



HAL
open science

L'analyse musicale et la représentation analytique de la musique acousmatique

Pierre Couprie

► **To cite this version:**

Pierre Couprie. L'analyse musicale et la représentation analytique de la musique acousmatique : Outils, méthodes, technologies. Musique, musicologie et arts de la scène. Université Paris-Sorbonne, 2015. tel-01265947

HAL Id: tel-01265947

<https://hal.science/tel-01265947>

Submitted on 1 Feb 2016

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.



UNIVERSITÉ PARIS-SORBONNE

ÉCOLE DOCTORALE V

Institut de Recherche en Musicologie (UMR 8223)

DOSSIER D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Discipline : Musicologie

Présenté et soutenue par :

Pierre COUPRIE

Le 28 novembre 2015

Mémoire de synthèse de l'activité scientifique

**L'analyse musicale et la représentation
analytique de la musique acousmatique**

Outils, méthodes, technologies

Garant :

M. Marc BATTIER Professeur des universités - Université de Paris-Sorbonne

Rapporteurs :

M. Jean-Marc CHOUVEL	Professeur des universités - Université de Reims Champagne-Ardenne
Mme. Cécile DAVY-RIGAUX	Directrice de recherche HDR - CNRS
M. Leigh LANDY	Professeur des universités - Université De Montfort (Leicester)
M. Geoffroy PETEERS	Chercheur HDR - Ircam
Mme. Anne SEDES	Professeur des universités - Université Paris 8 Vincennes Saint-Denis
M. Jean-François TRUBERT	Professeur des universités - Université de Nice Sophia Antipolis

« Certaines œuvres de musique concrète appellent immédiatement la traduction graphique et il ne serait pas impossible, par exemple, de composer une musique concrète en exprimant les équivalences de matière et de forme à partir d'une peinture abstraite¹. »

« Les œuvres électroacoustiques sont souvent laissées pour compte par l'analyse musicale. Dans la musique instrumentale, c'est la partition qu'on analyse. La musique électroacoustique est réalisée directement en sons, et l'absence de partition désarçonne l'analyste². »

« Parmi les autres acquis fondamentaux dus à l'électro-acoustique, je mentionnerai maintenant seulement cette idée essentielle que l'atome de la musique n'est pas la note écrite sur le papier. L'atome de la musique, c'est l'atome perceptif, ce peut être l'objet sonore de Pierre Schaeffer. Il se peut aussi qu'il n'y ait pas d'atome perceptible, que la musique ne soit pas sécable, que l'on perçoive des flux [...] ³ »

« L'inanalysable en musique n'est pas seulement un défi à la raison, c'est aussi ce qui démarque le mieux la musique du langage⁴. »

1. SCHAEFFER, Pierre, *À la recherche d'une musique concrète*, Paris, Seuil, 1952, p. 114-115.

2. RISSET, Jean-Claude, « Problèmes posés par l'analyse d'œuvres musicales dont la réalisation fait appel à l'informatique », in *Analyse et création musicales*, Paris, L'Harmattan, 2001, p. 131.

3. MURAIL, Tristan, « La révolution des sons complexes », in P. Michel (éd.) *Modèles et artifices*, Strasbourg, Presses universitaires de Strasbourg, 2004, p. 14.

4. MÂCHE, François-Bernard, *Musique au singulier*, Paris, Odile Jacob, 2001, p. 94.

Chapitre 1

Introduction et contexte : l'analyse musicale et la transcription

Nous plaçons d'emblée notre travail dans la lignée de la recherche musicale créative¹, cette interdisciplinarité qui constitue la base du *Traité des objets musicaux*² (TOM). Les outils théoriques, les méthodes et les technologies, objets de nos recherches, sont ancrés dans l'histoire de la musique électroacoustique, mais aussi dans celle des arts et des sciences de la seconde moitié du XX^e et du début du XXI^e siècle. Naviguant entre création, recherche musicologique, développement informatique et pédagogie, nos différentes activités s'enrichissent les unes au contact des autres en créant une synergie autour d'une recherche musicale créative. Comme le souligne Jean-Marc Chouvel, le compositeur et l'analyste sont souvent la même personne³. La connaissance profonde que peut avoir le compositeur ou le musicien des œuvres et des processus de création est essentielle pour s'approcher au plus près de la construction de l'œuvre elle-même, mais aussi afin de permettre l'exploration de nouveaux champs de recherche. La question que pose Robert Normandeau à propos de la spectromorphologie, « *compositional tool or method of analysis ?*⁴ », est alors caduque. L'analyse musicale est au cœur de cette recherche musicale créative, qu'elle ait pour objectif l'analyse *a posteriori* ou l'analyse durant le processus de création, les deux approches se complètent tant pour l'artiste-auditeur que pour l'auditeur-artiste. Si nos travaux de recherche se sont surtout concentrés sur l'analyse à *a posteriori*, notre projet pour les années à venir placera l'analyse musicale au cœur de la pratique artistique à travers l'analyse de l'interprétation et l'aide à la création musicale.

Habitué à une séparation très forte entre les activités de compositeur et de musicien, nous parlerons plutôt d'artiste lorsqu'il sera question des deux. Nos activités créatives nous ont amené de la composition instrumentale à l'improvisation électroacoustique en passant par la composition de musiques acousmatiques. Les choix qui ont forgé ce parcours ne sont pas anodins. L'attrait de la scène nous a beaucoup manqué lorsque nous travaillions à la table ou dans l'intimité du studio, au point de nous laisser insatisfait de nos créations écrites ; l'attrait de l'intellectualisme a toujours été moins fort que l'expérience musicale du musicien. Notre retour sur scène depuis une quinzaine d'années nous a conforté dans la position du musicien-compositeur à travers l'improvisation libre.

1. RISSET, Jean-Claude, « Pierre Schaeffer et l'ordinateur », in *Portrait polychrome Pierre Schaeffer*, Paris, INA-GRM, 2008, p. 45.

2. SCHAEFFER, Pierre, *Traité des objets musicaux*, Paris, Seuil, 1966.

3. CHOUVEL, Jean-Marc, « Polyphonie/polysémie. Comment aborder la multidimensionnalité du temps musical ? », in J.-M. Chouvel, F. Lévy (éd.) *Peut-on parler d'art avec les outils de la science ?*, Paris, L'Harmattan/Ircam, 2002, p. 309.

4. NORMANDEAU, Robert, « Spectromorphology of Denis Smalley », in *Portrait polychrome Denis Smalley*, Paris, INA-GRM, 2010, p. 80.

1.1. Outils théoriques, méthodes et technologies

Cette activité créatrice est aussi au cœur du développement informatique dont il sera question dans le deuxième chapitre. Concevoir un logiciel, mettre à jour les éléments qui vont nous permettre d'y arriver, résoudre des mises en algorithmes parfois difficiles ou rechercher ce que les informaticiens de métier nomment l'élégance du code est avant tout une expérience de création. Maîtriser l'intégralité des étapes de développement d'une application est très proche de la création d'une œuvre ou du travail de répétition nécessaire à la réalisation d'un concert. Les choix demandent de l'intuition, de l'imagination et de la rigueur. Nous avons aussi eu la chance de maîtriser toutes les étapes de développement de nos logiciels. De la première idée à la distribution de la version finale, de nombreuses étapes nécessitent d'imaginer de nouvelles solutions, de résoudre des problèmes d'une manière créative ou d'expérimenter des intuitions ou de simples idées. Le développement logiciel ainsi présenté est partie intégrante de notre activité de chercheur et de créateur.

Ce mémoire sera donc la présentation de cet espace de recherche musicale créative que nous avons progressivement tissé dans toutes nos activités professionnelles. Même s'il sera surtout question de musicologie, et plus particulièrement d'analyse musicale et de développement informatique, les autres facettes de nos activités – création artistique, enseignement, participation à différentes associations (notamment la Société française d'analyse musicale et l'Association francophone d'informatique musicale) – seront aussi présentes directement ou en creux à travers les choix que nous avons su faire. Pratiquer la recherche musicale créative est souvent une question de choix et d'ouverture vers de nouvelles expériences – dédaignant la spécialisation forcée, nous avons préféré ajouter des cordes à notre arc.

Ce premier chapitre ancre notre recherche dans une perspective historique afin de faire émerger, dans le deuxième chapitre, la nécessité d'une représentation analytique de la musique électroacoustique. Cette nécessité s'est progressivement imposée comme fondement de notre recherche à partir de notre thèse⁵, des opportunités que nous avons eues dans le domaine de la transcription, de la publication multimédia et des rencontres qui nous ont permis de repenser le rapport au visuel dans la recherche musicologique. Ce mémoire apparaît comme une première étape, tendant ces fils dans quelques directions fructueuses qui demanderont à être complétées dans les années à venir, ce sera l'objet de notre projet de recherche présenté dans le troisième chapitre.

1.1 Outils théoriques, méthodes et technologies

Il est généralement admis que la musique électroacoustique résiste à l'analyse. Les difficultés avancées se situent à deux niveaux : l'absence de support visuel et la complexité de l'analyse du matériau sonore et des structures. Depuis les années 1950 et le début de la recherche musicale, le matériau sonore et les œuvres ont été analysés et représentés de manières très différentes. Contrairement à Stéphane Roy qui souligne les limites de la base théorique⁶, nous pensons que l'impulsion donnée par Pierre Schaeffer dans les années 1960 a engendré de nombreux outils théoriques et méthodologiques pour l'étude des musiques électroacoustiques⁷. De plus, ces études ont été décuplées par l'apport des technologies numériques et les approches transdisciplinaires qui ont réunies des créateurs

5. COUPRIE, Pierre, *La musique électroacoustique : analyse morphologique et représentation analytique*, Thèse de doctorat sous la direction de Marc Battier, Paris, Université Paris-Sorbonne, 2003, http://www.pierrecouprie.fr/?page_id=764.

6. ROY, Stéphane, *L'analyse des musiques électroacoustiques : modèles et propositions*, Paris, L'Harmattan, 2003, p. 339.

7. COUPRIE, Pierre, « Le développement d'un outil d'aide à l'analyse musicale : bilan et perspectives musicologiques », in N. Marty (éd.) *Musique électroacoustique : analyse-écoute*, Paris, Delatour, en préparation.

et chercheurs d'horizons très divers. Ainsi, parallèlement à l'évolution technologique et à la multiplication des expériences esthétiques, la recherche musicologique s'est progressivement dotée, surtout depuis le milieu des années 1990, de nouveaux outils théoriques, méthodologiques et technologiques afin de cerner au plus près le matériau, les structures et la perception des œuvres électroacoustiques.

Les outils théoriques sont hérités des travaux réalisés par le Groupe de recherches musicales (GRM) autour de Pierre Schaeffer qui donna naissance au *TOM* en 1966, puis au *Solfège de l'objet sonore*⁸ un an plus tard. Michel Chion complétera cette base scientifique avec le *Guide des objets sonores*⁹ en 1983, véritable introduction aux deux premiers. Presque 40 ans plus tard, les principes théoriques avancés par Schaeffer – centrés sur l'étude et la classification de la perception du matériau, c'est-à-dire de l'objet sonore – restent au cœur de la recherche musicale électroacoustique¹⁰. En effet, si de nombreuses évolutions théoriques ont eu lieu en opposition à l'écoute réduite – *sound event*, fonctions, unités sémiotiques temporelles, grille de langage, narrativité – ou à travers l'exploration de nouvelles propriétés ou catégories du sonore absentes du *TOM* – spectromorphologie, typomorphologie augmentée, figures d'espace –, toutes se sont positionnées en fonction de cet objet d'étude qu'est l'objet sonore. Le *TOM*, même s'il relève de recherches scientifiques et philosophiques qui nous semblent éloignées des orientations actuelles, plutôt centrées sur les relations art-sciences autour des notions de complexité et de chaos¹¹, reste un point de référence dont les relectures sont loin d'avoir épuisé les idées qui y sont développées. En étudiant les nombreuses théories analytiques pour le développement du logiciel EAnalysis, nous avons pris conscience de la complexité qui gouverne la pensée contemporaine en analysant et en intégrant d'une manière critique les avancées du passé :

« Qu'est-ce que la complexité ? Au premier abord, la complexité est un tissu (complexus : ce qui est tissé ensemble) de constituants hétérogènes inséparablement associés : elle pose le paradoxe de l'un et du multiple. Au second abord, la complexité est effectivement le tissu d'événements, actions, interactions, rétroactions, déterminations, aléas, qui constituent notre monde phénoménal. Mais alors la complexité se présente avec les traits inquiétants du fouillis, de l'inextricable, du désordre, de l'ambiguïté, de l'incertitude... D'où la nécessité, pour la connaissance, de mettre de l'ordre dans les phénomènes en refoulant le désordre, d'écarter l'incertain, c'est-à-dire de sélectionner les éléments d'ordre et de certitude, de désambiguïser, clarifier, distinguer, hiérarchiser... Mais de telles opérations, nécessaires à l'intelligibilité, risquent de rendre aveugle si elles éliminent les autres caractères du complexus ; et effectivement, comme je l'ai indiqué, elles nous ont rendus aveugles¹². »

En comparant les travaux réalisés depuis les années 1970, nous pensons que la musicologie a ouvert les yeux sur la complexité du sonore musical. Le fourmillement de théories développées par des compositeurs soucieux de rendre intelligible leur musique ou simplement curieux de comprendre les créations de leurs contemporains a mis en évidence ce fouillis de données perceptives, cet inextricable enchevêtrement de complexes spectraux, ce désordre du matériau, cette ambiguïté des formes musicales ou cette incertitude du présent étendu qui semble seul à même de décrire la construction formelle des improvisations libres.

8. SCHAEFFER, Pierre, REIBEL, Guy, FERREYRA, Beatriz, *Solfège de l'objet sonore*, Paris, INA-GRM, 2/1998.

9. CHION, Michel, *Guide des objets sonores*, Paris, Buchet-Chastel/INA-GRM, 1983.

10. COUPRIE, Pierre, « Le vocabulaire de l'objet sonore », in S. Dallet, A. Veitl (éd.) *Du sonore au musical. Cinquante années de recherches concrètes (1948-1998)*, Paris, L'Harmattan, Univers musical, 2001, p. 203-225.

11. DARBON, Nicolas, *Les musiques du chaos*, Paris, L'Harmattan, 2006, p. 18.

12. MORIN, Edgar, *Introduction à la pensée complexe*, Paris, Seuil, 2005, p. 21.

1.1. Outils théoriques, méthodes et technologies

Parallèlement aux outils théoriques, véritables boîtes à outils pour l'analyse du matériau et de ses structures, différentes méthodes ont vu le jour. Celles-ci sont principalement apparues depuis les années 1980 et ont bénéficié, dans les années 1990, de la généralisation des technologies numériques pour se développer. Elles ne proposent pas de catégorisation ou d'analyse spécifiques du matériau, mais des méthodes permettant d'analyser l'œuvre à l'aide des outils théoriques. Nous les classons en deux catégories : les méthodes fondées sur la perception auditive du support audio et les méthodes utilisant les sources de la création rendues disponibles par le compositeur.

Enfin, accompagnant les outils théoriques et les méthodes, les outils technologiques ont pris une importance de plus en plus grande, particulièrement depuis la fin des années 1990. Jusqu'à récemment, ils se sont limités à la transcription du sonore et du musical. Des tracés du Sonographe dans les années 1950 au dernier logiciel d'analyse du son ou de transcription comme l'Acousmographe¹³, tous sont restés cantonnés à un usage annexe de l'analyse musicale, généralement celui de la création du visuel faisant cruellement défaut dans les œuvres de support. Toutefois, de nouveaux outils commencent à apparaître en assistant l'artiste dans son étude du matériau sonore et des œuvres musicales, ce sera l'objet du deuxième chapitre.

L'objectif de cette première partie n'est pas de présenter l'ensemble de ces théories, méthodes ou technologies, plusieurs ouvrages et articles s'y sont consacrés, mais de poser la base théorique et méthodologique de notre recherche. Ancré dans l'analyse musicale, nous avons expérimenté ces outils dans plusieurs articles portant sur l'étude d'œuvres spécifiques ou sur des questions plus larges. Cette expérience nous a progressivement amené à élaborer une méthode d'analyse des œuvres de support. Nous allons montrer comment la transcription morphologique allant de pair avec l'analyse musicale d'inspiration structuraliste conduit à une impasse musicologique. Cette impasse se révèle principalement par la question de la pertinence de l'analyse par segmentation en unités, cet objet sonore chez Schaeffer ou cet atome perceptif que semble remettre en cause Tristan Murail¹⁴ et qui limite l'analyse du complexe.

1.1.1 La dissolution du concept d'objet sonore

Le solfège schaefferien a été développé dans un studio dans lequel l'appareil principal était le magnétophone. Le compositeur enregistrait son matériau, appliquait un ensemble de transformations à l'aide de ce même magnétophone, de filtres ou de chambres de réverbération et enchaînait ensuite avec le mixage des différentes voies sur la console de mélange¹⁵. À partir de la fin des années 1960, les studios commencent à s'équiper de synthétiseurs analogiques modulaires autorisant la commande en tension (*voltage control*)¹⁶. Les années 1980 et 1990 verront le remplacement de ces technologies analogiques par le numérique¹⁷. Ces évolutions techniques ont enrichi la palette sonore du compositeur, lui offrant de nouvelles « opportunités¹⁸ ». Loin d'être de simples outils, les technologies,

13. BATTIER, Marc, COUPRIE, Pierre, « L'Acousmographe : un outil pour l'analyse informatique de documents sonores », *Les cahiers de l'OMF*, n° 4, 1999, p. 59-63 ; COUPRIE, Pierre, « L'Acousmographe », in *Peut-on parler d'art avec les outils de la science ?*, Poster, Paris, 2001, inédit ; FAVREAU, Emmanuel, GESLIN, Yann, LEFÈVRE, Adrien, « L'Acousmographe 3 », in *Journées d'informatique musicale*, Rennes, Université de Rennes, 2011, p. 105-111.

14. MURAIL, *op. cit.*, p. 14.

15. SCHAEFFER, Pierre, *La musique concrète*, Paris, PUF, Que sais-je ?, 1967, p. 42-51

16. CHION, Michel, REIBEL, Guy, *Les musiques électroacoustiques*, Paris, Édisud/INA-GRM, 1976, p. 253.

17. GESLIN, Yann, « Le studio 123 », in *Portrait polychrome Jean-Claude Risset*, Paris, INA-GRM/CDMC, 2001, <http://www.inagram.com/accueil/collections/portraits-polychromes?page=3>.

18. BATTIER, Marc, « Sculpter la transparence. L'écriture, le geste, l'environnement », *Les cahiers de l'Ircam, Composition et environnements informatiques*, n° 1, 1992, p. 59.

analogiques ou numériques ont aussi une forte influence sur l'écriture musicale et permettent l'émergence de nouvelles formes d'art sonore. Ces nouvelles technologies de synthèse et de transformation analogique puis numérique ont permis de créer ou d'utiliser plus facilement des sons jusqu'alors peu employés. Elles ont aussi affiné les techniques de manipulation du son¹⁹. Enfin, elles ont ouvert des champs du sonore jusqu'alors peu explorés comme celui de l'espace – même si, dès 1951, Pierre Schaeffer et Jacques Poullin ont proposé un dispositif permettant de diffuser le son sur quatre haut-parleurs répartis autour et au-dessus de public²⁰ –, de l'interaction entre le musicien et l'électronique ou du mélange avec les autres arts numériques comme l'émergence du multimédia.

Il a fallu un demi-siècle pour voir éclore l'art électroacoustique tel que nous le connaissons aujourd'hui. Les évolutions technologiques ont souvent guidé les compositeurs et les musiciens vers de nouveaux espaces sonores. Mais nous avons aussi assisté à la dissolution progressive de la théorie schaefferienne de la musique concrète²¹. Dès les années 1970, les concepts qui succéderont à celui de l'objet sonore vont explorer de nouvelles directions, parfois en opposition à l'objet sonore lui-même, parfois en complétant la typomorphologie afin d'intégrer de nouveaux matériaux sonores, parfois en lui substituant des concepts provenant de champs de recherches extérieurs à la musique. Même si nous ne voyons pas cette dissolution comme une négation des travaux de Schaeffer, mais comme un élargissement du champ de la recherche musicale, il nous semble difficile de concevoir l'analyse musicale d'une œuvre électroacoustique actuelle à travers l'objet sonore.

Cette dissolution n'est pas venue de la recherche théorique, mais des compositeurs eux-mêmes : « l'écoute du créateur est rien moins que "réduite", objective, mais au contraire fortement subjective, fantasmatiquement aimantée²² ».

