mêmes données. Ces documents s'articulent pour accompagner le chercheur dans ses processus musicologiques. La figure 5 présente des exemples de ces processus. Chaque étape s'inscrit dans un ou plusieurs processus permettant d'aller du corpus à la publication ; les nouveautés de la version 6 apparaissent en arrière-plan grisé.

L'aboutissement du logiciel, de son architecture et des flux de travaux tend donc à refléter les processus mis en œuvre en musicologie numérique.

3.4. Deux exemples de documents dans iAnalyse 6

Les documents de type Corpus et Live font leur apparition dans cette nouvelle version. L'objectif est ici d'intégrer trois catégories de processus :

1. les processus d'analyse de corpus basés sur une étude comparative de plusieurs fichiers ;
2. les processus intégrant l'enregistrement d'une performance ou de séances de travail, de répétition d'artistes ;
3. les processus basés sur ou intégrant la médiation des savoirs.

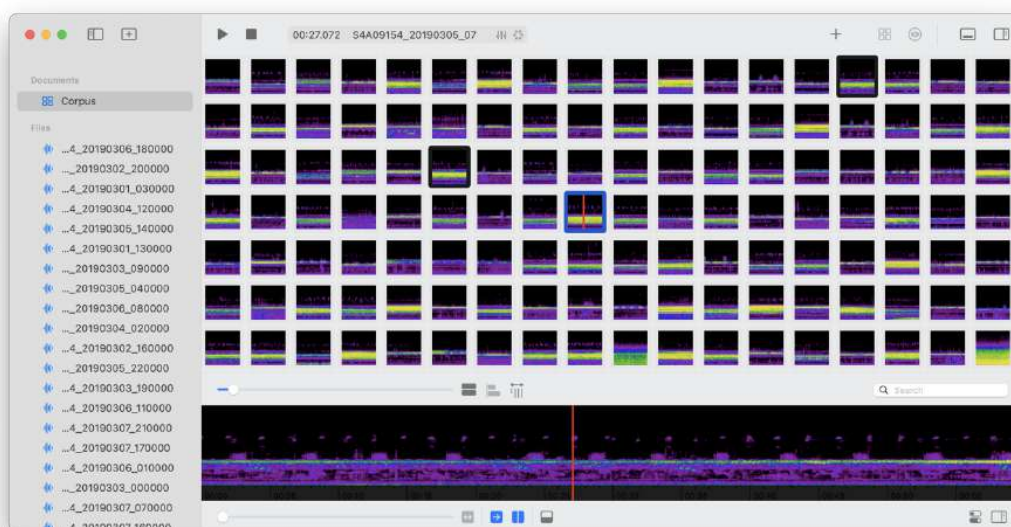


Figure 6. L'interface d'un document de type Corpus dans iAnalyse 6. Chaque case représente le sonagramme d'un fichier audio. La Timeline en bas reprend le fichier sélectionné et le sonagramme détaillé.

¹⁶ Les deux premiers types de documents sont déjà présents dans la version 5 d'iAnalyse et le mode de représentation en temps réel est intégré dans le document Live.

¹⁷ Les documents Corpus et Live sont expliqués en détail ci-après

Un document de type Corpus contient plusieurs fichiers audiovisuels enregistrés dans le projet ou liés au projet dans le cas d'un volume important de données. Deux types d'interfaces sont proposées :

1. une interface en mosaïques (figure 6) permettant de visualiser le signal ou l'image avec différentes représentations. La taille et l'organisation de la mosaïque sont modifiables, il est aussi possible de filtrer les fichiers pris en compte en fonction de leur nom, de leur chemin d'accès ou de mots clés ;
2. une représentation résumant l'ensemble des fichiers, par exemple sous la forme de graphiques en nuages de points en 2D ou en 3D basés sur l'extraction de descripteurs audio.

Bien évidemment, la navigation entre les fichiers et leurs lectures est très simple et permet de les comparer, de faire des sélections ou encore de créer des groupes

Le document de type Live répond à différents processus :

1. visualiser en direct des données pendant une performance afin de prendre des notes ou de suivre le bon déroulement d'une répétition ;

2. enregistrer une performance pour produire ensuite une analyse. Étant donné que l'enregistrement est réalisé au niveau de l'AppDelegate, l'affichage ne conditionne pas le format d'enregistrement et ce dernier peut ensuite devenir la base d'un document Slideshow ou Representation permettant l'ajout d'annotations, de transcriptions et d'analyses ;
3. produire un document interactif servant à la médiation des données et des savoirs.