L'imagination du compositeur ne peut être limitée par une démarche théorique ou par un matériau réduit aux objets convenables. Mais cette dissolution de l'objet est aussi une impasse méthodologique par sa volonté d'être universelle, d'expliquer l'ensemble du phénomène sonore composé à partir d'un bipôle objet-structure :

« Au début des années 1960, une démarche analytique avait déjà tenté, avec A. Moles et P. Schaeffer, de créer une typo-morphologie universelle pour l'analyse de toute structure sonore. Malgré son intérêt, ce corpus d'outils analytiques, rassemblé quelques années plus tard dans le traité des objets musicaux, avait le grave défaut de ne prendre en compte ni le contexte ni le devenir de ces objets, par ailleurs plutôt sonores que musicaux²³. »

Après avoir étudié et réalisé des analyses morphologiques, nous préférons désormais une approche systémique s'attachant à étudier les relations plutôt que la nature précise des objets.

Les travaux que nous avons réalisés au sein du groupe d'étude sur les nouveaux espaces de la notation musicale²⁴ nous ont permis d'étudier plus précisément la place de l'analyse musicale et de la représentation dans le travail du compositeur ou de l'interprète. Ces derniers utilisent plusieurs

19. CHION, REIBEL, *op. cit.*, p. 251.

20. COUPRIE, Pierre, « La musique électroacoustique en concert : histoire et perspectives », in H. Ravet (éd.) *L'observation des pratiques musicales : méthodes et enjeux*, Paris, OMF, Université Paris-Sorbonne, 2001, p. 44.

21. COUPRIE, Pierre, « L'objet sonore est-il encore un concept utile pour l'analyse de la musique électroacoustique ? », in *Corpus et méthodes : traductions théoriques de l'hétérogénéité musicale*, Paris, Delatour, en préparation.

22. MION, Philippe, NATTIEZ, Jean-Jacques, THOMAS, Jean-Christophe, *L'envers d'une œuvre. De Natura Sonorum de Bernard Parmegiani*, Paris, INA-GRM/Buchet Chastel, 1982, p. 122.

23. MÂCHE, *op. cit.*, p. 22.

24. Le groupe d'étude sur les nouveaux espaces de la notation musicale a été mis en place au sein de l'AFIM (<http://notation.afim-asso.org/doku.php>) afin d'étudier les interactions entre l'étude et les pratiques artistiques dans les domaines de la notation et de la représentation musicale.

1.1. Outils théoriques, méthodes et technologies

théories et combinent les méthodes afin de renouveler leur pratique artistique sur le plan de l'inspiration créatrice ainsi que sur celui de l'usage de la technologie. Les éléments que nous présentons ici d'une manière séparée – théorie, méthode, outils – sont profondément liés dans la pratique. Il nous semble donc important qu'ils le soient aussi dans l'étude musicologique.

1.1.2 Les théories

La figure 1.1 présente le lien entre les différentes théories développées depuis les années 1970 et leurs relations avec la typomorphologie de Schaeffer. Nous avons réalisé ce tableau lors de nos recherches préparatoires au développement du logiciel EAnalysis. Il a été publié dans les actes du huitième congrès européen d'analyse musicale²⁵ (EuroMAC 2014). S'il existe des travaux directement liés à ceux de Schaeffer (représentés en traits pleins), les principales théories s'appuient sur de nouveaux concepts ou des concepts occultés dans le *TOM* (inscrits dans des ellipses). Les traits en pointillé mettent en évidence les liens faibles ou ceux que nous avons identifiés. Il n'est pas question ici de discuter de l'ensemble de ces théories, mais plutôt de présenter la manière dont nous les avons intégrées dans nos recherches.

La théorie schaefferienne est fondée sur la perception d'objets sonores à travers la pratique de l'écoute réduite. L'objectif de cette écoute est d'évacuer les propriétés qui ne sont pas directement issues du sonore, essentiellement les interprétations culturelles de l'objet (causalité et signification). L'objet sonore est donc décontextualisé, c'est en quelque sorte un « spécimen de laboratoire²⁶ » potentiellement *musicalisable*. Yves Daoust ajoute :

« [...] [le *TOM*] marque une tentative pour le moins paradoxale d'abstraction de la matière sonore, aseptisée, découpée en matériaux épurés et privés de leur signification, aux contours bien délimités et circonscrits par des critères typo-morphologiques contraignants et limitatifs²⁷. »

Dans notre analyse comparative des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle²⁸, nous avons montré comment le compositeur se concentre sur l'utilisation des sons équilibrés en 1963 pour la première partie du triptyque et explore ensuite les sons équilibrés et excentriques²⁹ pour les deux autres parties composées, en 1971 et 1972. À la suite de François Bayle, les compositeurs utiliseront très souvent ces sons excentriques. John Dack souligne d'ailleurs le paradoxe³⁰ du tableau récapitulatif de la typologie³¹ (TARTYP) de Schaeffer : les sons situés dans le cadre central, les plus aptes à devenir musicaux, sont en réalité formés comme des sons instrumentaux, et les sons excentriques, situés à la périphérie, les plus éloignés de ce modèle, sont considérés par Schaeffer comme trop originaux pour permettre un discours musical. Schaeffer, qui positionne la musique concrète comme l'opposée de la musique sérielle de l'époque, utilise pourtant un modèle de matériau identique. De plus, Dack met aussi en évidence la faiblesse du modèle expérimental de Schaeffer : l'absence d'expérimentation sur

25. COUPRIE, « Le développement d'un outil d'aide à l'analyse musicale : bilan et perspectives musicologiques », *op. cit.*

26. SCHAEFFER, R. Murray, *Le paysage sonore*, Paris, Wildproject, 3/2010, p. 195.

27. DAOUST, Yves, « Pensée concrète, démarche abstraite », *Circuit*, vol. 11, n° 1, 2000, p. 36.

28. COUPRIE, Pierre, « Analyse comparée des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle », *Demeter*, 2003, <http://demeter.revue.univ-lille3.fr/analyse/couprie.pdf>.

29. Dans la théorie schaefferienne, les sons excentriques sont trop peu aptes à devenir des objets musicaux.

30. DACK, John, « Excentric Sounds/Balanced Sounds and the "Sublime" » in *Electroacoustic Music Studies Network*, Paris, Université Paris-Sorbonne/INA-GRM, 2008, <http://www.ems-network.org/ems08/papers/dack.pdf>.

31. SCHAEFFER, *Traité de objets musicaux*, *op. cit.*, p. 459.

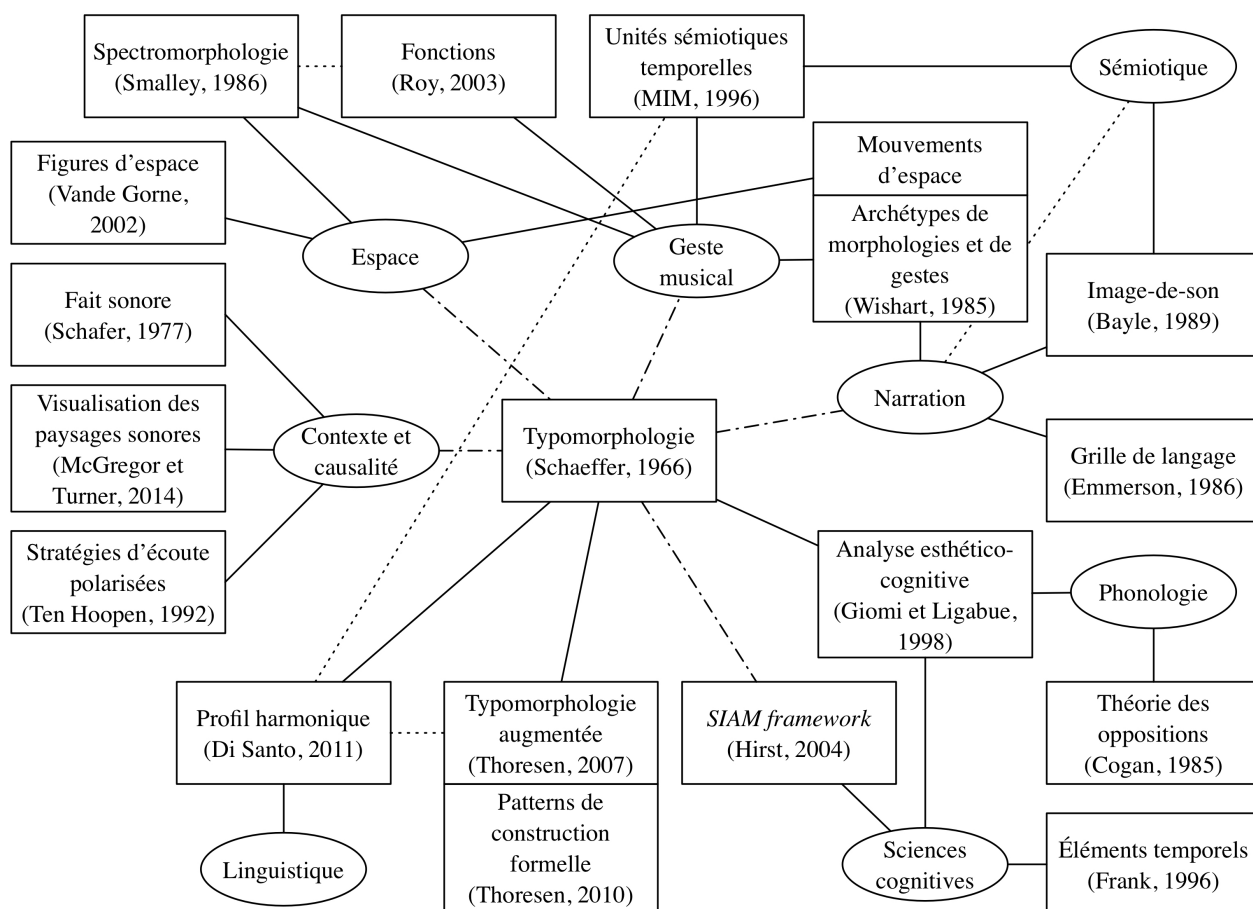


FIGURE 1.1 – Tableau récapitulatif des principaux outils théoriques utilisés dans l'analyse de la musique électroacoustique, réalisé lors de la préparation du développement du logiciel EAnalysis.

ces sons excentriques relégués à la marge et qui deviendront pourtant une composante essentielle des œuvres acousmatiques.

R. Murray Schafer propose dès 1977 dans son ouvrage *Le paysage sonore (The Tuning of the World)* une réintégration du contexte de l'objet dans son analyse. Prenant appui sur l'enregistrement de paysage sonore, l'auteur reprend une partie de la caractérisation typomorphologique³² en intégrant le rapport des sons à un « environnement en tant que signaux, symboles, tonalité ou empreintes³³ » : le fait sonore (*sound event*).

L'exploration des textures sonores complexes, souvent imprévisibles, possédant une durée démesurée et l'intégration de l'environnement de la prise de son, apportent un nouvel élan à la recherche musicale à peine dix années après la publication du *TOM*. Est-ce à dire que l'objet sonore n'existe déjà plus à la fin des années 1970 ? Ce serait un raccourci non réaliste. En effet, parallèlement à cette dissolution de l'objet, deux musicologues vont s'appuyer sur les travaux de Schaeffer pour les compléter avec les résultats de leurs recherches musicales. Ainsi, Lasse Thoresen propose une typomorphologie augmentée³⁴ complétant le TARTYP en ajoutant un ensemble de catégories intermédiaires afin

32. SCHAFFER, *op. cit.*, p. 203.

33. *Ibid.*, p. 195.

34. THORESEN, Lasse, « Spectromorphological Analysis of Sound Objects: An Adaptation of Pierre Schaeffer's Typomorphology », *Organised Sound*, vol. 12, n° 2, 2007, p. 129-141.

1.1. Outils théoriques, méthodes et technologies

d'affiner l'analyse des objets. De son côté, Jean-Louis Di Santo a précisé les sept classes de masse du tableau récapitulatif du solfège des objets musicaux³⁵ (TARSOM) pour proposer un système de transcription d'analyse du profil harmonique³⁶. Les deux auteurs s'appuient sur les catégories les plus prégnantes de la théorie schaefferienne pour proposer une extension de la typomorphologie utilisée dans leur enseignement ou l'analyse de leurs œuvres. De plus, ces deux approches ont été intégrées dans un développement informatique : le plugin Aural Sonology utilisable dans le logiciel Acousmographe et le logiciel Acousmoscribe³⁷.

Dans le *TOM*, Schaeffer élude presque complètement la dimension temporelle³⁸. Même s'il tente de l'intégrer à travers la notion de morphologie, l'évolution de la dynamique, du profil mélodique et celle du profil de masse apparaissent comme des simplifications de l'évolution interne des sons. De plus, si l'objet sonore du début des années 1960 semble entrer relativement facilement dans les cases du TARSOM, la complexité de l'évolution des sons de synthèse analogique, puis numérique et leurs interactions avec l'espace rendent obsolète la dimension temporelle du traité. Au début des années 1980³⁹, Denis Smalley développe la spectromorphologie⁴⁰ afin d'analyser l'évolution spectrale des sons. Toutefois, cette analyse ne peut se faire dans toutes les dimensions en même temps, l'auteur propose alors d'étudier chaque composant indépendamment en quatre étapes⁴¹ : la manière dont les hauteurs sont associées afin de former des typologies sonores, le groupement des typologies sonores en archétypes morphologiques, les progressions musicales et la mise en évidence des processus structurants. La spectromorphologie ouvre une nouvelle voie dans la recherche musicale. En proposant une terminologie, voire pour certaines catégories une symbolisation graphique de l'évolution temporelle du spectre, Denis Smalley nous offre une nouvelle définition de l'objet sonore. Si chez Schaeffer l'objet pouvait être isolé et mesuré, chez Smalley ses bordures deviennent floues, voire inexistantes, se dissolvant dans le contexte spectromorphologique, offrant ainsi plus de liberté dans l'analyse morphologique. L'objet a souvent été associé à son sens visuel, à une forme sur un fond, avec Denis Smalley, l'objet spectromorphologique devient une texture ou un geste qui ne se caractérise plus par une forme mais par une évolution. Toutefois, comme le souligne Michael Clarke, cette approche relève plutôt d'un travail intuitif sur le matériau de ses propres œuvres que d'un travail de recherche en analyse musicale⁴². Le compositeur a élaboré la spectromorphologie en couchant sur le papier sa manière de composer et en développant les concepts schaefferiens. La spectromorphologie, comme quasiment toutes les théories musicales en acousmatique, a été élaborée comme outil de composition et non comme théorie analytique. Mais, comme le remarque David Hirst⁴³ en analysant deux œuvres de Denis Smalley, *Wind Chimes* et *Base Metals* n'utilise qu'une part de la spectromorphologie

35. SCHAEFFER, *op. cit.*, p. 584.

36. DI SANTO, Jean-Louis, « Harmonic Profile: Typology and Notation », in *Electroacoustic Music Studies Conference*, New York, 2011, http://www.ems-network.org/IMG/pdf_EMS11_di_santo.pdf.

37. DESAINTE-CATHERINE, Myriam, DI SANTO, Jean-Louis, « L'Acousmoscribe, un éditeur de partitions acousmatiques », in *Electroacoustic Music Studies Network*, Buenos Aires, UNTREF, 2009, <http://www.ems-network.org/ems09/papers/disanto.pdf>.

38. MOLINO, Jean, « La musique et l'objet », in *Ouïr, entendre, écouter, comprendre après Schaeffer*, Paris, INA-GRM/Buchet-Chastel, 1999, p. 133.

39. SMALLEY, Denis, « Spectromorphology in 2010 », in *Portrait polychrome Denis Smalley*, Paris, INA-GRM, 2010, p. 89.

40. SMALLEY, Denis, « Spectro-Morphology and Structuring Processes », in S. Emmerson (éd.) *The language of electroacoustic music*, Londres, The Macmillan Press, 1986, p. 61-93.

41. ROY, *op. cit.*, p. 166.

42. CLARKE, Michael, *Extending Interactive Aural Analysis: Acousmatic Music*, 2009, <http://eprints.hud.ac.uk/16403/1/clarke.pdf>, p. 2.

43. HIRST, David, « From Sound Shapes to Space-Form: Investigating the Relationships Between Smalley's Writings and Works » *Organised Sound*, vol. 16, n° 1, 2011, p. 52.

pour composer et certains de ses aspects ne peuvent être employés pour analyser les œuvres du compositeur. Au milieu des années 1980, Trevor Wishart s'interrogera aussi sur la manière dont Schaeffer conçoit les objets sonores dans le temps⁴⁴. Son analyse, très différente de celle de Smalley, prendra appui sur la notion de paysage sonore afin de décrire la continuité d'un événement en fonction de son mode de production.

La description typomorphologique schaefferienne est fondée sur l'identification d'unités et l'analyse de leurs morphologies. Cette approche par le bas est souvent complétée par une approche par le haut dans laquelle l'identification d'unités est principalement fonctionnelle. Les fonctions musicales développées par Stéphane Roy durant les années 1980 et 1990 relèvent de la deuxième approche. Le compositeur les place ouvertement dans la dynamique des conduites de perception qui ont été développées par François Delalande dans les années 1980. L'identification des fonctions musicales se veut intuitive : « La grille fonctionnelle doit ainsi être considérée dans son application comme un ensemble de notions dont dispose l'analyste afin de nommer et de représenter ces unités appréhendées intuitivement par l'auditeur⁴⁵ ». Cette approche empirique intuitive est fondée sur l'identification d'unités prégnantes possédant un rôle dans leur contexte. Stéphane Roy propose 45 fonctions réparties en quatre catégories : *orientation* contenant des fonctions de démarrage ou d'arrêt, *stratification* permettant d'analyser la superposition de fonctions, *processus* décrivant des évolutions et *rhétorique* contenant des figures de style détachées de la morphologie. Les fonctions musicales se révèlent un outil d'analyse très intuitif, car elles sont basées sur des prégnances fortes comme le déclenchement, la transition, l'accumulation progressive ou les jeux d'imitations. Ainsi, l'identification des fonctions fait appel à la culture musicale de l'analyste. De plus, elles ne sont pas liées à des unités complètement identifiées au sens gestaltiste, les limites de l'unité n'ont pas à être parfaitement identifiées. Cette souplesse d'utilisation permet au musicologue de s'appuyer sur les fonctions musicales pour étudier les caractéristiques de l'évolution d'un matériau sonore ou comparer des œuvres différentes. Nous avons ainsi utilisé ces fonctions pour comparer les stratégies d'improvisation de plusieurs musiciens d'un même ensemble⁴⁶. Elles nous ont permis de mettre en évidence le lien fort entre l'instrument construit par le musicien et le jeu qu'il développe. Les fonctions ont aussi été très utiles pour montrer comment le compositeur Åke Parmerud élabore l'évolution de son discours musical⁴⁷ sur la répétition toujours renouvelée de deux fonctions simples (déclenchement et transition).

Les différentes théories présentées dans la figure 1.1 n'ont pas été développées pour l'analyse musicale ; à la suite de Schaeffer, les compositeurs ont cherché à créer leur propre solfège. Cette recherche répondait généralement aux besoins liés à leur charge d'enseignement. Toutefois, ces théories sont particulièrement intéressantes pour le musicologue : l'analyse n'est pas seulement le résultat d'un regard exogène sur l'œuvre, mais aussi celui d'une exploration interne des processus de composition révélés par ces outils compositionnels.

1.1.3 Les méthodes

Un des objectifs principaux du projet *New Multimedia Tools for Electroacoustic Music Analysis* a été d'interroger l'usage de ces théories pour l'analyse musicale en lien avec des corpus particuliers.

44. WISHART, Trevor, *On Sonic Art*, New York, Routledge, 2/1996, p. 177-189.

45. ROY, *op. cit.*, p. 340.

46. COUPRIE, Pierre, SOUSA DIAS, António de, « *Vertiges de l'espace : analyse d'une performance électroacoustique improvisée* », in *Comment analyser l'improvisation ?*, Paris, Delatour, en préparation.

47. COUPRIE, Pierre, « L'objet sonore est-il encore un concept utile pour l'analyse de la musique électroacoustique ? », *op. cit.*

1.1. Outils théoriques, méthodes et technologies

Comment ces outils théoriques peuvent-ils s'intégrer dans la démarche du musicologue ? Sont-ils liés à un corpus particulier ? Existe-t-il des outils théoriques et des méthodes de recherche utilisables sur l'ensemble du corpus électroacoustique ? Existe-t-il différents profils d'utilisateurs des outils d'analyse, et quelles pratiques les différencient-elles ? Nous avons étudié chacune de ces questions afin de proposer des réponses ou des exemples permettant de circonscrire certains usages. Ainsi posés, outils, méthodes et corpus forment un ensemble fortement lié. Les travaux auxquels nous avons participé durant les Journées d'analyse musicale 2013 et 2014 de la Société française d'analyse musicale ont permis de poser les mêmes questions sur un corpus d'œuvres et de théories bien plus large. Il semble donc que la question de l'adéquation entre les outils théoriques et les corpus soit une réflexion centrale à l'analyse musicale actuelle. L'étude de la musique électroacoustique n'échappe pas à cette question. La figure précédente montre qu'il existe des outils théoriques différenciés, répondant à des objectifs d'analyse du matériau et des pratiques compositionnelles/performatives très larges. De même, le corpus de la musique électroacoustique ne cesse de grandir, les expériences artistiques s'enrichissent au point de créer de nouveaux champs de création.

En observant les pratiques musicales, nos recherches nous ont amené à décrire deux tendances méthodologiques⁴⁸ :

1. les méthodes fondées sur la perception auditive du support audio : l'analyse et la transcription morphologique, les conduites d'écoute⁴⁹, l'*interactive aural analysis*⁵⁰ (IAA), le *framework SIAM*⁵¹, l'analyse de l'interprétation, *something to hold on factor*⁵² ;
2. les méthodes utilisant les sources de la création rendues disponibles par le compositeur : l'analyse des processus créateurs⁵³, la *faktura*⁵⁴, la recherche-crédation.

Ces tendances sont bien évidemment liées, ainsi l'IAA de Michael Clarke ou l'analyse d'œuvre mixte relèvent des deux tendances. Elles peuvent aussi se traduire en sémiologie par deux des sept situations analytiques proposées par Jean Molino et Jean-Jacques Nattiez⁵⁵ : l'esthétique externe et la poïétique externe.

Ces tendances résultent d'un ensemble de procédures – nous emploierons aussi l'idée de flux de travaux lorsque ces procédures seront liées à l'usage d'outils numériques – utilisées par l'analyste afin d'étudier l'œuvre selon un point de vue particulier. Même si elles sont liées par les supports d'étude ou le rôle des intervenants, elles se différencient aussi fortement. Ainsi, les méthodes de la première tendance sont toutes orientées sur l'analyse du son et non du ou des documents qui peuvent composer

48. COUPRIE, « Le développement d'un outil d'aide à l'analyse musicale : bilan et perspectives musicologiques », *op. cit.*

49. DELALANDE, François, *Analyser la musique, pourquoi, comment ?*, Paris, INA, 2013.

50. CLARKE, Michael, *Analysing Electroacoustic Music: An Interactive Aural Approach*, *Music Analysis*, n° 31, 2012, p. 347-380.

51. SIAM : *Segregation of sonic objects, horizontal and vertical Integration, Assimilation and Meaning* (HIRST, David, « Developing an Interactive Study Score for the Analysis of Electro-Acoustic Music » in *Proceedings of Australasian computer music conference*, Brisbane, ACMA, 2005, p. 85-88.).

52. LANDY, Leigh, « The "Something to Hold on to Factor" in Timbral Composition », *Contemporary Music Review*, vol. 10, n° 2, 1994, p. 59-60 ; WEALE, Rob, « Discovering How Accessible Electroacoustic Music Can Be: the Intention/Reception project », *Organised Sound*, vol. 11, n° 2, 2006, p. 189-200.

53. DONIN, Nicolas, « Vers une musicologie des processus créateurs », *Revue de Musicologie*, vol. 98, n° 1, 2012, p. 5-14.

54. BATTIER, Marc, « A Constructivist Approach to the Analysis of Electronic Music and Audio Art – Between Instruments and Faktura », *Organised Sound*, vol. 8, n° 3, 2003, p. 249-255 ; BAUDOUIN, Olivier, « La faktura, "outil conceptuel d'analyse" - Illustration avec *Stria*, de John Chowning », in *Journées d'informatique musicale*, Grenoble, ACROE, 2009, p. 77-83.

55. NATTIEZ, Jean-Jacques, *Musicologie générale et sémiologie*, Paris, Christian Bourgois, 1987, p. 177-178.

l'œuvre. Toutefois, l'IAA de Michael Clarke et les partitions interactives de David Hirst se distinguent aussi des autres par leur support de publication⁵⁶ réalisé sous la forme d'applications interactives permettant d'explorer l'œuvre d'une manière avancée. De même, l'analyse des processus créateurs qui consiste à suivre le compositeur afin de contextualiser les documents qu'il produit dans un historique de la création et ainsi expliquer ses choix musicaux est très différente de la *faktura* consistant à analyser les sources informatiques (programmes, *patches*, *listings*) afin de réaliser une ingénierie inversée de la création de l'œuvre. Les deux sont liées, elles œuvrent dans l'analyse des sources produites par le compositeur, mais les méthodes et les résultats sont très différents : la première vise à décrire le geste créatif, la seconde à modéliser l'œuvre.

Nos travaux de recherche nous ont amené à utiliser ces deux tendances, bien souvent en les mélangeant. Les travaux liés à la première tendance seront présentés et analysés dans les parties qui suivent, nous nous attacherons donc ici à présenter quelques exemples d'analyses et de réflexions théoriques autour de la seconde tendance.

Nous avons décrit l'interdépendance entre les méthodes, les outils numériques et les corpus dans le cas de l'analyse de l'improvisation électroacoustique. L'analyse des stratégies musicales des interprètes dans une improvisation (*Vertiges de l'espace*) entre trois musiciens producteurs⁵⁷ et le musicien António de Sousa Dias gérant la mise en espace sur une couronne de huit haut-parleurs disposés autour du public⁵⁸ nous a permis d'expérimenter quelques outils théoriques. De ces expérimentations, nous avons retenu les fonctions musicales de Stéphane Roy. Nous avons ainsi mis en évidence la forte disparité des stratégies musicales utilisées par les trois musiciens producteurs. L'analyse des voies séparées de chaque musicien en relation avec les caractéristiques techniques de leur instrument a mis en valeur la relation forte entre technologie et geste musical dans le jeu des musiciens.

Cette analyse s'est appuyée sur une étude détaillée d'un enregistrement multipiste de la performance. L'étude réalisée à partir de plusieurs improvisations du groupe les Phonogénistes sur un film de Man Ray⁵⁹ a jeté un pont entre l'analyse musicale, les conditions d'enregistrement et les outils numériques convoqués pour l'analyse. De plus, le film *Emak Bakia* sur lequel s'appuyaient cinq performances du groupe a été l'occasion d'interroger l'évolution d'une improvisation sur plusieurs années. L'analyse génétique portait aussi bien sur une étude diachronique des matériaux musicaux et des stratégies musicales – les cinq improvisations étant alors considérées comme une seule et même performance – que sur une étude synchronique du lien entre les structures musicales et la structure du film – une analyse aux niveaux paradigmatique et syntagmatique afin d'étudier les constantes stratégiques entre les différentes improvisations.

Toutefois, l'enjeu de cette étude n'était pas tant l'analyse proprement dite des différentes performances qu'une interrogation sur les méthodes et les outils numériques nécessaires à l'analyse d'une improvisation libre électroacoustique. L'analyse de l'improvisation *Vertiges de l'espace* a été réalisée sur un fichier audio multipiste ainsi que sur l'enregistrement des commandes de la mise en espace. Dans le cas d'*Emak Bakia*, seuls des enregistrements stéréophoniques étaient à notre disposition, les contraintes étaient donc bien plus fortes. Lorsque nous avons travaillé avec Christian Zanési sur

56. CLARKE, *Analysing Electroacoustic Music: An Interactive Aural Approach*, op. cit., p. 347 et HIRST, David, « Developing an Interactive Study Score for the Analysis of Electro-Acoustic Music » in *Proceedings of Australasian computer music conference*, Brisbane, ACMA, 2005, p. 85-88.

57. Le groupe les Phonogénistes : Laurence Bouckaert, Francis Larvor et nous-même.

58. COUPRIE, SOUSA DIAS, op. cit.

59. COUPRIE, Pierre, « Improvisation électroacoustique : analyse musicale, étude génétique et perspectives numériques », *Revue de Musicologie*, vol. 98, n° 1, 2012, p. 149-170.

1.1. Outils théoriques, méthodes et technologies

L'analyse d'un extrait de *M.É.* de Philippe Leroux⁶⁰, nous avons le fichier Pro Tools du compositeur à notre disposition afin de réaliser différentes versions permettant d'écouter les voies de mixage de l'œuvre. De même, l'analyse de notre pièce acousmatique *Jukurrpa - Quatre rêves*⁶¹ était basée sur l'ensemble des sources mises en œuvre durant le processus créatif. Ces quatre expériences nous ont amenés à réaliser un certain nombre de prospectives numériques⁶² afin de dégager une méthode d'analyse des performances électroacoustiques dans laquelle l'ensemble de la chaîne performance-analyse, de l'enregistrement des répétitions à la publication de l'analyse, est contrôlé afin de faciliter le travail musicologique. Cet article est fondateur du projet de recherche que nous présenterons dans le troisième chapitre.

1.1.4 Les outils numériques

L'analyse musicale assistée par ordinateur est traditionnellement représentée par deux approches : « l'une consistant à manipuler et modéliser des informations sonores et musicales, l'autre exploitant les possibilités multimodales⁶³ ». Philippe Lalitte propose aussi l'approche subsymbolique dans laquelle les unités ne sont pas des représentations des notes ou du spectre mais « émergent de la détection d'invariants et de caractéristiques distinctes contenues dans l'environnement⁶⁴ ». Dans le cas de l'analyse du son, l'approche subsymbolique peut s'appuyer sur les descripteurs audio psychoacoustiques. Ces trois approches ont été appliquées différemment à la musique électroacoustique. Si l'approche multimodale a été largement exploitée depuis l'apparition de l'Acousmographe au début des années 1990, l'utilisation de l'approche subsymbolique est bien plus récente. En effet, elle nécessite une manipulation et une analyse du son complexe qui n'ont été réellement exploitables en musicologie qu'à partir du début des années 2000. Les progrès dans l'analyse numérique du spectre sonore et dans le développement des descripteurs audio permettent désormais d'envisager une approche globale de l'analyse de la musique électroacoustique, indépendante de la segmentation en unités souvent peu adaptées à la complexité spectromorphologique des œuvres. De plus, la qualité des représentations que nous pouvons désormais obtenir nous offre le moyen de dépasser les travaux basés sur l'observation du tracé spectral comme ceux de Robert Cogan⁶⁵. Ce dernier a développé une méthode d'observation du sonagramme à l'aide d'une caractérisation par jeux d'oppositions. Cette approche, qui nous paraît maintenant trop simpliste, constitue une sorte de modélisation de ce que serait une perception superficielle d'un tracé spectral. Enfin, l'approche par manipulation et modélisation reste difficilement envisageable. En effet, malgré quelques résultats intéressants, par exemple dans notre analyse comparative des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle, cette approche s'appuie sur une segmentation du matériau musical qui est difficilement systématisable à l'ensemble d'une œuvre électroacoustique.

Si la typologie des approches proposée par Lalitte est particulièrement adaptée à l'analyse des partitions musicales, elle nous semble éloignée des impératifs imposés par le matériau et les sup-

60. COUPRIE, Pierre, ZANÉSI, Christian, « Mixage. Analyse d'un extrait de *M.É.* de Philippe Leroux », in *La musique électroacoustique*, Paris, INA-GRM/Hyptique, 2000, cédérom.

61. COUPRIE, Pierre, « Analyse de *Jukurrpa - Quatre rêves* », *Musimédiane*, n° 1, 2005, <http://www.musimediane.com/spip.php?article3>.

62. COUPRIE, « Improvisation électroacoustique : analyse musicale, étude génétique et prospectives numériques », *op. cit.*

63. LALITTE, Philippe, « Du son au sens : vers une approche subsymbolique de l'analyse musicale assistée par ordinateur », *Musurgia*, vol. 18, n° 1-2, 2011, p. 99.

64. *Ibid.*, p. 103-104.

65. COGAN, Robert, *New Images of Musical Sound*, Cambridge, Harvard University Press, 1984.

ports manipulés en électroacoustique. Comme nous l'avons évoqué précédemment, il est important de définir une typologie en articulant théories, méthodes et outils numériques. Dans un premier temps, l'articulation entre, d'une part, les outils numériques et, d'autre part, les théories et méthodes, passe par une définition des flux de travaux⁶⁶ utilisés en analyse musicale. La musique électroacoustique, à travers ses manifestations les plus diverses, pose des contraintes technologiques complexes au musicologue. Les formats de fichiers allant de l'audio aux environnements de programmation, les modes de production très diversifiés intégrant aussi bien l'écriture musicale que l'improvisation, l'usage du multimédia ou l'intégration dans une pratique interartistique, les modes de diffusion couvrant des dispositifs très variés, la prise en compte de lieux spécifiques autres que les salles de concert sont autant de variables du processus de création qui demandent à être prises en compte dans l'analyse musicale. Ainsi, la captation d'une performance électroacoustique en vue d'une recherche analytique n'a jamais réellement été envisagée comme étape essentielle du travail musicologique. Le résultat se traduit bien souvent par une limitation des œuvres analysées à partir du répertoire acousmatique historique ou d'un corpus des œuvres mixtes pour lesquelles le compositeur et son RIM ont laissé quelques documents représentatifs de la création musicale. La complexification de la création électroacoustique actuelle nécessite d'envisager l'analyse musicale sous un autre angle.

Nous avons proposé⁶⁷ de répartir les technologies numériques pour l'analyse de la musique électroacoustique en quatre catégories⁶⁸ : l'édition audiovisuelle, le filtrage et l'analyse-synthèse, l'extraction et la représentation des descripteurs audio, la représentation et l'annotation, l'aide à l'analyse musicale.

1.1.4.1 L'édition audiovisuelle, le filtrage et l'analyse-synthèse

La première catégorie regroupe les logiciels permettant de manipuler les fichiers audiovisuels par édition (station audionumérique) ou filtrage (logiciel ou plugins). L'édition permet de mettre en relation des fragments différents de l'œuvre ou d'œuvres différentes. Le résultat se présente sous la forme de listes de fragments de l'œuvre ou du matériau utilisé⁶⁹ ou bien, d'une manière plus élaborée, de cartes ou de tableaux⁷⁰ réunissant les éléments et la syntaxe émergeant de l'analyse. L'analyste peut aussi être amené à travailler à partir des fichiers de montage réalisés par le compositeur⁷¹. Nous ne détaillerons pas de technologies précises puisqu'elles sont d'un usage courant.

La modification du son par analyse-synthèse complète l'édition en révélant des parties masquées ou difficilement perceptibles du matériau. Différents logiciels permettent de décomposer le son en fréquences (SuperVP et Audiosculpt) ou en partiels (SPEAR), d'appliquer ensuite une modification de gain (renforcement ou filtrage) sur des zones spécifiques, puis de resynthétiser le fichier audio. Le rendu dépend bien évidemment de la qualité du logiciel, SuperVP restant une des meilleures tech-

66. COUPRIE, Pierre, « Analyser la musique mixte : vers une redéfinition des *workflows* en musicologie », in M. Battier (éd.) *Regards sur la musique mixte*, Paris, en préparation.

67. *Ibid.*

68. Ces exemples ne constituent pas une liste exhaustive (logiciels, plugins, *frameworks* ou API) mais une sélection des technologies réellement utilisables par le musicologue. En effet, il existe d'autres logiciels, mais leur maniement, les fichiers qu'ils produisent ou les flux de travaux qu'ils nécessitent restent très peu adaptés à une recherche musicologique.

69. CLARKE, *Analysing Electroacoustic Music: An Interactive Aural Approach*, *op. cit.*, p. 359.

70. COUPRIE, Pierre, « Cartes et tableaux interactifs : nouveaux enjeux pour l'analyse des musiques électroacoustiques », in *Journées d'informatique musicale*, Paris, Université Paris 8, 2013, p. 97-102, http://www.mshparisnord.fr/JIM2013/actes/jim2013_12.pdf.

71. COUPRIE, ZANÉSI, *op. cit.*

1.1. Outils théoriques, méthodes et technologies

nologies dans ce domaine, nous l'avons intégré dans EAnalysis et nous en détaillerons les fonctions dans le deuxième chapitre.

1.1.4.2 L'extraction et la représentation des descripteurs audio

La deuxième catégorie contient les logiciels permettant d'extraire des descripteurs audio et d'en créer des représentations. Ils sont souvent d'un usage complexe – les flux de travaux n'ayant pas été envisagés, l'échange et la conversion des fichiers peuvent être complexes – et nécessitent un travail de recherche avancé sur la mise en représentation des données. Les plus utilisés sont développés sous la forme de plugins en format Vamp et sont directement utilisables dans le logiciel Sonic Visualiser ou dans notre logiciel EAnalysis⁷². La bibliothèque Zsa.descriptors permet de calculer des descripteurs audio en temps réel⁷³.

La plus grande difficulté de l'usage des descripteurs en analyse réside dans leur interprétation. Celle-ci passe généralement par une mise en représentation. Nous avons montré la difficulté qu'il peut y avoir à réaliser de telles représentations adaptées à l'analyse musicale⁷⁴, l'usage de descripteurs reste très rare dans les études sur les musiques électroacoustiques. Avec le logiciel EAnalysis, nous nous sommes appuyé sur plusieurs techniques de représentation de données utilisées en mathématiques, en acoustique, dans la création musicale et dans l'analyse de l'interprétation afin de générer des graphiques adaptés à l'analyse d'œuvres électroacoustiques⁷⁵.

Une récente séance du séminaire *Geste sonore et paramètres*⁷⁶ a mis en évidence le décalage entre les recherches en acoustique musicale dans le domaine des descripteurs audio et les demandes des musicologues. Les travaux que nous avons menés avec le développement d'EAnalysis réduisent une partie de ce décalage en permettant aux chercheurs d'intégrer facilement l'usage des descripteurs dans leurs travaux.

1.1.4.3 La représentation et l'annotation

La catégorie représentation et annotation est la plus ancienne mais ne contient que peu de technologies. En effet, si de nombreux logiciels permettent l'ajout de marqueurs, peu d'entre eux proposent cette fonction pour une approche musicologique. Nous avons très souvent utilisé l'Acousmographe pour nos transcriptions morphologiques⁷⁷. Audiosculpt, ASAnnotation ou Sonic Visualiser sont les logiciels les plus couramment utilisés pour réaliser de simples marquages temporels à l'aide d'étiquettes textuelles.

Nous avons mis en évidence trois sous-catégories⁷⁸ : la représentation du son, l'annotation à l'aide de marqueurs et/ou de textes, la représentation graphique. S'il reste encore de nombreuses recherches à mener dans la première, les deux suivantes sont utilisées depuis de très nombreuses années.

72. EAnalysis permet d'utiliser le plugin LibXtrac proposant le calcul d'une quarantaine de descripteurs audio.

73. Nous ne la détaillerons pas ici, elle sera présentée plus en détail dans le troisième chapitre puisqu'elle entrera dans notre projet de recherche.

74. COUPRIE, Pierre, « Prolégomènes à la représentation analytique des musiques électroacoustiques », *Circuit*, vol. 25, n° 1, 2015, p. 41-57.

75. Comme pour les précédentes fonctions, celles-ci seront décrites en détail dans le deuxième chapitre.

76. Ce séminaire, placé sous la direction de Jean-Marc Chauvel, a eu lieu à l'université de Paris-Sorbonne au début de l'année 2015.

77. Voir l'annexe A, page 99, pour une liste de ces transcriptions.

78. COUPRIE, Pierre, « Analyse de la musique mixte : logiciels, procédures, workflows », in B. Bossis, A. Bonardi, P. Couprie, V. Tiffon (éd.) *Analyse de la musique mixte*, Paris, Delatour, en préparation.

1.1.4.4 L'aide à l'analyse musicale

Il faut attendre les années 1980⁷⁹ pour voir apparaître des logiciels spécifiquement développés pour l'analyse musicale. Ils ont longtemps été dédiés à l'analyse computationnelle de la musique écrite, et le développement de technologies d'aide à l'analyse de la musique électroacoustique est très récent. Dans le domaine de l'analyse computationnelle, le logiciel Open Music reste une référence et ses récentes évolutions afin de mieux intégrer l'audio en font un excellent outil. Toutefois, comme nous l'avons évoqué précédemment, ce type d'analyse est très peu utilisé dans notre corpus⁸⁰.

Il existe actuellement trois logiciels spécifiquement développés pour l'aide à l'analyse de la musique électroacoustique :

1. le plugin Aural Sonology à installer dans le logiciel Acousmographe et développé par l'INA-GRM à partir des travaux de Lasse Thoresen⁸¹. Ce plugin est malheureusement très peu adapté à un usage simple et efficace, son maniement nécessite de très nombreuses manipulations⁸² ;
2. le logiciel TIAALS, proposant des outils pour l'exploration interactive du spectre sonore et la réalisation de tableaux à partir de fragments de l'œuvre analysée ;
3. le logiciel EAnalysis qui sera présenté dans le deuxième chapitre.