Ces processus sont apparus dans nos recherches ces dernières années. Par exemple, les deux premiers d'entre eux permettent d'élargir ce que nous avons réalisé avec le logiciel MotusLabTool pour l'enregistrement et l'analyse d'interprétations de musique acousmatique. L'interface de MotusLabTool est fixe ; il nous a semblé intéressant de la rendre modulaire (figure 7) afin qu'elle s'adapte à tout type de performance. L'utilisateur peut ainsi visualiser les entrées et y inscrire du texte ou des images (marqueurs temporels, photographies, etc.) pendant la performance et son enregistrement.

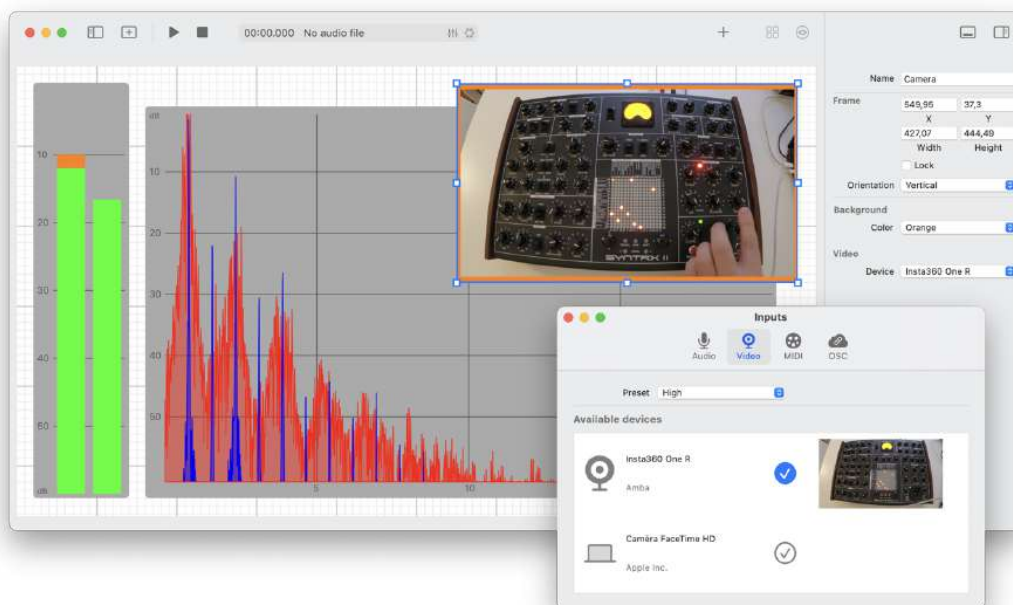


Figure 7. La capture de l'audio et de la vidéo dans l'interface d'un document Live de iAnalyse 6 : (gauche) affichage de type VU-mètre RMS, (centre) affichage de type spectre linéaire, (haut à droite) affichage d'une caméra connectée à l'ordinateur. En complément, en bas à droite apparaît l'interface vidéo de l'InputManager permettant de gérer la connexion des périphériques.

Le troisième processus a émergé au sein du projet de thèse de création d'Adèle de Baudouin au Muséum national d'histoire naturelle (laboratoire ISYEB) et à l'Université Paris-Saclay (équipe RASM-CHCSC), où elle a réalisé une installation audiovisuelle pour la médiation artistique et scientifique de l'étude et la

création de paysages sonores en écoacoustique et en électroacoustique. Cette installation a été créée avec le logiciel Max, mais nous avons trouvé que la mise en œuvre était trop complexe pour un projet visant seulement à prolonger une recherche. En revanche, les documents de type Live ou Composition dans iAnalyse