Les recherches menées dans cette catégorie sont très récentes et concernent le cœur des travaux et du projet de recherche présentés dans ce mémoire.

Il nous reste un dernier point à présenter dans cette section dédiée aux outils théoriques, aux méthodes et aux technologies. L'étude de la terminologie est liée à chacun de ces aspects du contexte scientifique et a constitué la base de nos premières recherches.

1.1.5 La terminologie

Nos premières recherches sur la terminologie du genre électroacoustique ont commencé lors de notre année de DEA. Nous avons réalisé un travail d'introduction sur la terminologie⁸³ en français, anglais et allemand. Nous avons ensuite poursuivi ce travail avec le projet de recherche EARS⁸⁴ (*Electroacoustic Resource Site*). EARS a été initié en 2002 par Leigh Landy et Simon Atkinson au *Music, Technology and Innovation Research Centre* (MTIRC) de l'université De Montfort de Leicester. La première phase a permis la mise en ligne d'un glossaire en anglais. En 2004 Rob Weale et moi-même avons rejoint le projet pour la deuxième phase. EARS a alors bénéficié d'un financement AHRC et a permis la collaboration de plusieurs institutions : le CEIARtE à Buenos Aires (Ricardo Dal Farra), le centre Hexagram et l'université de Concordia à Montréal (Rosemary Mountain et Ricardo Dal

79. LALITTE, *op. cit.*, p. 99.

80. Nous avons publié deux articles qui exploitent les techniques d'analyse computationnelle : la description d'une technique permettant de segmenter le matériau en unités pour ensuite les analyser avec des outils empruntés à la statistique (COUPRIE, Pierre, « Un modèle d'analyse pour les musiques électroacoustiques », in *Journées d'informatique musicale*, Bourges, IMEB-ENSI, 2001, p. 195-205.), une analyse comparative d'un triptyque basée sur la mise en relation des unités segmentées dans chaque partie (COUPRIE, « Analyse comparée des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle », *op. cit.*). Toutefois, ces techniques restent peu adaptées à l'analyse de la musique électroacoustique.

81. THORESEN, « Spectromorphological Analysis of Sound Objects: An Adaptation of Pierre Schaeffer's Typomorphology », *op. cit.* ; THORESEN, Lasse, « Form-Building Patterns and Metaphorical Meaning », *Organised Sound*, vol. 15, n° 2, 2010, p. 82-95.

82. Nous analyserons plus en détail les limites de cet outil dans la partie 1.4.3.

83. COUPRIE, Pierre, *La terminologie du genre électroacoustique*, Mémoire de DEA sous la direction de Jean-Yves Bosseur, Paris, Université Paris-Sorbonne, 1998.

84. Le projet est disponible sur le site : <http://www.ears.dmu.ac.uk>

1.1. Outils théoriques, méthodes et technologies

Farra), l'université Paris-Sorbonne (Marc Battier), l'*Electronic Music Foundation* à New York (Joel Chadabe), l'université des arts à Berlin (Martin Supper) ainsi que l'université et le conservatoire central de musique de Beijing (Kenneth Fields).

L'objectif du projet EARS était de rendre disponibles des ressources textuelles indispensables pour la conduite de recherches dans le domaine de l'électroacoustique. Rob Weale et moi-même étions chargés d'établir un référencement des écrits les plus importants de l'histoire de la musique électroacoustique. Les bibliothèques parisiennes étant particulièrement bien fournies, notre travail a consisté à répertorier tous les écrits en français et une partie des écrits en anglais disponibles dans la capitale. Rob Weale et Leigh Landy se sont chargés de la majorité des écrits en anglais présents dans les bibliothèques anglaises et américaines. Toutes les références étaient accompagnées de résumés en français et en anglais.

Parallèlement au travail de référencement, notre travail a aussi consisté à réaliser un site internet chargé d'accueillir l'ensemble de ces références. Le site a été développé avec le CMS Spip⁸⁵ et les modèles de pages ont été réalisés dans un mélange de langage Spip et PHP. Le site contient quatre rubriques :

1. une page d'accueil contenant les informations de présentation du site avec la possibilité donnée aux visiteurs de soumettre de nouvelles références ou de corriger les références existantes ;
2. un glossaire élaboré par Leigh Landy et Simon Atkinson contenant 559 termes répartis en six catégories : *Disciplines of Study [DoS]*, *Genres and Categories [G&C]*, *Musicology of Electroacoustic Music [MEM]*, *Performance Practice and Presentation [PPP]*, *Sound Production and Manipulation [SPM]*, *Structure, Musical [Str]* ;
3. une bibliographie avec plus de 5 000 références liées aux termes du glossaire à l'aide de mots-clés ;
4. quelques publications en ligne issues de différentes revues ou en publications originales. Ces dernières contiennent notamment une traduction en portugais du *Solfège de l'objet sonore*⁸⁶ et une traduction du *Guide des objets sonores* en anglais⁸⁷.

Le projet et son site ont eu un très grand succès sur le plan international, les visites n'ayant cessé d'augmenter. Malheureusement, des problèmes techniques ont perturbé le site à plusieurs reprises, nécessitant des déménagements successifs et une réduction des fonctionnalités. La version allégée actuellement en ligne contient l'intégralité des données mais sa navigation est moins aisée. Depuis quelques mois, nous commençons à réfléchir sur une nouvelle version dans laquelle les choix techniques permettraient de réaliser un moissonnage automatique des références au fur et à mesure de leur apparition sur le web et seraient en accord avec les normes d'archivage afin de garantir la pérennité du projet. Nous espérons que cette troisième version sera disponible à partir de 2017.

Le travail de référencement bibliographique réalisé avec le projet EARS a été une opportunité nous permettant de préparer l'arrivée du logiciel EAnalysis. Il a aussi été un formidable catalyseur nous poussant à intégrer dans nos recherches mais aussi dans notre pratique artistique de l'improvisation électroacoustique, des expérimentations peu présentes voire absentes des concerts parisiens. Ainsi, le *circuit bending* et le *live coding* sont entrés en résonance avec les expériences artistiques que notre

85. Spip est un système de gestion de contenu (CMS) français distribué sous licence GNU/GPL 3 et permettant la création de sites internet dynamiques : <http://www.spip.net>

86. SCHAEFFER, Pierre, REIBEL, Guy, FERREYRA, Beatriz, *Solfejo do objecto sonoro*, Traduction portugaise par António De Sousa Dias, 3/2007, <http://www.ears.dmu.ac.uk>

87. CHION, Michel, *Guide To Sound Objects. Pierre Schaeffer and Musical Research*, Traduction en anglais par John Dack et Christine North, 2/2009, <http://www.ears.dmu.ac.uk>

collectif (les Phonogénistes) a réalisées avec le sculpteur Laurent Golon ou avec les développements d'interfaces interactives que nous avons menés à l'aide du logiciel Max. Cette ouverture internationale sur l'ensemble des champs du genre électroacoustique nous a aussi fait prendre conscience du lien fort qui pouvait exister entre la pratique artistique, la recherche musicologique et le développement informatique. Le lien entre ces trois aspects de notre travail sur lequel nous avons ouvert ce mémoire a réellement pris naissance avec le projet EARS. D'autre part, le champ d'études de la musique électroacoustique est très riche sur le plan terminologique. Des théories et méthodes présentées précédemment aux technologies analogiques puis numériques en passant par les outils analytiques fournis par l'acoustique musicale, le lexique est très important. Le projet EARS contient à lui seul plus de 550 termes, et cet ensemble est le résultat d'une sélection. Étudier ce genre musical encore jeune nécessite d'intégrer une recherche terminologique afin de préciser, fixer ou faire évoluer le sens des mots en accord avec les études historiques et les pratiques analytiques.

L'étude musicologique du matériau électroacoustique à l'aide des technologies numériques peut être sans le support de la représentation. Vincent Tiffon a proposé l'enseignement d'une méthode d'analyse que l'on pourrait qualifier en partie d'acousmatique⁸⁸ et dans laquelle les étapes principales sont réalisées sans visualisation. Toutefois, l'analyse des macrostructures ou de la forme musicale nécessite de passer par une transcription ou une représentation permettant de fixer la mémoire des sons mais aussi de modéliser les différents niveaux de structures.

1.2 De l'analyse musicale à la transcription morphologique

1.2.1 De l'écoute acousmatique à l'écoute instrumentée

Dans le *TOM*, Schaeffer a choisi le terme « acousmatique » afin de caractériser une écoute dans laquelle la recherche des modes de production et de transmission n'intervient pas. Il place l'écoute au cœur du phénomène à étudier⁸⁹. Or cette écoute acousmatique « interdit symboliquement tout rapport avec ce qui est visible, touchable, mesurable⁹⁰ ». Par contre, l'auditeur acousmate peut disséquer le son en l'isolant, en variant sa vitesse de lecture, son intensité, en le répétant, etc. Il s'agit de la première écoute instrumentée. Les technologies analogiques de lecture et de montage permettent à Schaeffer et aux membres du Groupe de recherches musicales d'analyser les sons en objets sonores : « On passe ainsi du "faire" à l'"entendre" par un renouvellement de l'"entendre" par le "faire"⁹¹ ».

Utiliser la visualisation, la transcription ou la représentation pour l'étude d'une musique avant tout créée pour se passer d'image peut paraître paradoxal :

« L'écoute instrumentée par le sonagramme conduit à une situation paradoxale, que nous présentons ici en deux étapes. Le sonagramme permet le transfert, dans le domaine visuel, des sons et des musiques conçues précisément en dehors de cette logique visuelle. Au cœur de ce paradoxe réside la contradiction entre une musique acousmatique et une méthode d'analyse antiacousmatique. L'écoute instrumentée par le sonagramme altère le caractère purement acousmatique des musiques du même nom⁹². »

88. TIFFON, Vincent, « La représentation sonographique est-elle une aide pour l'analyse perceptive de la musique électroacoustique ? », *Lien*, 2006, p. 5-6.

89. SCHAEFFER, *Traité des objets musicaux*, *op. cit.*, p. 92.

90. *Ibid.*, p. 93.

91. *Ibid.* p. 99.

92. TIFFON, *op. cit.*, p. 4.

1.2. De l'analyse musicale à la transcription morphologique

Pourtant, en 1952, Schaeffer avait émis la possibilité de travailler la relation de l'image et du son à travers la peinture abstraite :

« Certaines œuvres de musique concrète appellent immédiatement la traduction graphique et il ne serait pas impossible, par exemple, de composer une musique concrète en exprimant les équivalences de matière et de forme à partir d'une peinture abstraite. Cette peinture serait en tout cas une meilleure partition que des notes sur du papier interliné. Ainsi, il existe indiscutablement des rapports entre ces deux phénomènes nouveaux qui établissent un pont, cette fois solide, entre peinture et musique⁹³. »

Gaël Tissot détaille les relations complexes entre la musique et les arts plastiques au sein du GRM. Il avance qu'il y a très souvent eu une convergence entre le travail morphologique du compositeur et la notion de plasticité provenant du domaine du visuel⁹⁴, tout en débordant du cadre du Groupe Recherche Image (GRI).

La partition animée réalisée par Jacques Vidal et François Delalande⁹⁵ sur le quatrième mouvement des *Études aux objets* de Pierre Schaeffer (1959) montre que l'idée d'utiliser une visualisation pour une écoute instrumentée de la musique concrète remonte au moins aux années 1970. Quant à elle, l'activité même d'écoute instrumentée a probablement commencé avec l'histoire de l'enregistrement⁹⁶. Le glissement entre l'écoute acousmatique et l'écoute instrumentée a été accentué avec l'apparition des technologies numériques et de leurs interfaces graphiques, la manipulation du son ne pouvant plus se faire qu'à travers une représentation de celui-ci. Nous ne pensons pas que l'acousmatique et la visualisation du son soient des opposés, ce sont plutôt des complémentaires. Nous avons déjà détaillé les pratiques d'écoute dans lesquelles une forme de visualisation permet d'améliorer la compréhension du phénomène écouté⁹⁷. Avec l'analyse musicale, nous allons voir comment la visualisation devient un préalable indispensable, l'écoute acousmatique reprenant le dessus à plusieurs reprises durant le parcours analytique en bénéficiant de tout l'enrichissement apporté par l'écoute instrumentée.

1.2.2 Pourquoi transcrire ?

Nous avons précédemment évoqué l'absence de support visuel comme étant un frein au développement de l'analyse de la musique électroacoustique. L'ethnomusicologue Simha Arom souligne que l'étude des musiques de tradition orale nécessite d'« avoir constamment sous les yeux une *image globale* du document sonore⁹⁸ ». La proximité entre la démarche d'analyse employée en ethnomusicologie et celle utilisée dans le répertoire des œuvres de support a permis le développement de la transcription dans la lignée de celle employée en linguistique structurale. Cette filiation se retrouve chez plusieurs chercheurs comme François Delalande utilisant la transcription comme étape préana-

93. SCHAEFFER, *A la recherche d'une musique concrète*, op. cit., p. 114-115.

94. TISSOT, Gaël, « La musique électroacoustique au GRM : un art plastique ? », *Filigrane*, n° 16, 2013, <http://revues.mshparisnord.org/filigrane/index.php?id=543>

95. VIDAL, Jacques, DELALANDE, François, *Partition animée*, Paris, INA, 1970, <http://www.ina.fr/video/CPF03008561>.

96. DELALANDE, François, « Pratiques et objectifs des transcriptions des musiques électroacoustiques », in R. Campos, N. Donin (éd.) *L'analyse musicale, une pratique et son histoire*, Genève, Droz/HEM, 2009, p. 144.

97. COUPRIE, Pierre, « L'écoute et les technologies numériques », in F. Madurell (éd.) *Les pratiques d'écoute individuelles*, Paris, OMF, Université Paris-Sorbonne, 2005, p. 51-62.

98. AROM, Simha, *La boîte à outils d'un ethnomusicologue*, Montréal, Presses de l'Université de Montréal, 2007, p. 255.

lytique⁹⁹ ou François-Bernard Mâche liant les unités à leur contexte dans une dynamique phonologique¹⁰⁰. Transcrire une œuvre électroacoustique suit en partie les étapes développées pour l'étude structurale des langues. En partie, car certaines étapes comme la commutation ou la notion de classe d'équivalence ne sont que rarement applicables d'une manière systématique. La segmentation du flux musical restant une des étapes les plus problématiques de l'analyse des œuvres électroacoustiques¹⁰¹. Ainsi présentée et pour reprendre les propos de Charles Seeger¹⁰² sur l'usage des graphiques en musicologie, la transcription reste un outil avant tout descriptif.

Parallèlement à l'usage de la transcription comme étape préanalytique, son utilisation dans un cadre pédagogique ou de présentation reste la plus employée. Les transcriptions que nous avons réalisées pour le cédérom *La musique électroacoustique*¹⁰³ nous ont amené à développer un code graphique attrayant et facilement compréhensible pour un public néophyte. Les couleurs, les formes et leur agencement sur l'espace graphique ont été choisis afin de renforcer la compréhension et la mémorisation des œuvres. En 2000, nous étions enseignant en éducation musicale au niveau collègue et nous avons expérimenté l'usage du dessin dans l'analyse d'œuvre avec des élèves âgés de 11 à 15 ans. Depuis nos premières expériences dès le milieu des années 1990, nous avons élaboré un protocole pédagogique permettant de travailler la perception et l'analyse des sons ainsi que la compréhension de formes complexes. Le dessin – la transcription – permet à l'élève de s'approprier l'œuvre en créant son propre code graphique. Ce codage correspond généralement à l'origine ou au contexte d'utilisation des sons. L'origine des sons est souvent imaginaire – en cela elle s'approche fortement du modèle réduit de l'apparaître des images-de-sons proposées par François Bayle¹⁰⁴ –, elle permet à l'élève de décrire plus facilement ce qu'il perçoit et d'en déduire sa perception de la forme. Comprendre que la forme peut être le résultat d'une perception, qu'elle peut être différente de celle imaginée par le compositeur¹⁰⁵ ou de celle perçue par les autres, est souvent une grande avancée dans l'éducation de l'oreille de l'enfant. L'étape de transcription nous a aussi permis de travailler la création électroacoustique avec les élèves en créant avec d'autres sons les partitions réalisées sur des œuvres électroacoustiques. Nous voyons donc que cet usage de la transcription, souvent évacué des écrits théoriques, est au contraire riche de possibilités. Enfin, la transcription est très couramment utilisée afin d'exemplifier un discours analytique. Nous avons ainsi créé de nombreuses transcriptions d'extraits d'œuvres afin d'accompagner nos publications, cette dernière étape devenant complémentaire de l'analyse musicale¹⁰⁶. Certaines d'entre-elles sont interactives, dans ce cas, elles nécessitent souvent de faire des choix technologiques complexes que nous décrirons plus loin.

99. DELALANDE, *Analyser la musique, pourquoi, comment ?*, op. cit., p. 12.

100. MÂCHE, op. cit., p. 132.

101. Nous étudierons la question de la segmentation dans le deuxième chapitre.

102. SEEGER, Charles, « Prescriptive and Descriptive Music-Writing », *The Musical Quarterly*, vol. 44, n° 2, p. 184-195.

103. COUPRIE, Pierre, « Transformation/transmutation. Analyse d'un extrait de *Don Quichotte Corporation* d'Alain Savouret », in *La musique électroacoustique*, Paris, INA-GRM/Hyptique, 2000, cédérom ; COUPRIE, Pierre, « Comment c'est fait ? Analyse graphique d'un extrait de *De Natura Sonorum* de Bernard Parmegiani », in *La musique électroacoustique*, Paris, INA-GRM/Hyptique, 2000, cédérom.

104. BAYLE, François, *Musique acousmatique propositions... propositions*, Paris, INA-GRM/Buchet Chastel, 1993, p. 94.

105. COUPRIE, Pierre, « Analyser l'imaginaire dans la musique électroacoustique de Jean-Claude Risset », in M. Grabócz (éd.) *Modèles naturels et scénarios imaginaires dans les œuvres de Péter Eötvös, François-Bernard Mâche et Jean-Claude Risset*, Université de Strasbourg/CDMC, en préparation.

106. COUPRIE, Pierre, « La représentation graphique : un outil d'analyse et de publication de la musique électroacoustique », *Doce Notas*, n° 19-20, Madrid, 2009, p. 349-356.

1.2. De l'analyse musicale à la transcription morphologique

Qu'elle soit une étape préanalytique, un outil pédagogique ou un exemple accompagnant un discours, la transcription est généralement une étape incontournable. Nous allons maintenant présenter notre méthode de transcription et nous interroger sur sa réalisation technologique.

1.2.3 La conception graphique d'une transcription morphologique

Créer une transcription nécessite de s'interroger sur les contraintes musicologiques – essentiellement dictées par l'objectif analytique –, les contraintes techniques – dépendantes des logiciels utilisés et du support de production/publication de la transcription – et le public auquel elle est destinée.

Les contraintes musicologiques résultent de choix analytiques et répondent à une simple question : quels critères souhaitons-nous transcrire ? L'analyste sélectionne les critères à transcrire en fonction de ses objectifs analytiques. La mise en graphique de ces critères analytiques dépend ensuite des choix effectués lors de l'étape de *mapping*¹⁰⁷ que nous étudierons ensuite.

Ces choix musicologiques et graphiques vont conditionner les choix technologiques. L'auteur ne doit pas seulement prendre en considération ses objectifs musicologiques, il doit aussi envisager différentes solutions techniques. La pratique de l'analyse musicale est avant tout expérimentale et empirique¹⁰⁸. Ainsi, les choix musicologiques effectués lors d'une première étude de l'œuvre ne seront pas forcément ceux qui resteront dans l'analyse finale et, par conséquent, dans la ou les transcriptions qui l'accompagneront. Donc, prendre en compte les contraintes technologiques signifie de faire des choix afin de faciliter la modification de la transcription durant l'étape expérimentale. L'auteur veillera ainsi à répartir les graphiques sur des calques différents ou à marquer précisément les positions temporelles des éléments musicaux transcrits. Peut-être est-il souhaitable de réaliser une première transcription neutre sous la forme de rectangles simplement positionnés temporellement et spectralement.

Enfin, cet ensemble de choix ne peut être effectué sans prendre en compte l'objectif de la transcription. Plusieurs possibilités s'offrent à l'analyste :

1. un support simple d'expérimentation : l'analyste devra réaliser sa transcription en fonction des étapes qui suivront en laissant la possibilité de la faire évoluer ;
2. une modélisation de la structure musicale : l'analyste ne s'attachera pas ici à créer une transcription détaillée des unités graphiquement satisfaisante, mais plutôt une transcription sous la forme d'un plan de structures révélant les relations entre les parties ;
3. un exemple permettant d'illustrer une publication : dans ce cas, il conviendra de réaliser une transcription parfaitement adaptée à la discussion qui l'accompagne. De plus, il sera préférable de créer une transcription dont la lecture est la plus intuitive possible, l'usage d'une légende sera réservé aux exemples complexes.

Bien évidemment, ces possibilités peuvent être combinées, mais il sera bien souvent plus simple de réaliser des transcriptions différentes en fonction des objectifs.

Nous avons commencé à aborder cette question précédemment avec l'aspect pédagogique d'une transcription, l'analyste devra aussi prendre en compte le choix du public visé :

1. un public néophyte dans le domaine musical ou dans celui de la musique électroacoustique : la transcription devra être la plus intuitive possible, il conviendra de privilégier les relations iconiques entre les sons représentés et leurs formes graphiques, il sera possible de laisser libre

107. Cette étape permet de lier chaque critère d'analyse aux propriétés graphiques des annotations.

108. COOK, Nicholas, CLARKE Eric, « Introduction: What is Empirical Musicology? », in N. Cook, E. Clarke (éd.) *Empirical musicology Aims, methods, prospects*, Oxford, Oxford University Press, 2004, p. 3.

cours aux conduites de perception en proposant une transcription artistique ou une transcription ne respectant pas les normes d'une partition musicale ;

2. un public de connaisseurs (auditeurs, compositeurs ou musiciens) : l'analyste devra veiller à prendre appui sur les normes des partitions musicales afin d'utiliser les connaissances implicites du public ;
3. un public de musicologues spécialistes : la transcription sera le support d'un discours analytique, elle devra donc illustrer le propos de l'auteur avec une grande précision graphique et une justification scientifique des choix de transcription.

Concevoir une transcription nécessite donc de faire des choix qui répondent, comme l'analyse musicale, aux quatre questions qui ont été à la base du projet *New Multimedia Tools for Electroacoustic Music Analysis : For which users ? For which works/Genres ? With what intentions ? With which tools and approaches ?*

Nous allons maintenant détailler les différentes possibilités graphiques et montrer comment nous avons résolu certaines difficultés dans nos transcriptions.

1.2.3.1 L'espace de la transcription

L'espace de la transcription est le cadre qui contiendra un ou plusieurs arrière-plans ainsi que les annotations graphiques. Cet espace contient plusieurs dimensions :

1. les dimensions du plan données par l'axe horizontal, qui représente toujours le temps, et l'axe vertical, qui peut représenter :
 - a. des hauteurs approximatives : dans chacune des trois courtes pièces qui composent les *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle, le compositeur utilise des sons harmoniques provenant d'instruments de musique ou de sons naturels comme les chants d'oiseaux. Si la hauteur exacte de ces sons n'a que peu d'importance dans le langage du compositeur, leur représentation sous la forme d'une ligne simple positionnée dans un registre particulier permet de les différencier facilement des autres sons. Dans le cas de la transcription de *Vox vocis, f*¹⁰⁹ d'Ivo Malec, nous avons aussi décidé de représenter les sons à hauteur déterminée par des lignes fines. Cette transcription est un peu particulière, car c'est la seule que nous avons réalisée sur une œuvre instrumentale ;
 - b. des sites spectraux : c'est une utilisation courante de l'axe vertical dans la transcription morphologique. Dans l'analyse d'« Ondes croisées », extrait de *De Natura Sonorum* de Bernard Parmegiani¹¹⁰, le dessin de l'épaisseur spectrale et de la position approximative du son sur l'échelle des fréquences nous a permis de mettre en évidence, d'une part, le lien entre les sites spectraux et les catégories de son et, d'autre part, l'évolution spectrale du matériau du grave vers l'aigu ;
 - c. des positions sur le panoramique : l'extrait de *Don Quichotte Corporation* d'Alain Savouret a la particularité d'être construit sur des sons faciles à segmenter et répondant à une forme en thème et variations. De plus, chaque son est positionné sur le panoramique d'une manière facilement perceptible, il ne fait aucun doute que le compositeur a utilisé ce critère comme

109. COUPRIE, Pierre, TOSI, Michèle, « *Vox vocis, f* », in *Portrait polychrome Ivo Malec*, Paris, INA-GRM, 2010, <http://www.inagrm.com/categories/ivo-malec>

110. COUPRIE, « Comment c'est fait ? Analyse graphique d'un extrait de *De Natura Sonorum* de Bernard Parmegiani », *op. cit.*

1.2. De l'analyse musicale à la transcription morphologique

un des paramètres de variation. Lors de la réalisation de cette transcription, il nous a semblé évident de rendre compte de ce critère en positionnant verticalement les graphiques représentant les sons en fonction de l'espace du panoramique. La transcription met en évidence des gestes ou l'articulation entre l'espace du panoramique et le déroulement de la forme ;

- d. des choix esthétiques : dans les transcriptions d'*Hétérozygote* et des *Presque rien* de Luc Ferrari ¹¹¹, nous avons expérimenté deux limites : le niveau de simplicité pour qu'une transcription reste lisible et la limite entre transcription analytique et représentation esthétique. Nous avons utilisé la dimension esthétique pour mettre en évidence la forme globale qui est souvent éludée lors de l'analyse de paysages sonores ou de musiques anecdotiques.
2. les dimensions contenues dans l'arrière-plan :
 - a. dans le cas d'un sonagramme, l'axe vertical représente les fréquences et les couleurs représentent les intensités en niveau de gris ou en pseudo-couleurs ;
 - b. dans le cas d'une forme d'onde, l'axe vertical représente l'amplitude du signal sonore en miroir et en échelle linéaire.
 3. les dimensions contenues dans l'organisation des annotations les unes par rapport aux autres : elles peuvent se superposer et induire ainsi un ou plusieurs plans d'espace, d'intensité ou un plan basé sur un critère analytique particulier ;
 4. tout autre paramètre analytique : dans la représentation d'un extrait de *M.É.* de Philippe Leroux, nous avons décidé de mettre en évidence l'orchestration de l'œuvre. La représentation utilise l'image des formes d'ondes colorées provenant de la station d'informatique musicale utilisée par le compositeur. L'axe vertical représente alors les différentes voies de mixage.

Le choix des échelles présentes sur chacun des deux axes dépend donc des éléments qui seront représentés. Toutefois, ces éléments – la représentation sonore en arrière-plan et les annotations en premier plan – peuvent être superposés, il est donc courant de mélanger les échelles sur l'axe vertical. Deux combinaisons sont généralement utilisées :

1. la superposition des échelles de fréquences et d'amplitudes (sonagramme et forme d'onde) ;
2. la superposition des échelles de fréquences et d'un paramètre d'analyse (sonagramme et annotations).

Toutefois, nous n'avons jamais utilisé de superposition plus complexe afin de conserver une certaine lisibilité à la transcription. De plus, il est un aspect que nous n'avons jusqu'ici jamais employé et qui fera l'objet de développements futurs dans EAnalysis, il s'agit de l'utilisation d'annotations indépendantes de l'arrière-plan : annotations flottantes ou annotations animées.

1.2.3.2 Couleurs du sonagramme et de la forme d'onde

Durant l'étape de transcription, le sonagramme et la forme d'onde sont utilisés afin de faciliter le repérage temporel et spectral des objets qui seront convertis en annotations. Dans le cas de la musique électroacoustique, le sonagramme linéaire est très souvent employé. Donnant une bonne représentation de l'ensemble du spectre, il s'avère être particulièrement adapté ¹¹². Toutefois, le musicologue

111. COUPRIE, Pierre, TERUGGI, Daniel, « *Hétérozygote* et les *Presque rien* », in *Portrait polychrome Luc Ferrari*, Paris, INA-GRM, 2001, <http://www.inagrm.com/categories/luc-ferrari>

112. Nous ne traiterons ici que des aspects graphiques du sonagramme, les aspects analytiques seront présentés dans la partie 2.1.2.1 et les aspects de développement informatique dans la partie 2.2.3.5.

peut aussi utiliser d'autres types de tracés spectraux – logarithmique, par ondelettes, en superposition, différentiel – en fonction de son objectif analytique.

Dans les transcriptions, le sonagramme peut être dessiné en niveau de gris ou en pseudo-couleurs. L'usage des niveaux de gris facilite la perception visuelle des formes alors que la couleur renforce la perception fine des valeurs ¹¹³.

La représentation spectrale en niveaux de gris allant du noir pour les intensités les plus fortes au blanc pour les intensités nulles et l'arrière-plan est la plus utilisée, c'est généralement l'option proposée par défaut dans les différents logiciels. La répartition inverse des couleurs (sonagramme en blanc sur fond noir) est pourtant bien plus lisible, la perception visuelle des fréquences de faible intensité est bien meilleure. L'usage de cette coloration du sonagramme est donc préférable lors du processus d'analyse musicale.

Comme dans le domaine de la cartographie ou de l'imagerie médicale, la coloration du sonagramme en pseudo-couleurs permet de renforcer la perception visuelle des différents niveaux d'intensité. En s'appuyant sur la sensibilité de notre œil, la coloration qui suit une approximation du spectre lumineux (bleu-cyan-vert-jaune-orange-rouge) est la plus adaptée ¹¹⁴. Les logiciels utilisent une échelle de couleurs sur fond noir un peu différente pour la représentation spectrale généralement nommée arc-en-ciel (violet-mauve-bleu-vert-jaune-orange-rouge). Cette échelle de couleurs renforce la perception visuelle des niveaux d'intensité forts et amoindrit la perception des niveaux faibles en augmentant la différence entre les deux. Nous avons utilisé un mélange de ces colorations dans notre analyse de la première partie de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle ¹¹⁵ (1980) pour les différentes vues qui composent les représentations :

1. forme d'onde : mauve sur fond noir ;
2. sonagramme : arc-en-ciel ;
3. matrice de similarité ¹¹⁶ : arc-en-ciel avec renforcement des valeurs élevées ;
4. nuage de points : spectre lumineux.

En développant le logiciel EAnalysis, nous nous sommes rendu compte du fort potentiel de la coloration des représentations spectrales.

1.2.3.3 Le graphisme des annotations

Correspondances sémiotiques

Réaliser une transcription morphologique est souvent complexe. Le choix des graphismes ainsi que la correspondance entre les critères d'analyse et les propriétés graphiques concentrent à eux seuls de nombreux problèmes. Nous montrerons dans le chapitre suivant comment nous avons résolu une partie de ces problèmes en redéfinissant les flux de travaux de l'analyse musicale et en développant des outils de transcription adaptés à la musicologie.

113. WARE, Colin, *Information Visualization Perception for Design*, Oxford, Morgan Kaufmann, 2013, p. 128.

114. *Ibid.*, p. 96-97.

115. COUPRIE, Pierre, « Voyage dans "Grandeur nature", première partie de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle », in F. Bayle (éd.) *Son Vitesse-Lumière*, Paris, Delatour, en préparation.

116. Une matrice de similarité ne représente pas les valeurs mais leurs similarités, c'est-à-dire leur distance. Un *mapping* de couleurs est nécessaire afin de remplacer les valeurs numériques de distance par des variations de couleurs qui sont plus facilement interprétables.

1.2. De l'analyse musicale à la transcription morphologique

En 2004, nous avons présenté¹¹⁷ les caractéristiques graphiques d'une transcription morphologique. Elle se situe toujours le long d'un axe entre représentation iconique et représentation symbolique. Les termes « iconique » et « symbolique » sont ici pris dans le sens qu'ils ont acquis en sémiotique. À la suite de Charles S. Peirce¹¹⁸, une icône (l'annotation graphique) renvoie à un objet (l'unité sonore segmentée) par sa relation de ressemblance, et la relation entre un symbole (l'annotation graphique) et un objet (l'unité sonore segmentée) est fondée sur une convention sociale. Une représentation des vagues pour transcrire le son de la mer, ou ce qui ressemble à un son aquatique, telle que nous l'avons utilisée dans la représentation de *Sud* de Jean-Claude Risset¹¹⁹, obéit au concept d'icône. Greimas et Courtés proposent d'ouvrir le terme d'iconicité pour le définir « comme le résultat d'un ensemble de procédures mises en place pour produire l'effet de sens “réalité”¹²⁰ ». L'icône est alors une « illusion référentielle » et c'est ainsi que nous analysons, par exemple, ces annotations graphiques qui tirent leur forme de l'évolution de l'intensité des unités sonores qu'elles transcrivent. Cécile Régnault prend appui sur ces illusions référentielles pour décrire des correspondances sensorielles ou factuelles¹²¹ entre, par exemple, les qualités de granulosité des textures visuelles et sonores ou la longueur d'un graphique et la durée d'un son. À cet égard, les correspondances fondées sur des analogies gestuelles sont particulièrement efficaces dans une situation pédagogique ou pour la réalisation d'une représentation de la partie électronique d'une œuvre mixte destinée aux musiciens, car leur lecture ne nécessite qu'un apprentissage très réduit.

La représentation de *Don Quichotte Corporation* d'Alain Savouret est en grande partie symbolique. Une part des unités segmentées est figurée sous la forme de rectangles dont la couleur dénote les effets de transformation et de manipulation sonores. Les travaux réalisés par Thoresen pour élaborer un système de transcription graphique à partir de la typomorphologie schaefferienne¹²² relèvent de la représentation symbolique des unités segmentées. La même remarque peut être faite pour les symboles utilisés par Roy dans son système de transcription des fonctions musicales¹²³.

Toutefois, il n'existe que peu de transcriptions totalement iconiques ou symboliques, les analystes utilisent généralement un moyen terme et n'hésitent pas à se déplacer sur l'axe qui les relie en cours de transcription. La prédominance de l'iconicité permet de rendre les graphismes plus facilement compréhensibles en misant sur les analogies entre le visuel et le sonore. À l'opposé, le caractère symbolique offre un panel de possibilités de représentations plus important en permettant de superposer, dans la même forme graphique, différents types de paramètres sonores. Un apprentissage de la signification des symboles est alors souvent indispensable, mais l'analyste peut aussi prendre appui sur des conventions culturelles suffisamment simples pour être compréhensibles par tous, comme la hauteur des sons et la position verticale des graphiques ou la richesse spectrale et l'épaisseur du trait. Le choix des graphismes sera donc dépendant de l'objectif de la transcription et du public visé. Lors de la réali-

117. COUPRIE, Pierre, « Graphical Representation: An Analytical and Publication Tool for Electroacoustic Music », *Organised Sound*, vol. 9, n° 1, 2004, p. 109-113.

118. PEIRCE, Charles S., *Écrits sur le signe*, Paris, Seuil, 1978, p. 140-141.

119. COUPRIE, Pierre, « Donner un élan pour l'écoute de l'œuvre. Introduction à la représentation de *Sud* de Jean-Claude Risset », in *Portrait polychrome Jean-Claude Risset*, Paris, INA-GRM, 2001, p. 79-82.

120. GREIMAS, Algirdas Julien, COURTÉS, Joseph, *Sémiotique. Dictionnaire raisonné de la théorie du langage*, Paris, Hachette, 1993, p. 178.

121. RÉGNAULT, Cécile, « Correspondances entre graphisme et son : les représentations visuelles de “l'objet sonore” », in S. Dallet, A. Veitl (éd.) *Du sonore au musical. Cinquante années de recherches concrètes (1948-1998)*, Paris, L'Harmattan, 2001, p. 326-332.

122. THORESEN, « Spectromorphological Analysis of Sound Objects: An Adaptation of Pierre Schaeffer's Typomorphology », *op. cit.*

123. ROY, *op. cit.*, p. 342.

sation des transcriptions pour le cédérom *La musique électroacoustique*¹²⁴, nous avons opté pour des graphiques à dominante iconique ou une symbolisation simple afin de permettre leur utilisation dans un contexte pédagogique tout en évitant l'écueil de la redondance.

Les liens entre le sonore et le visuel dans les transcriptions

Prenant appui sur les travaux de Bertin, Cécile Régnault nous offre un tableau des correspondances¹²⁵ entre les variables visuelles des annotations et les critères de l'objet sonore schaefferien. Ce tableau liste un ensemble d'usages simples qui vont se répandre dans les transcriptions au début des années 2000. L'avènement de l'informatique multimédia et du réseau internet pour tous va permettre diverses publications de transcriptions, par exemple celles des *Portraits polychromes* du GRM. Nous avons plusieurs fois expérimenté ces différentes correspondances dans nos représentations, le tableau de la figure 1.2 les présente en regard de nos transcriptions¹²⁶.

Propriétés graphiques	Propriétés sonores ou musicales	Transcriptions
Forme	Causalité	« Ondes croisées » (Parmegiani) <i>Sud</i> (Risset) <i>Hétérozygote</i> (Ferrari)
	Allure	<i>Trois rêves d'oiseau</i> (Bayle)
	Fond-figure	<i>Presque rien</i> (Ferrari)
	Typologie	<i>Pré-texte</i> (Fénelon) <i>Emak Bakia</i> (les Phonogénistes)
Epaisseur	Intensité	<i>Stilleben</i> (Saariaho) <i>Presque rien</i> (Ferrari)
	Largeur spectrale	« Géologie sonore » (Parmegiani) <i>Spirale</i> (Henry)
Position verticale	Hauteur réelle ou approximative	<i>Trois rêves d'oiseau</i> (Bayle) <i>Vox vocis, f</i> (Malec)
	Panoramique	« Dulcinée » (Savouret) <i>Hétérozygote</i> (Ferrari)
	Structure spectrale	<i>M.É.</i> (Leroux)
	Structure formelle (diagramme)	<i>La fleur future</i> (Bayle)
Couleur	Typologie	<i>Trois rêves d'oiseau</i> (Bayle) <i>Stilleben</i> (Saariaho) « Ondes croisées » (Parmegiani)
	Effets	« Dulcinée » (Savouret)
	Plans sonores (réverbération)	« Géologie sonore » (Parmegiani)
Texture	Granulosité	<i>Bohor</i> (Xenakis) « Géologie sonore » (Parmegiani)
Animation	Mouvements d'espace	<i>Jukurrpa</i> (Couprie)

FIGURE 1.2 – Les relations entre le sonore et le visuel utilisées dans nos transcriptions.

124. (Collectif), *La musique électroacoustique*, Paris, Hyptique/INA-GRM, 2000, cédérom.

125. RÉGNAULT, *op. cit.*, p. 312.

126. La liste complète de nos transcriptions se trouve en fin du mémoire, dans l'annexe A.

1.2. De l'analyse musicale à la transcription morphologique

La majeure partie de ces correspondances obéit à des transferts sensoriels ou des habitudes culturelles liées à la notation musicale : par exemple, l'utilisation de la position et de l'épaisseur verticale pour transcrire la hauteur ou l'occupation spectrale. Toutefois, nous avons aussi mené des expériences à la limite de l'art graphique afin d'évaluer le moment où la forme et le fond changent de rôle. Habituellement, le fond est utilisé comme espace de représentation, il représente le temps et l'espace des fréquences, les formes dessinées sur ce fond se détachent et figurent des unités segmentées lors de l'analyse. Les représentations que nous avons réalisées sur *Hétérozygote* et la série des *Presques rien* de Luc Ferrari tendent à atténuer la séparation entre la forme et le fond. Ce dernier devient partie intégrante des formes ou propose une navigation temporelle non linéaire et les formes ne se détachent plus sur le fond. La représentation, habituellement réalisée sur au moins deux plans, se résume à un seul plan. Ces transcriptions ont aussi été l'occasion d'une expérimentation sur les éléments minimaux que doit inclure une représentation. La musique de Luc Ferrari, fondée sur l'anecdotique et les paysages sonores minimalistes, se prête particulièrement bien à cette expérience. Les trois transcriptions réalisées sur *Presque rien n° 1*, *le lever du jour au bord de la mer* ne contiennent qu'une ou deux formes graphiques dont la morphologie correspond à l'amplitude sonore du premier plan. Le fond, décomposé en plusieurs parties, figure les sons de l'arrière-plan. Afin de simplifier la lecture, la ligne temporelle est représentée par l'axe horizontal. Dans le troisième extrait, le fond et les formes tendent à se confondre, il est difficile de dire s'il y a une, deux, trois ou quatre formes sur le fond. Cet aplatissement graphique amène à supprimer l'espace sonore capté et créé par le compositeur pour se concentrer sur la forme globale et donner une vision immédiate et synoptique de l'ensemble.