6, offrent un moyen simple de créer une interface réagissant aux sons ou à d'autres commandes MIDI. En complément, différents types de documents peuvent être scénarisés pour enchaîner leur lecture ou celle de fragments comme c'était le cas dans iAnalyse 5 et sa fonction playlist.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article présente le développement de la version 6 du logiciel iAnalyse à partir de réflexions épistémologiques sur l'acte musicologique en régime numérique. En effet, comme nous l'avons montré, il s'agit du résultat de l'articulation entre musicologie et informatique. Toutefois, loin d'être finalisées, les avancées présentées ici ne sont que des esquisses qui nécessiteront des travaux plus approfondis. De même, plusieurs perspectives se dessinent pour compléter la pratique de la musicologie. Nous avons déjà abordé les ontologies sémantiques, qui permettront de documenter le travail d'analyse à deux niveaux : celui de l'acte de création – l'analyse de cet acte comme ontologie – et celui de la pratique même du musicologue – le travail dans iAnalyse révélant l'acte du scientifique lui-même à travers une ontologie. Finalement, et peut-être est-ce la dernière étape, il s'agit de la question de la modélisation de l'acte créatif. Les représentations musicales apparaissent déjà comme des modèles de cet acte ou, au moins, comme des « modèles réduits » pour reprendre un concept lévi-straussien [18] dans lequel le modèle révèle une expérience sur l'objet. Il s'agira maintenant d'aller plus loin que la représentation en développant des dispositifs interactifs permettant d'élaborer des modèles de certaines étapes du processus créatif.

5. REFERENCES

1. Bachimont, B. *Patrimoine et numérique. Technique et politique de la mémoire*. INA, Paris, 2017.
2. Badir, S. « À quoi servent les graphiques ? », *Communication & Langages* 143, 2005, p. 49-60.
3. Born, G. « On Musical Mediation: Ontology, Technology and Creativity », *Twentieth-Century Music* 2(1), 2005, p. 7-36.
4. Cassin, B. *Quand dire, c'est vraiment faire*. Fayard, Paris, 2018.
5. Couprie P. « Improvisation électroacoustique : analyse musicale, étude génétique et prospectives numériques », *Revue de musicologie* 98(1), 2012, p. 149-170.
6. Couprie, P. Sousa Dias A. « Vertiges de l'espace : analyse d'une performance électroacoustique improvisée », in Ayari M. (éd.) *Penser l'improvisation*, Delatour, Paris, 2015, p. 273-287.
7. Couprie, P. « EAnalysis: Developing a Sound Based Music Analytical Tool », in S. Emmerson, L. Landy (éd.) *Expanding the Horizon of Electroacoustic Music Analysis*, Cambridge, Cambridge University Press, 2016, p. 170-194.
8. Couprie, P. « iAnalyse 5 : le développement d'un logiciel pour la musicologie numérique », *Actes des Journées d'informatique musicale*, Bayonne, 2019.
9. Couprie, P. « Quelques propos sur les outils et les méthodes audionumériques en musicologie. L'interdisciplinarité comme rupture épistémologique », *Revue musicale OICRM* 6(2), 2020, p. 25-44.
10. Couprie, P. « Analytical Approaches to Electroacoustic Music Improvisation », *Organised Sound* 27(2), 2022, p. 117-130.
11. Couprie, P., Raboisson, N. « Acousmatic Music: Towards an Art of Performance », *acusfere – suoni culture musicologie* 1, 2022, p. 11-40.
12. Couprie, P. « Developing Software for Digital Musicology: Inside an Experimental Laboratory », *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Shenzhen, Chine, 2023.
13. Descola, P. *Les formes du visible. Une anthropologie de la figuration*. Seuil, Paris, 2021.
14. Drucker, J. *Visualisation. L'interprétation modélisante*. B42, Paris, 2020.
15. Foucault M., *Dits et écrits*. Gallimard, Paris, 1994.
16. Jeanneret, Y. *La fabrique de la trace*. ISTE, Londres, 2019.
17. Latour, B. *Enquête sur les modes d'existence. Une anthropologie des modernes*. La Découverte, Paris, 2012.
18. Lévi-Strauss, C. *La pensée sauvage*. Paris, Librairie Plon, 1962.
19. Szendy, P. *Écoute une histoire de nos oreilles*. Édition de Minuit, Paris, 2001.
20. Thoresen, L. *Emergent Musical Forms. Aural Explorations*. University of Western Ontario, Ontario, 2015.