Transcriptions synoptiques

De *Presque rien n° 1*, *le lever du jour au bord de la mer* à « Ondes croisées », la transcription synoptique, c'est-à-dire la visualisation globale d'une représentation, a été la première étape d'une utilisation plus large de la transcription. Avant de présenter cette pratique dans le chapitre suivant, il convient d'analyser le rôle de la transcription synoptique au sein d'un groupe de plusieurs transcriptions.

Lors de la réalisation de l'analyse d'« Ondes croisées » de Bernard Parmegiani pour le cédérom *La musique électroacoustique*, notre transcription a été publiée sous deux formes : la transcription paginée et la transcription synoptique élargie. Ces deux versions de la même transcription ont été mises l'une sous l'autre et complétées par une transcription synoptique¹²⁷ réalisée par Daniel Teruggi. Notre représentation tendait à être exhaustive quant aux objets sonores segmentés, ce qui la rendait particulièrement intéressante en vision détaillée. Sa visualisation complète lui a permis de gagner un nouveau statut que nous n'avions pas anticipé lors de sa réalisation, la représentation d'une forme musicale basée sur le fondu enchaîné. Cette courte pièce est construite autour de deux types de matériaux : les sons tenus (scintillement du début et bruit blanc) et les sons brefs organisés en texture complexe (mélange de pizzicati de contrebasse, d'élastique, de goutte d'eau et de zarb). Le scintillement du début s'avère être la fin de la partie précédente (« Matières induites ») et n'a pas réellement de rôle dans la construction de la forme d'« Ondes croisées ». Elle repose donc sur l'apparition progressive du bruit blanc (réalisé à partir d'un enregistrement de feu) à partir de 0'25 qui atténue de plus en plus la texture complexe des sons brefs. Il en résulte un fondu enchaîné qui dure environ 1'30. Nous avons décidé de représenter le bruit blanc par un large triangle jaune comme un soufflet dans lequel se dissolvait progressivement l'ensemble des autres sons. Cette transcription, présentée d'une manière synoptique,

127. TERUGGI, Daniel, « Vision synoptique », in *La musique électroacoustique*, Paris, INA-GRM/Hyptique, 2000, cédérom.

ne gardait que cet effet de fondu enchaîné graphique révélant son équivalent musical. De notre point de vue, cette forme est un des gestes les plus marquants de *De Natura Sonorum*. Le son de bruit blanc est donc à l'origine de la forme musicale de cette pièce, il a pourtant été considéré comme peu important par les auteurs de *L'envers d'une œuvre* au point de le considérer comme une régression¹²⁸ par rapport aux parties précédentes. Dans cet ouvrage, le compositeur insiste afin de montrer qu'elle résulte d'une « envie » mais aussi et surtout d'une volonté de cohérence formelle.

La transcription synoptique est idéale pour rendre compte des processus formels. Dans notre analyse de *La fleur future* de François Bayle¹²⁹, nous avons réalisé des transcriptions formelles sous la forme de diagrammes linéaires et de diagrammes formels. Ils permettent de visualiser l'évolution des typologies de timbres et d'enveloppes mais aussi de comprendre le rôle des silences dans cette courte pièce.

Dans les transcriptions réalisées sur les extraits de pièces de Ferrari, la transcription globale apparaît comme la photographie d'un paysage sonore. Elle met en évidence la construction de la forme par les sons eux-mêmes. En effet, une des caractéristiques analytiques les plus marquantes des œuvres anecdotiques du compositeur se situe dans leur propre construction. La forme ne résulte pas des relations structurelles des sons entre eux, structures qui elles-mêmes entretiennent des relations formelles, mais plutôt de l'agencement des sons eux-mêmes. Ainsi, la forme d'*Hétérozygote* ne résulte pas de la relation entre les différents sons du paysage sonore (les bruits de la nature, les bêlements de moutons, les appels du berger, etc.) mais de la configuration de l'ensemble des sons. La forme n'est pas réductible en niveaux hiérarchiques ou en structures plus petites, elle est donnée telle quelle par le paysage sonore composé dans son entier. Cette vision gestaltiste de la forme nous a semblé particulièrement adaptée aux œuvres de Ferrari, nous avons donc réalisé des transcriptions synoptiques dans lesquelles le paysage sonore se déploie. Même si l'axe horizontal représente toujours le temps, la transcription, comme une photographie, peut faire l'objet de parcours visuels différents, la forme globale restant toujours présente.

1.3 Constats théoriques : les limites de la transcription morphologique

1.3.1 Un corpus limité

Depuis leurs origines au milieu du siècle dernier, les différents genres, tendances, expérimentations de la musique électroacoustique ont été liés aux technologies de l'enregistrement, de la synthèse ou de la transformation du son, analogiques puis numériques. Mais les artistes ont aussi exploité ces technologies en dépassant les usages pour lesquels elles avaient été conçues. Le détournement est un acte créatif qui révèle le niveau d'ouverture¹³⁰ d'une technologie. Une technologie autonome, fermée, ne peut être utilisée dans une œuvre d'art qu'à travers un acte politique. À l'opposé, une technologie ouverte, organisée par l'homme, contient un potentiel créatif très important. Ce sont ces cernières qui ont permis l'apparition, puis l'évolution de la musique électroacoustique. Du détournement du pick-up à l'utilisation volontaire de l'instabilité de certaines machines, les compositeurs se sont approprié des appareils créés pour la radio ou pour produire des sons standardisés en les détournant de

128. MION, NATTIEZ, THOMAS, *op. cit.*, p. 118.

129. COUPRIE, Pierre, « Quelques pistes pour analyser la structure de *La fleur future* de François Bayle », in M. Erbe, C. von Blumröder (éd.) *Die Klangwelt des François Bayle*, Vienne, Verlag Der Apfel, 2012, p. 205-209.

130. SIMONDON, Gilbert, *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, 2/2012, p. 12.

1.3. Constats théoriques : les limites de la transcription morphologique

leurs usages premiers. L'évolution technique a engendré une conquête progressive des sons inouïs, explorant des variations spectrales complexes ou des durées excédant les limites de la perception. Le corpus est devenu de plus en plus résistant à l'analyse musicale. Notre analyse comparée des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle met en évidence cette évolution progressive du sonore vers des objets que Schaeffer, faute de mieux, a nommés excentriques. Ces objets, peu aptes au musical au moment de l'écriture du *TOM*, sont devenus la norme dès les années 1970 grâce aux synthétiseurs analogiques puis aux technologies numériques. Un nouveau champ d'expérimentation s'est alors ouvert aux compositeurs. Ce champ a aussi été l'occasion pour les compositeurs-chercheurs de repenser la théorie musicale en proposant des outils différents de ceux élaborés par Schaeffer. La causalité, le contexte, l'évolution temporelle, l'espace, la signification musicale ou la narrativité ont permis d'intégrer de nouveaux objets sonores difficilement analysables car possédant des bordures temporelles et spectrales floues, évoluant de manière complexe et continue ou se cachant au sein de textures qui les englobent. La segmentation qui semblait avoir été circonscrite a alors été remise en cause en devenant un objectif de recherche souvent laissé en friche ou volontairement éludé.

Le corpus actuel de la musique électroacoustique résiste fortement à l'analyse morphologique héritière des travaux de Schaeffer. L'œuvre électroacoustique ne se réduit plus seulement à un enregistrement audio, résultat d'un travail d'écriture en studio. Depuis la seconde moitié des années 1960, les expérimentations sur l'interactivité se sont développées et l'usage d'interfaces de jeu en temps réel s'est généralisé. En France, à la fin des années 1990, un mouvement très important de création électroacoustique en direct s'est développé. Les compositeurs sont alors devenus leurs propres musiciens et ont utilisé des techniques d'écriture issues de la musique instrumentale et de l'improvisation. Mais la place de l'interactivité ne se réduit pas à la création en direct, elle irrigue aussi les méthodes d'écriture du studio. Les logiciels ont acquis des interfaces dans lesquelles le jeu interactif a progressivement trouvé sa place¹³¹. Le développement de nouveaux logiciels, de nouvelles interfaces de contrôle ainsi que la montée en puissance des machines permettant désormais de manipuler des objets multimédia complexes avec une qualité toujours plus importante semblent être à l'origine de ce mouvement. La multiplicité des pratiques musicales a gagné le répertoire électroacoustique au point qu'une ontologie de l'œuvre soit difficile à circonscrire. Le corpus pouvant faire l'objet d'une simple transcription morphologique est désormais très réduit. Le matériau ne se laisse plus aussi facilement réduire en objets bien délimités, en fonctions musicales claires, en conduites d'écoute bien différenciées. Le musicologue se trouve confronté à un matériau complexe présent sur plusieurs supports et nécessitant des approches analytiques multiples et complémentaires. L'« inanalysable¹³² » dont parle Mâche en exergue reflète bien les problèmes que rencontre le musicologue en étudiant la création électroacoustique actuelle.

1.3.2 Les méthodes d'analyse et les flux de travaux

Il se pose alors un problème de méthode à deux niveaux. Les méthodes d'analyse habituellement utilisées et héritières de la tradition structuraliste ne suffisent plus à faire avancer la recherche afin de découvrir de nouveaux champs analytiques ou d'analyser une grande partie de la création actuelle. Il nous semble donc nécessaire de repartir sur de nouvelles bases plus complètes et liant les techniques d'analyse issues de l'acoustique musicale, les méthodes d'analyse et les techniques de représentation. Le développement de cette idée sera l'objet du deuxième chapitre. Complémentaire aux méthodes

131. Par exemple, les plugins GRM Tools possèdent une interface permettant de modifier le matériau en utilisant les gestes provenant d'une pratique instrumentale ou de l'improvisation.

132. MÂCHE, *op. cit.*, p. 94.

d'analyse, le second problème est né de l'absence de réflexion sur les flux de travaux en analyse musicale. La manipulation de sources différentes sur des supports différents créées pendant le processus de composition, voire au moment même de la performance, ajoute un niveau de complexité technologique à l'analyse musicale. Or, comme nous l'avons déjà évoqué, penser les méthodes d'analyse musicale sans penser les technologies numériques ne nous semble pas être une voie d'avenir pour l'analyse de la musique électroacoustique. La notion de flux de travaux, employée couramment dans les métiers de l'informatique, est pratiquement absente de la réflexion des musicologues. Face à la complexité des sources et des supports auxquels ils sont confrontés, les chercheurs doivent faire preuve d'imagination afin de pallier les limites computationnelles auxquelles ils sont confrontés.

Le développement de nouveaux outils d'aide à l'analyse musicale, et plus spécifiquement à la transcription, nécessite d'analyser les flux de travaux mis en œuvre. Les logiciels existants actuellement ont été développés sans une réelle réflexion musicologique ou ont été adaptés à partir de logiciels existant dans le domaine de la création musicale. Penser les flux de travaux d'analyse musicale signifie :

1. étudier précisément les besoins technologiques nécessaires pour la réalisation des différentes étapes de l'analyse musicale. Il convient donc d'évaluer, pour chaque méthode employée en analyse musicale, le rôle de la partie technologique à développer. L'adaptation de technologies existantes ne peut être une solution pérenne qui permettrait d'enrichir la recherche musicologique numérique ;
2. penser le lien entre la technologie en développement, celles qui existent déjà et celles qui seront développées dans le futur. Il existe une réelle dichotomie entre la recherche musicologique, ancrée dans le passé et le présent, et la recherche informatique, guidée par des enjeux futurs. La recherche en électroacoustique se concentre sur l'adaptation de méthodes d'analyse employées dans des domaines connexes ou développées pour des corpus plus anciens. Le développement informatique nécessite de penser avec quelques années d'avance les phases de développement demandant un temps assez long (deux à trois ans). Cette dichotomie impose de penser le développement de nouveaux outils sous une forme ouverte afin de permettre l'intégration de nouvelles méthodes et pérenniser les logiciels ;
3. étudier le transfert d'informations entre les différents supports et documents qui constituent les sources de l'analyse musicale. L'acousmographie (ou acousmogramme) a été pensée pour l'analyse des œuvres fixées sur support pouvant être regroupées sous l'appellation d'œuvres acousmatiques. Le musicologue est désormais en présence d'œuvres pouvant être interactives, dont la performance est une part importante (même dans le cas d'œuvres fixées) et qui peuvent aussi intégrer d'autres pratiques artistiques. Les compositeurs et musiciens d'œuvres actuelles génèrent des sources de formats très divers que les logiciels de transcription actuels ne sont pas en mesure de gérer ;
4. lier les différents types de représentations (acoustiques, mathématiques, musicales) afin de créer des représentations plus riches en informations analytiques. Les logiciels actuels se limitent à juxtaposer ou superposer certaines de ces représentations sans permettre une interaction entre elles.

Penser les flux de travaux en analyse musicale est donc indispensable pour l'évolution du modèle de la transcription et pour le développement d'outils informatiques réellement adaptés à la recherche musicologique.

1.3.3 La transcription morphologique

Chez Delalande, la transcription apparaît comme le résultat d'une écoute instrumentée¹³³, c'est-à-dire d'une écoute réalisée à l'aide d'un magnétophone permettant la lecture non linéaire du document sonore. Mais, cette transcription n'est qu'une première étape analytique dans laquelle le musicien relève les pertinences à partir desquelles découlera son analyse. Le rôle de la transcription est donc au mieux celui d'une étape préanalytique, nous verrons dans la deuxième partie comment faire évoluer la transcription afin d'en faire un véritable outil d'analyse.

Si la transcription est le résultat d'une écoute non linéaire, elle se présente généralement comme un visuel linéaire. Les annotations représentant les pertinences sont assemblées sur une ligne temporelle figurant l'intégralité du document sonore. Dans le meilleur des cas, la transcription est le résultat de plusieurs conduites d'analyses et est réalisée sur un système de calques indépendants ou sur des plans graphiques juxtaposés. Ainsi, la transcription de « L'oiseau moqueur », extrait des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle, réalisée par Noémie Sprenger-Ohana¹³⁴ systématise cette pratique en proposant sept niveaux de représentations : abstraite, amplitude, taille spectrale, profil des hauteurs, notation musicale instrumentale, figurative, causale. Chaque transcription est le résultat d'une écoute spécifique et les sept transcriptions sont une véritable analyse visuelle. Malheureusement, la publication de ces transcriptions les a dispersées sur quatre pages, rendant difficile leur mise en relation. Toutefois, elles constituent un véritable protocole analytique¹³⁵ allant d'un niveau abstrait à un niveau symbolique. Les expérimentations menées par Sprenger-Ohana et Geslin auraient pu être une première étape permettant de faire évoluer ce modèle de transcription en proposant un Acousmographe plus adapté à la pratique analytique.

Le modèle de la transcription a aussi un fondement technologique. Le bathygraphe¹³⁶ fut l'un des premiers outils utilisés par Schaeffer afin d'étudier l'intensité des fréquences. La bande de papier résultante était assez proche de la bande magnétique, les deux contenant une trace temporelle du son. Comme de nombreuses stations audionumériques, l'Acousmographe a été conçu sur le modèle du magnétophone : le temps se déroule de gauche à droite et les différentes transcriptions juxtaposées sont synchronisées sur le plan de la lecture et de l'affichage. Si ce modèle acousmographique semble être le plus adapté à la transcription morphologique, il présente aussi plusieurs limites :

1. les objets graphiques doivent être définis dans l'espace du plan et, au minimum, dans leur dimension temporelle. Le positionnement d'indications ou d'annotations graphiques permettant de relier plusieurs zones temporelles ou résultant d'une analyse diachronique devient difficile, voire impossible. La transcription morphologique sur le modèle acousmographique est essentiellement synchronique ;
2. l'échelle temporelle est généralement uniforme, il n'y a que très peu d'usage de représentations synoptiques dont nous avons pourtant montré l'intérêt. La juxtaposition d'échelles temporelles différentes complexifie la lecture de telles transcriptions. De plus, le cadre souvent fermé des logiciels permettant ces transcriptions n'offre aucune alternative satisfaisante ;

133. DELALANDE, *Analyser la musique, pourquoi, comment ?*, op. cit., p. 130.

134. SPRENGER-OHANA, Noémie, « *Trois rêves d'oiseau*, moqueur », in F. Bayle (éd.) *L'Expérience acoustique*, Paris, Magison, 2013, cédérom.

135. GESLIN, Yann, SPRENGER-OHANA, Noémie, « Abstraction et symbolisation dans la représentation des musiques électroacoustiques : un exemple de transcription à niveaux multiples de « L'oiseau moqueur » réalisé à l'aide de l'Acousmographe », in *Electroacoustic Music Studies Network*, Paris, Université Paris-Sorbonne/INA-GRM, 2008, <http://www.ems-network.org/ems08/papers/geslin-sprenger-ohana.pdf>.

136. COUPRIE, Pierre, « Des outils pour l'analyse de la musique électroacoustique », in M. Battier, D. Pistone (éd.) *Analyse et contextualisation*, Paris, OMF, 2004, p. 63-73.

3. le déroulement temporel est toujours fondé sur celui de la bande magnétique. Même s'il présente de nombreux avantages, dont celui de la facilité de lecture, ce déroulement limite les possibilités de représentation en rendant impossibles les tableaux et cartes couramment utilisés en analyse musicale¹³⁷. Nous avons commencé à travailler dès 2005 sur des méthodes de transcriptions dans lesquelles la dimension temporelle est modifiée afin de faciliter la visualisation de certains paramètres sonores¹³⁸ ;
4. le format de la transcription est souvent défini par le rectangle du plan graphique. L'analyste doit concentrer sa transcription dans un seul espace et ainsi regrouper ses catégories de graphiques par lignes horizontales ou par caractéristiques graphiques. Le résultat de cette méthode provoque une uniformisation des transcriptions et limite les expérimentations dans des directions différentes.

Comme nous le voyons, ces limites sont inhérentes à la méthode de transcription et à la technologie employée. Nous avons eu l'occasion de présenter ces limites dans plusieurs de nos publications. Les représentations que nous avons réalisées récemment¹³⁹ nous ont permis de les dépasser en développant notre propre outil informatique.

1.3.4 Ambivalence, approximation et difficultés de transcription

De ces limites globales découlent les limites mêmes de la transcription, celles qui correspondent au transfert entre les propriétés sonores des objets, fonctions ou sèmes étudiés et les propriétés graphiques des formes visuelles correspondantes. Selon René Thom, cette approche qui consiste à réduire les qualités sonores et musicales de l'objet afin d'en faire un objet d'analyse révèle un défaut : « elle détruit la forme¹⁴⁰ ». La transcription morphologique manque finalement son objectif : réduire les caractéristiques de l'objet sans en perdre l'essence afin d'en permettre une analyse. Or la transcription ne peut seulement être une première étape de l'analyse, elle est aussi son aboutissement, elle est le résultat d'une segmentation, d'une description et d'un choix graphique qui mettent en évidence une analyse musicale. Ainsi présentée, la transcription morphologique telle que nous l'avons pratiquée ne peut finalement pas être comparée à la transcription telle qu'elle est présentée par Delalande.

Les caractéristiques des formes graphiques permettent de transmettre de nombreuses informations. Les liens possibles entre les formes sonores et visuelles présentées dans le tableau 1.2 page 29 peuvent être complétés par les structures résultant de l'agencement des objets graphiques. Si le choix des couleurs, de la taille des formes ou de leur position correspond à des propriétés graphiques, les structures visuelles qu'elles engendrent ne sont pas négligeables. Ces structures sont souvent immédiatement perceptibles et c'est la raison pour laquelle la pédagogie s'en est emparée : l'outil de représentation devient un outil de présentation¹⁴¹. De nombreux utilisateurs d'iAnalyse et de EAnalysis profitent de cette propriété de la transcription pour réaliser des relevés d'œuvres lisibles par les non-musiciens. Ces relevés fonctionnent à la manière des musicographies de la pédagogie Orff afin de mettre en évidence différents niveaux de structures à l'aide des caractéristiques graphiques des

137. COUPRIE, Pierre, « Cartes et tableaux interactifs : nouveaux enjeux pour l'analyse des musiques électroacoustiques », *op. cit.*

138. COUPRIE, « Analyse de *Jukurrpa - Quatre rêves* », *op. cit.*

139. COUPRIE, « Voyage dans "Grandeur nature", première partie de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle », *op. cit.* ; COUPRIE, « Prolégomènes à la représentation analytique des musiques électroacoustiques », *op. cit.*

140. THOM, René, « Pour une théorie de la morphogenèse », in E. Noël (éd.) *Les sciences de la forme aujourd'hui*, Paris, Seuil, 1994, p. 181.

141. COUPRIE, Pierre, « (Re)Presenting Electroacoustic Music », *Organised Sound*, vol. 11, n° 2, 2006, p. 119-124.

1.3. Constats théoriques : les limites de la transcription morphologique

formes dessinées. Or cette ambivalence de signification entre les propriétés graphiques et les critères sonores est une limite très importante en musicologie. Ce qui fonctionne parfaitement bien dans un domaine pédagogique devient difficilement acceptable dans la recherche scientifique. De plus, cette ambivalence est doublée d'une approximation et d'une impossibilité de représenter certains critères.

Dans notre représentation de *Don Quichotte Corporation* d'Alain Savouret, nous avons représenté la causalité réelle ou imaginaire de chaque son par la couleur. Au fur et à mesure de l'avancée des variations, le compositeur modifie progressivement les sons au point de rendre leur origine méconnaissable, ces sons deviennent alors violets dans notre transcription. Si chaque son est clairement positionné sur le plan vertical, représentant ici la position dans le panoramique, certains objets graphiques violets acquièrent aussi des bordures oscillantes en arrondi, les rendant indéfinissables. Dans cette transcription, l'occupation verticale et la couleur révèlent leur ambivalence, la transcription bascule alors dans le domaine ludique et dans l'imaginaire correspondant parfaitement au public ciblé par le cédérom.

L'approximation des hauteurs est souvent une constante dans les transcriptions morphologiques. Ainsi, nos transcriptions des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle, de *Vox vocis, f* d'Ivo Malec ou d'« Ondes croisées » de Bernard Parmegiani profitent de la présence de sons harmoniques pour associer l'axe vertical à une échelle logarithmique des fréquences. Toutefois, le positionnement vertical des graphiques reste approximatif, certains sons étant parfaitement harmoniques, d'autres inharmoniques, mais occupant une zone réduite de fréquences ou d'autres occupant une large bande de fréquences voire la quasi-intégralité du spectre. La transcription résultante ne peut respecter l'ensemble de ces caractéristiques sous peine de devenir illisible et de manquer un de ses objectifs principaux, à savoir la transmission relativement intuitive d'une analyse musicale.

Enfin, certaines structures sonores ou musicales résistent à la transcription. Ce phénomène peut être dû à un problème de segmentation temporelle ou spectrale. La perception ou l'observation du spectre est insuffisante pour identifier précisément les propriétés spectromorphologiques de ces structures complexes. La difficulté de transcription peut aussi être due à la complexité interne de la structure. Certaines textures sonores évoluent progressivement d'un état à un autre d'une manière presque linéaire ou, au contraire, avec beaucoup d'irrégularités, ce qui les rend difficiles à caractériser. L'analyste se contente généralement de les transcrire par des formes simples sans noter précisément les paramètres musicaux qui sont pourtant essentiels à la compréhension du contexte musical. La caractérisation de Schaeffer s'avère finalement trop imprécise pour décrire de telles textures. L'idée de flux¹⁴² de Tristan Murail ou de transformation¹⁴³ d'Hugues Dufourt permet d'entrevoir les nouvelles formes de représentations.

1.3.5 Un cas particulier : la transcription de l'espace

L'espace est souvent un élément absent des transcriptions. François Bayle souligne la difficulté qu'il y a à définir l'espace¹⁴⁴. Pour le compositeur, l'espace est un concept ambigu « intermédiaire entre plusieurs sens ». Pourtant les musicologues l'intègrent souvent dans leurs analyses ou leurs représentations. Nous avons étudié de nombreuses transcriptions et présenté une typologie des représentations de l'espace en quatre catégories¹⁴⁵ :

142. MURAIL, *op. cit.*, p. 14.

143. DUFOURT, Hugues, *Musique, pouvoir, écriture*, Paris, Christian Bourgois, 1991, p. 286.

144. BAYLE, François, « Où (en) sommes-nous ? », *Lien, L'espace du son III*, 2011, p. 134.

145. COUPRIE, Pierre, « Représenter l'espace ? », *L'espace du son*, n° 3, 2010, p. 21-28.

1. nous avons précédemment présenté la transcription du **panoramique** sur l'extrait de *Don Quichotte Corporation* d'Alain Savouret. Nous l'avons aussi utilisé pour la transcription d'un des sons d'*Hétérozygote* de Luc Ferrari : l'enregistrement du berger et de ses moutons. Notons toutefois que l'usage de l'axe vertical est très rare, les musicologues utilisent généralement un code couleur permettant de situer les sons représentés comme dans la transcription de « Rosace 5 », extrait de *Vibrations composées* de François Bayle, par Dominique Besson¹⁴⁶. Denis Dufour a transcrit les deux canaux de l'*Étude aux objets* de Pierre Schaeffer¹⁴⁷ à l'aide de deux transcriptions¹⁴⁸ ;
2. la transcription des **plans sonores** est bien plus courante. En effet, les analystes utilisent très souvent un code graphique pour indiquer les sons en arrière-plan, que ce soit par une différence de dynamique, des effets de filtrage, de masquage ou de réverbération. Dans notre transcription d'« Ondes croisées » de Bernard Parmegiani, nous avons utilisé un code couleur pour représenter les sons de goutte d'eau réverbérés. Dans la transcription¹⁴⁹ de *Point-virgule* de Jean-François Denis, Fischman utilise les mots *foreground* et *background* pour indiquer les plans sonores. Dans notre transcription¹⁵⁰ de *Stilleben* de Kaija Saariaho, nous avons regroupé les sons verticalement par plans sonores ;
3. la transcription des **mouvements** est assez rare, car elle nécessite de réaliser des transcriptions animées ou de figurer le mouvement des sons par un code graphique. Le compositeur Stephan Dunkelman propose des exemples¹⁵¹ de transcription animée d'extraits de son œuvre *Rituellipses* : une forme graphique se déplace le long d'un trajet spatial intégralement dessiné. Wishart propose même une typologie très détaillée du déplacement des spectromorphologies dans l'espace interne de l'œuvre¹⁵² ;
4. la représentation de l'**espace de diffusion** est couramment utilisée par les interprètes de musiques de support lors de l'interprétation spatialisée. Elle peut consister en une liste textuelle de positions, une représentation simplifiée indiquant quelques points de repère ou des graphiques représentant des processus spécifiques¹⁵³. Annette Vande Gorne théorise l'interprétation d'œuvres acousmatiques autour de quatre types d'espaces : « [...] l'espace ambiophonique plonge l'auditeur dans un "bain" sonore ; l'espace source, au contraire, localise les sons ; l'espace géométrie structure une œuvre en plans et volumes. Ces trois catégories concernent le plus souvent des pièces multiphoniques. La quatrième, l'espace illusion, fait consciemment ou non l'objet des œuvres en format stéréophonique, qui crée l'illusion de la profondeur de champ sur l'écran de deux haut-parleurs¹⁵⁴ ». Les figures d'espace ont pour rôle d'amplifier l'espace interne de l'œuvre ou de mettre en évidence la construction spectrale en créant des plans sonores spatialisés. Nous avons très souvent utilisé des transcriptions lors d'interprétation d'œuvre de

146. BESSON, Dominique, *Les musicographies*, Paris, INA-GRM/38^{es} Rugissants/Mois du graphisme d'Échirolles, 1995, cédérom.

147. Denis Dufour a utilisé la version revue de 1971 et publiée en vinyle par Philips dans la collection *Prospective du 21^e siècle* et non celle de 1959, sur un seul canal, comme indiqué dans le *Portrait polychrome*.

148. DUFOUR, Denis, « Analyse et transcription de l'*Étude aux objets* », in *Portrait polychrome Pierre Schaeffer*, Paris, INA-GRM, 2008, <http://www.inagrm.com/categories/pierre-schaeffer>

149. FISCHMAN, Rajmil, *Score of Point-virgule*, Montréal, 1999, <http://cec.sonus.ca/econtact/SAN/Fischman.htm>

150. COUPRIE, Pierre, *La musique électroacoustique : analyse morphologique et représentation analytique*, op. cit.

151. BESSON, *ibid.*

152. WISHART, op. cit., p. 191-235.

153. VANDE GORNE, Annette, « L'interprétation spatiale. Essai de formalisation méthodologique », *Demeter*, 2002, <http://demeter.revue.univ-lille3.fr/interpretation/vandegorne.pdf>.

154. *Ibid.*, p. 1.

1.3. Constats théoriques : les limites de la transcription morphologique

support. Dans le domaine analytique, la transcription de l'espace de diffusion nous a aidé dans l'analyse de deux œuvres : *Bohor* de Iannis Xenakis et notre pièce *Jukurrpa - Quatre rêves*. L'analyse de l'œuvre de Xenakis a fait l'objet d'une transcription simple¹⁵⁵ présentant la répartition des textures sonores sur les huit pistes du support. La transcription de cette mise en espace conçue par le compositeur pour être diffusée autour du public permet de prendre conscience de la complexité des mélanges sonores obtenus par le compositeur et malheureusement supprimés dans la version publiée en stéréophonie. La transcription d'un extrait de *Jukurrpa - Quatre rêves* nous a permis d'expérimenter une représentation animée des unités sonores réalisée à partir du fichier de la station d'informatique musicale. Cette transcription nous a particulièrement inspiré dans le développement d'EAnalysis et dans la définition de notre projet de recherche.

En commençant ce travail de transcription de l'espace, nous espérons proposer dans les années qui viennent un véritable outil d'aide à l'analyse des espaces internes et externes¹⁵⁶ à l'œuvre. Les exemples que nous avons réalisés et les compléments apportés par différents chercheurs permettent d'anticiper les nombreuses utilisations d'un système de transcription des espaces pour l'analyse musicale, mais aussi pour l'aide à l'interprétation et à la création.

1.3.6 La linéarité du temps

La transcription morphologique se présente sous la forme d'un visuel linéaire dans lequel le temps se déroule sur l'axe horizontal. Les transcriptions qui contiennent une analyse des structures ou de la forme globale sont généralement construites sur le modèle de la segmentation linéaire à plusieurs niveaux utilisée dans l'analyse des musiques modales et tonales. Même si la forme de certaines œuvres de support que nous avons analysée¹⁵⁷ peut être étudiée sur le modèle classique, Jean-Marc Chouvel a montré comment cette manière de penser la perception de la forme était peu adaptée à la création contemporaine¹⁵⁸. L'analyse des œuvres actuelles révèle généralement l'utilisation de structures polyphoniques asynchrones.

La linéarité du temps de la transcription morphologique crée un certain nombre de limites dans l'usage de la représentation :

1. limite dans la navigation diachronique de l'œuvre : la récurrence des événements sonores est difficilement analysable dans une transcription qui reproduit la temporalité de l'œuvre. L'analyste a besoin de relier des moments différents à l'aide d'écoutes comparatives. La transcription morphologique et les outils informatiques de transcription dont nous discuterons dans la partie suivante sont peu adaptés à la pratique du comparatisme en analyse musicale ;
2. l'étude de la similarité d'événements, de paramètres sonores ou de données obtenues par l'extraction de descripteurs audio ne peut se faire uniquement dans des graphiques linéaires. Ce type d'étude nécessite une représentation de l'ensemble ou d'une partie des éléments de l'œuvre afin de visualiser des similarités par proximité des valeurs ;
3. la mise en évidence des structures polysémiques et des ruptures dans la conception de la forme musicale est très limitée. Les outils utilisés par les compositeurs favorisent un enchevêtrement

155. COUPRIE, Pierre, « Une analyse détaillée de *Bohor* (1962) », in M. Solomos, A. Georgaki, G. Zervos (éd.) *Definitive Proceedings of the International Symposium Iannis Xenakis*, Athènes, 2007, p. 113-120.

156. CHION, Michel, « Les deux espaces de la musique concrète », *L'espace du son*, vol. 1, 1998, p. 31-33.

157. Les exemples de Bayle dans « L'oiseau moqueur » et Savouret dans *Don Quichotte Corporation* sont caractéristiques de cette approche.

158. CHOUVEL, « Polyphonie/polysémie. Comment aborder la multidimensionnalité du temps musical ? », *op. cit.*

des voies de mixage dans plusieurs dimensions : plan sonore, spectre, espace, narration. Transcrire de telles structures d'une manière linéaire est quasi impossible.

Ces différentes limites influencent fortement les transcriptions en les reléguant dans des usages illustratifs et normalisés.

1.4 Constats technologiques : les limites des outils numériques de transcription

Nos recherches nous ont progressivement amené à penser l'analyse musicale comme une synergie entre l'analyse elle-même, la représentation et les technologies numériques. Le musicologue doit articuler ces trois aspects – théorie, méthode, outil – aussi bien sur le plan analytique – conduite et processus d'analyse – que sur le plan technologique – flux de travaux reliant les sources aux résultats analytiques dans la gestion des fichiers et des données. Analyser revient à articuler théorie et pratique, mais, dans le cas de la musique électroacoustique, le musicologue doit également anticiper les difficultés liées aux médias aussi bien dans son activité d'analyse que dans la présentation et la publication de ses résultats.

1.4.1 Une typologie des outils d'aide à l'analyse

Le musicologue peut s'appuyer sur de nombreux logiciels durant le processus d'analyse et durant l'étape de présentation ou de publication. Deux catégories sont généralement évoquées : les logiciels de production musicale et les logiciels d'analyse sonore ou d'analyse musicale. La première catégorie ne sera pas présentée dans ce mémoire, elle regroupe essentiellement les stations audionumériques et les environnements de programmation. Dans certaines circonstances, le musicologue peut avoir accès aux fichiers créés par le compositeur et les interprètes. Nous avons plusieurs fois montré¹⁵⁹ comment la pratique de l'analyse du processus créateur ou les recherches dans le domaine de l'archivage étaient très fructueuses pour notre sujet. Ces domaines articulent l'analyse musicale avec les outils technologiques de création. Nous souhaitons donc adapter les méthodes employées dans le domaine de la création à la présentation des outils d'analyse musicale. Notre projet de recherche fermera la boucle en articulant cette typologie aux domaines de la création et de l'interprétation.

Nous avons identifié¹⁶⁰ quatre types de logiciels utilisés actuellement dans les domaines de la transcription et de la représentation :

1. les logiciels permettant de manipuler le spectre sonore : Audiosculpt¹⁶¹, SPEAR¹⁶². La modification du gain (renforcement ou filtrage) de certaines zones du spectre facilite l'analyse de textures complexes ou de mixages dans lesquels des effets de masquage sont utilisés par le compositeur pour orchestrer son matériau ;

159. COUPRIE, « Prolégomènes à la représentation analytique des musiques électroacoustiques », *op. cit.* ; COUPRIE, Pierre, « Le développement d'un outil d'aide à l'analyse musicale : bilan et perspectives musicologiques », *op. cit.* ; COUPRIE, « Analyser la musique mixte : vers une redéfinition des *workflows* en musicologie », *op. cit.* ; COUPRIE, Pierre, « Analyse de la musique mixte : logiciels, procédures, *workflows* », *op. cit.*

160. COUPRIE, Pierre, « 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, en préparation.

161. Audiosculpt est basé sur la technologie SuperVP permettant d'analyser et de manipuler les propriétés temporelles et spectrales des sons. Il est distribué à travers le forum de l'Ircam (<http://forumnet.ircam.fr>).

162. SPEAR est un logiciel gratuit développé par Michael Klingbeil (<http://www.klingbeil.com/spear>).

1.4. Constats technologiques : les limites des outils numériques de transcription

2. les outils d'extraction d'informations sur le signal sonore sous la forme de descripteurs audio : Audiosculpt, les plugins Vamp¹⁶³ dans Sonic Visualiser¹⁶⁴. Les descripteurs audio commencent à être de plus en plus utilisés en analyse musicale, nous les détaillerons dans la partie 2.1.2.2 ;
3. les logiciels d'annotation : Sonic Visualiser, ASAnnotation¹⁶⁵, Metascore¹⁶⁶, l'Acousmographe¹⁶⁷. De la simple annotation temporelle à la réalisation de transcriptions morphologiques, ces logiciels sont incontournables pour l'analyse de la musique électroacoustique ;
4. les logiciels orientés analyse musicale : le plugin Aural Sonology¹⁶⁸ utilisable dans l'Acousmographe, l'Acousmoscribe¹⁶⁹, TIAALS¹⁷⁰. Ces technologies permettent de franchir un pas dans l'analyse assistée par ordinateur en proposant des fonctions conçues pour la musicologie.

Ces exemples suggèrent trois types d'usages des technologies numériques pour l'analyse musicale :

1. l'exploration des œuvres par filtrage du spectre est probablement l'usage le plus intéressant. L'analyste peut ainsi déconstruire les textures spectrales complexes créées par le compositeur ou lors d'une performance électroacoustique ;
2. l'utilisation de descripteurs audio est récente en analyse musicale et dans l'étude du corpus électroacoustique ;
3. la création de transcriptions morphologiques est bien évidemment très courante dans l'analyse de la musique électroacoustique. Plusieurs logiciels permettent de créer de simples annotations textuelles ou des transcriptions graphiques plus élaborées.

Si, dans un premier temps, ces usages semblent suffisants pour l'aide à l'analyse musicale, l'exploration avancée des logiciels ne tarde pas à mettre en évidence de nombreuses limites. Nous avons utilisé plusieurs de ces outils ainsi que des logiciels de graphisme¹⁷¹ pour la réalisation de nos travaux de transcription. Notre connaissance de ces technologies nous a ainsi amené à penser non plus l'outil numérique comme une aide ponctuelle permettant d'aider le musicologue sur un problème précis, mais plutôt de l'épauler durant toutes les étapes de l'analyse musicale. Avant de présenter les limites les plus générales, attardons-nous sur l'absence de réflexion sur les flux de travaux.

163. Vamp est un format de plugin dédié à l'analyse du son (<http://www.vamp-plugins.org>).

164. Sonic Visualiser est développé par le *Centre for Digital Music* de l'Université Queen Mary à London (<http://www.sonicvisualiser.org>).

165. ASAnnotation est un logiciel gratuit basé sur Audiosculpt et développé à l'Ircam (<http://recherche.ircam.fr/anasyn/ASAnnotation>). N'étant plus maintenu depuis plusieurs années, sa compatibilité avec les systèmes récents n'est pas complète.

166. MetaScore est développé par Olivier Koechlin pour la médiathèque de la Cité de la Musique. C'est un logiciel de production de dossier multimédia combinant des textes, des images, des fichiers audiovisuels et des animations de suivi de partition.

167. L'Acousmographe est développé à l'INA-GRM (<http://www.inagrm.com/accueil/outils/acousmographe>) depuis le milieu des années 1990.

168. Le plugin Aural Sonology a été développé à l'INA-GRM à partir des recherches de Lasse Thoresen (<http://www.inagrm.com/aural-sonology-plugin-0>). Il permet d'utiliser une typomorphologie augmentée basée sur les travaux de Schaeffer.

169. L'Acousmoscribe est développé par le Scrimé à partir des recherches de Jean-Louis Di Santo (<http://scrimelabri.fr>) sur une typomorphologie augmentée dans le domaine spectral.

170. TIAALS est développé par les universités de Huddersfield et de Durham (<http://www.hud.ac.uk/research/researchcentres/tacem/>). Ce logiciel est encore en version bêta et permet de réaliser des tableaux typologiques ou paradigmatiques à partir de fragments segmentés sur les plans temporel et spectral.

171. Les transcriptions des œuvres de Luc Ferrari (COUPRIE, TERUGGI, *op. cit.*) ou d'Ivo Malec (COUPRIE, TOSI, *op. cit.*) ont ainsi été réalisées avec le logiciel Adobe Illustrator.

1.4.2 Les flux de travaux

Une des grandes difficultés posées par l'informatique se situe dans la dissociation entre l'information et son support. Selon Gérard Berry, cette dissociation sera peut-être même plus importante que l'invention de l'imprimerie pour l'histoire de l'humanité¹⁷². Sans les logiciels qui permettent le codage et le décodage, l'information n'est pas accessible. La notion de flux de travaux intervient afin de gérer l'usage des logiciels et de l'information qu'ils manipulent. L'utilisation de plus en plus courante des technologies numériques en musicologie nécessite de mener une réflexion sur ces flux qui permettent de faciliter l'échange d'informations ou la conversion des fichiers numériques. Les outils informatiques de la musicologie sont généralement pensés en dehors de ces flux ; par exemple, leurs fonctions d'exportation/importation ou de communication sont bien souvent absentes ou très limitées. Dans notre domaine, l'analyse des musiques électroacoustiques, nous avons déjà montré l'intérêt d'une réflexion dans cette direction¹⁷³.

Les logiciels présentés précédemment révèlent un flux de travaux en cinq étapes :

1. écoute instrumentée : navigation dans les fichiers audiovisuels, comparaison de fragments, modification du gain de certaines zones spectrales ;
2. annotation pendant l'écoute instrumentée par marqueurs temporels, textes ou dessins à la volée ;
3. extraction de descripteurs audio et mise en transcription afin d'extraire des indices et singularités au niveau spectromorphologique et/ou syntaxique ;
4. réalisation de tableaux et de cartes (typologiques, paradigmatiques, etc.) permettant d'analyser les correspondances entre différents sons ou différentes parties ;
5. modélisation des structures et flux musicaux sous la forme de représentations complexes.

Chacune de ces étapes nécessite de travailler sur différents types de fichiers en importation ou en exportation. De plus, le passage d'une étape à l'autre demande un formatage particulier de l'information. Ainsi, le résultat de la deuxième étape doit pouvoir être utilisé dans la cinquième sans perte de données, les annotations simples doivent pouvoir être transformées en annotations complexes. De même, les fichiers audio résultant de la première étape doivent pouvoir être utilisés dans la troisième étape. Le passage d'une étape à l'autre nécessite bien souvent un changement de logiciel, il devient donc indispensable de gérer les flux de travaux au niveau même du développement.

Mais la réflexion sur les flux de travaux ne se limite pas au parcours des données entre plusieurs logiciels. Les œuvres électroacoustiques interactives constituent une part importante de la création musicale actuelle. Elles sont réalisées à l'aide de logiciels qui manipulent des données de différents types. Les processus qui permettent ces manipulations sont eux aussi enregistrés dans ces logiciels. Dans le cas d'une analyse génétique ou d'une déconstruction de l'œuvre comme dans la pratique de la *faktura*¹⁷⁴, l'étude de l'ensemble de ces données est très importante. Or elles contiennent souvent des informations de différents types, certaines peuvent même être difficilement compatibles : gestion différente du temps, part de l'interaction dans l'évolution des processus, format des données, etc. Lors de l'analyse d'une performance électroacoustique improvisée¹⁷⁵, nous avons mis en évidence ces difficultés. Or penser les logiciels comme des unités indépendantes et non comme de possibles

172. BERRY, Gérard, *Pourquoi et comment le monde devient numérique*, Paris, Collège de France/Fayard, 2008, p. 22.

173. COUPRIE, Pierre, « Analyser la musique mixte : vers une redéfinition des *workflows* en musicologie », *op. cit.*

174. BATTIER, « A Constructivist Approach to the Analysis of Electronic Music and Audio Art – Between Instruments and Faktura », *op. cit.*

175. COUPRIE, « Improvisation électroacoustique : analyse musicale, étude génétique et prospectives numériques », *op. cit.*, p. 149-170.

1.4. Constats technologiques : les limites des outils numériques de transcription

maillons d'une chaîne – comme des outils intégrés dans des flux de travaux – rend impossible certaines opérations. Ces logiciels sont non seulement limités dans leurs usages, mais ils limitent aussi les perspectives analytiques des musicologues.

Enfin, l'étude des flux de données en analyse nécessite aussi de s'interroger sur la captation de l'œuvre. L'enregistrement des œuvres performatives est souvent le point faible, il ne tient généralement pas compte de la nature de l'œuvre et ne s'inscrit que dans une perspective d'archivage *a minima*. L'analyse d'une performance, que ce soit pour l'étude du résultat musical ou d'une recherche sur les processus de création, nécessite des moyens d'enregistrement plus adaptés : enregistrement audio multipiste, enregistrement vidéo multiple, enregistrement des données échangées entre les instruments (ordinateur, interface, capteurs ou contrôleurs).

Comme nous l'avons montré pour l'analyse de l'improvisation électroacoustique *Emak Bakia* par notre groupe les Phonogénistes, une meilleure intégration du numérique dans l'analyse musicale passe par la prise en compte des flux de travaux :

1. identifier la nature de l'œuvre afin d'enregistrer l'ensemble des éléments nécessaires à l'analyse musicale. Il ne s'agit pas d'enregistrer l'ensemble des flux audiovisuels ou des données échangées lors de la performance par les différents appareils, mais d'avoir identifié ceux qui seront indispensables à l'analyse ;
2. établir un format d'enregistrement de ces éléments afin de les rendre compatibles ;
3. faciliter l'échange des données entre les logiciels en développant un format spécifique ou en multipliant la compatibilité des logiciels avec des formats ouverts. Il conviendrait donc de proposer la mise en place d'un format sur le modèle du IEEE 1599 XML Encoding¹⁷⁶ en intégrant les aspects inhérents aux performances interactives. Ce point et le précédent sont probablement les plus importants pour la prise en compte des flux de travaux ;
4. élaborer des protocoles d'analyse simples et efficaces pour les différentes phases de l'analyse musicale. Chaque étape nécessite généralement des manipulations complexes, les publications ne présentant que les résultats analytiques. Il n'existe aucun manuel d'analyse des musiques électroacoustiques rendant ainsi cette activité rare et limitant bien souvent la pratique de l'analyse d'une œuvre au travail de présentation réalisé par le compositeur ;
5. développer des logiciels permettant la manipulation de données diverses afin de faciliter leur interprétation et créer des modélisations de l'œuvre.

Une réflexion sur les flux de travaux apparaît donc essentielle pour l'évolution de l'étude des œuvres électroacoustiques.

1.4.3 Les limites des outils informatiques

En analysant les flux de travaux et les usages courants des différents logiciels utilisés en analyse musicale, nous avons identifié leurs limites¹⁷⁷ :

1. ils sont généralement restreints à l'utilisation de fichiers audio stéréophoniques. Peu d'entre eux acceptent les fichiers multipistes ou permettent le travail sur plusieurs fichiers et aucun d'entre eux n'offre la possibilité de travailler avec des fichiers audiovisuels pourtant essentiels

176. BAGGI, Denis L., HAUS, Goffredo M., *Music Navigation with Symbols and Layers*, Hoboken, John Wiley, 2013.

177. COUPRIE, « EAnalysis: Developing a Sound Based Music Analytical Tool », *op. cit.*

lors de l'analyse d'une performance, d'une musique associée à un visuel¹⁷⁸ ou de musiques d'application ;

2. ils sont souvent limités dans leurs fonctions d'importation et d'exportation, réduisant ainsi leurs possibilités d'interaction avec les autres logiciels. Cet aspect est bien évidemment lié au fait qu'il n'existe pas réellement de format d'échange en musicologie ;
3. les logiciels de transcription n'adoptent pas un format d'échange graphique qui permettrait de passer de l'un à l'autre ou de compléter le travail dans des logiciels de dessin. Une intégration de l'importation et de l'exportation en SVG¹⁷⁹ serait une grande amélioration ;
4. leurs interfaces sont généralement conçues sur le modèle des logiciels de création, or l'analyse musicale nécessite des fonctions très spécifiques, par exemple la comparaison de fragments différents de la même œuvre ou la visualisation d'une œuvre avec des échelles différentes en simultané ;
5. certaines interfaces ne sont pas conçues pour une utilisation simple. Ainsi, l'interface de Sonic Visualiser rend complexe le simple déplacement dans le fichier audio ou l'utilisation des fonctions de zoom. De même, la manipulation du plugin Aural Sonology de l'Acousmographe par superposition de graphiques élémentaires peut paraître évidente, mais reste laborieuse lorsqu'il s'agit de modifier un paramètre sur plusieurs objets ;
6. s'ils intègrent des fonctions pour la musicologie, elles ne sont généralement pas développées en collaboration avec des chercheurs et ne sont guère utilisables en contexte. Les fonctions de Timbre Scope de l'Acousmographe¹⁸⁰ ou le dessin des descripteurs audio dans Sonic Visualiser¹⁸¹ sont caractéristiques ;
7. enfin, et ce sera l'objet de notre projet de recherche, ces logiciels ne présentent aucune fonction permettant d'étudier la performance ou l'interprétation électroacoustique. Nous avons identifié¹⁸² les différents types de données qu'un logiciel pourrait enregistrer afin de permettre le travail d'analyse d'une performance.

Ces quelques limites révèlent un manque de maturité des logiciels d'aide à l'analyse musicale. Si la musicologie commence à prendre conscience des possibilités offertes par le numérique, rares sont les chercheurs qui œuvrent réellement dans cette direction en proposant de nouvelles pratiques au sein même des projets de développement logiciel.

178. Nous avons expérimenté l'intérêt de pouvoir travailler sur la vidéo lors de l'analyse de la musique du film *Elephant* : COUPRIE, Pierre, « Les paysages sonores dans *Elephant* de Gus Van Sant », in L. Stransky, H. Zenouda (éd.) *The Medium is the Message*, Université de Toulon/Ville de Plaisir, en préparation.

179. Le format SVG (*Scalable Vector Graphics*), basé sur XML, est utilisé par de nombreux logiciels de graphisme pour enregistrer les données vectorielles.

180. Le Timbre Scope, développé à partir des recherches de Sébastien Gulluni, propose une segmentation automatique adaptée à l'électroacoustique. Malheureusement, aucun paramètre de filtrage ou de limite de segmentation n'est proposé, rendant cette fonction inutilisable dans le contexte de la recherche.

181. Le dessin des descripteurs audio n'est pas optimisé, rendant l'interface graphique rapidement inutilisable lors de la superposition de plusieurs représentations.

182. COUPRIE, « Improvisation électroacoustique : analyse musicale, étude génétique et prospectives numériques », *op. cit.*

1.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'introduire nos travaux dans le domaine de la transcription morphologique et de contextualiser les pratiques les plus courantes en analyse musicale. Nous avons mis en évidence les limites du modèle tant sur le plan de l'analyse musicale que sur celui des outils informatiques qui lui sont dédiés. Cette première étape se termine sur un constat d'échec : échec d'un modèle normalisé importé de recherches en linguistique structurale, échec d'un modèle fermé et donc peu adapté à l'aspect expérimental de l'étude de la musique électroacoustique, mais aussi échec d'un modèle qui l'a limitée à des usages illustratifs.

Toutefois, conclure la présentation de cette partie de nos recherches par un échec n'est par réellement honnête. Même si nos travaux actuels se sont éloignés de la pratique de la transcription morphologique, certains aspects de la transcription restent pour nous essentiels. Ainsi, le développement du logiciel EAnalysis n'aurait pu voir le jour sans la réalisation de ces transcriptions. De même, l'utilisation de différentes théories musicales dans nos analyses sous la forme de transcriptions d'objets sonores, de fonctions, de spectromorphologies ou d'unités sémiotiques nous a permis de mesurer la distance qui existe entre ces théories élaborées par des compositeurs afin de présenter leurs œuvres ou de les enseigner et l'élaboration d'une théorie globale ou d'un ensemble de théories accompagnées de méthodes adaptées qui permettraient d'analyser l'ensemble du répertoire électroacoustique.

Chapitre 2

Objectif de la recherche : la représentation analytique

Ce chapitre se présente en deux parties : une description de nos travaux dans le domaine de la représentation analytique et une présentation du développement du logiciel EAnalysis. À partir des limites identifiées dans le chapitre précédent, nous avons construit un modèle analytique plus large basé sur les technologies numériques. De plus, ce chapitre n'est qu'une étape vers notre projet de recherche qui sera présenté en fin de mémoire.

2.1 De la transcription à la représentation analytique

La transcription morphologique représente une part importante de nos recherches sur l'analyse de la musique électroacoustique¹. Depuis la fin des années 1990, nous avons produit des transcriptions de différents types sur des œuvres essentiellement acousmatiques. La première partie nous a permis de présenter ces transcriptions en lien avec l'évolution de nos recherches et les travaux réalisés par l'ensemble de la communauté scientifique depuis les années 1950. Le développement du logiciel EAnalysis nous a progressivement fait prendre conscience que le concept de transcription n'est adapté qu'à une partie des méthodes d'analyse employées en électroacoustique. Il convient maintenant d'opérer un changement d'échelle afin de passer au niveau de la représentation analytique englobant des techniques plus complexes et adaptées à l'analyse d'un corpus plus large.

2.1.1 Le modèle de transcription morphologique

Les différents exemples de transcriptions présentés dans la partie précédente nous ont permis de montrer comment la transcription morphologique était héritière de la transcription phonologique en linguistique structurale et comment les chercheurs s'étaient inspirés des pratiques dans ce domaine et dans celui de l'ethnomusicologie pour l'adapter au corpus de l'électroacoustique. Toutefois, est-il possible d'analyser plus précisément le modèle de la transcription morphologique afin de le faire évoluer vers celui d'une représentation plus large ?

Le principal objectif de la transcription morphologique est de créer une modélisation graphique de la perception de l'œuvre. Les termes *modèle* ou *modélisation* peuvent avoir des sens très différents

1. COUPRIE, « Prolégomènes à la représentation analytique des musiques électroacoustiques », *op. cit.*

2.1. De la transcription à la représentation analytique

dans la recherche scientifique². Le sens que nous lui donnons dans ce mémoire est celui qui « consiste à associer un schéma symbolique à un phénomène ou à des données empiriques³ ». Cette modélisation est le résultat d'une analyse d'au moins une conduite d'écoute (figure 2.1). L'analyste relève les saillances et les similitudes du matériau sonore et les note dans sa transcription. Les caractéristiques acoustiques ou musicales des éléments ainsi identifiés sont transformées en formes dont les propriétés graphiques correspondent à un code choisi par l'analyste. Cette transcription a pour objet de fixer visuellement les matériaux et structures constituant la perception de l'œuvre.

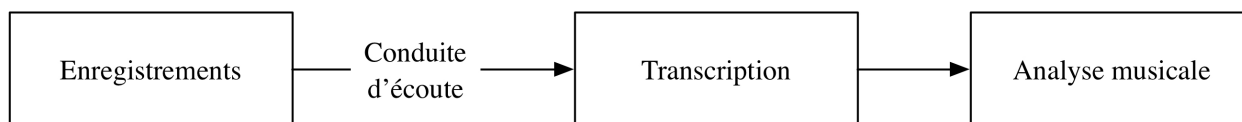


FIGURE 2.1 – Le modèle de la transcription.

La réalisation d'une transcription se heurte généralement au problème récurrent de la segmentation. Simha Arom définit la segmentation comme

« le résultat de l'opération qui consiste à découper une chaîne sonore en unités discrètes, en considérant les éléments identiques qui figurent dans des environnements différents, et, inversement, les éléments différents qui figurent dans des environnements identiques⁴. »

En suivant la théorie de la forme et le bipôle objet-structure de Schaeffer, la segmentation est donc le résultat :

1. d'un choix de niveau de segmentation. L'analyste peut choisir de segmenter en découpant chaque son – c'est ce que nous avons réalisé dans nombre de nos transcriptions comme dans « Ondes croisées » – ou en les regroupant par structures afin de travailler à un niveau de segmentation plus élevé – comme nos transcriptions sur les pièces de Ferrari. Toutefois, les analystes réalisent aussi très souvent des changements de niveau, voire superposent des segmentations de niveaux différents – comme dans notre transcription de *Don Quichotte Corporation* dans laquelle plusieurs structures complexes ont été transcrites avec une forme graphique unique de couleur violette ;
2. d'une identification de formes dans leur contexte. La segmentation répond alors à l'identification de formes sonores par rapport aux autres formes qui l'entourent par superposition ou par juxtaposition. Cette identification se fait donc dans deux dimensions : le temps et le spectre. La segmentation temporelle sera le résultat d'une modification du spectre dans le temps, c'est-à-dire de la morphologie. La segmentation spectrale résulte d'une identification de masses spectrales organisées différemment. Toutefois, les deux opérations de segmentation ne sont pas indépendantes, l'évolution de la morphologie modifie les équilibres des masses spectrales qui elles-mêmes conditionnent leur évolution dans le temps ;
3. d'un équilibrage à la fois entre les différents niveaux de la segmentation et les différentes formes, ce qui correspond à l'identification des classes paradigmatiques de la linguistique structurale. Les différentes unités segmentées vont devoir entrer dans une classification permettant

2. DALMEDICO, Amy Dahan, « Variations sur les modèles en sciences », in J.-M. Chouvel, F. Lévy (éd.) *Peut-on parler d'art avec les outils de la science ?*, Paris, L'Harmattan/Ircam, 2002, p. 111.

3. *Ibid.*, p. 115.

4. AROM, *op. cit.*, p. 256.

d'identifier leur degré de similitude entre elles. Ce processus de classification est réalisé durant l'étape de segmentation et permet d'en vérifier sa validité en comparant chaque nouvelle unité segmentée aux précédentes. La transcription finale peut ainsi se présenter sous la forme d'un tableau paradigmatique comme dans l'analyse de *Wind Chimes* de Denis Smalley par Michael Clarke⁵. Toutefois, cet équilibrage implique que le changement de niveau de segmentation n'engendre pas de changement de méthode de segmentation, la segmentation des structures d'unités doivent répondre aux mêmes règles que la segmentation des unités plus fines. Dans le cas contraire, la constitution de classes paradigmatiques est impossible.

Au sein de la Société française d'analyse musicale (Sfam), avec Bruno Bossis, nous avons constitué un groupe de recherche sur l'Analyse de la musique électroacoustique⁶ (AME). Ce groupe, composé d'Alain Bonardi, de Frédéric Dufeu, de Mikhail Malt et de Laurent Pottier, a concentré sa réflexion sur la question de la segmentation. Chaque membre a ainsi apporté un point de vue différent sur ce problème qui reste ouvert :

1. Alain Bonardi et Frédéric Dufeu ont travaillé sur les questions d'analyse des processus de création. La segmentation de l'œuvre est ici produite sur un plan diachronique à travers le suivi des matériaux et des processus depuis les sources fournies par le compositeur jusqu'à l'enregistrement de la création ;
2. Bruno Bossis et Laurent Pottier se sont attachés à analyser les relations entre la notation symbolique des parties électroniques des œuvres mixtes et leurs réalités sonore et musicale ;
3. Laurent Pottier a aussi exploré la question de la modélisation des matériaux à travers la relation entre la musique électroacoustique et les musiques populaires ;
4. avec Mikhail Malt, nous avons exploré le champ des descripteurs audio qui permettent une segmentation du matériau non pas en unités mais en morphologies⁷, transformations ou flux musicaux.

Les quelques réflexions du groupe ont permis de créer une synergie entre des recherches jusqu'alors isolées et de faire émerger la multidimensionnalité de la notion de segmentation.

La transcription décrite par Schaeffer peut répondre à des objectifs très divers : préparer une analyse des conduites d'écoute comme Delalande l'a montré, guider une analyse de l'œuvre, permettre une déconstruction de l'œuvre afin d'en analyser les processus de création sur le modèle des travaux de Clarke, ou simplement permettre une meilleure communication sur les œuvres. Toutefois, cette transcription, lors d'une utilisation en contexte, révèle un certain nombre d'impasses bloquant l'évolution du modèle :

1. la première impasse est d'ordre pratique. La réalisation d'une transcription se fait rarement en une seule étape, elle est généralement le résultat d'un long processus d'essais, d'adaptations et de modifications. Sauf à analyser des œuvres faciles à mémoriser – elles sont rares en électroacoustique – le choix du niveau et des critères de segmentation avant la transcription est soit impossible, soit le résultat d'une grande simplification qui risque de n'être que de peu d'utilité pour l'analyse musicale qui suivra. Une transcription apportant suffisamment d'informations pour être indispensable à l'analyse musicale nécessite un long processus de travail qui ne peut s'élaborer que durant l'analyse musicale de l'œuvre et avec un outil suffisamment souple pour

5. CLARKE, *Analysing Electroacoustic Music: An Interactive Aural Approach*, op. cit.

6. L'activité de ce groupe se retrouve en ligne : <http://ame.sfam.org>

7. Ce terme n'est pas pris ici au sens schaefferien – la structure interne d'une forme – mais dans le sens de la forme extérieure d'un objet. Nous l'appliquons à l'analyse d'un ensemble de données.

2.1. De la transcription à la représentation analytique

permettre la réalisation de nombreux essais sans avoir à recommencer le travail de transcription à chaque changement d'échelle ;

2. la deuxième impasse découle de la première : certaines transcriptions, n'apportant que peu d'information pour l'analyse, ne se justifient pas en comparaison avec une représentation spectrale travaillée. Il existe de nombreuses manières de représenter le spectre qui mettent en évidence certains aspects et critères sonores ou musicaux plutôt que d'autres, qui permettent de travailler sur certains niveaux, qui aident à la segmentation en unités ou en structures, qui mettent en évidence les similitudes entre les sons ou les corrélations entre les évolutions de certains paramètres musicaux. Ces différents types de représentations acoustiques n'ont été que très peu exploités dans l'analyse de la musique électroacoustique, ils sont pourtant porteurs de nombreuses informations utiles à l'analyste en tant que tel ou pour les suggestions métaphoriques qu'ils suscitent ;
3. la transcription est avant tout adaptée aux œuvres dont les unités à segmenter sont facilement identifiables. La transformation d'un élément remarquable du flux sonore en forme graphique nécessite qu'il soit au moins défini temporellement. La mise en correspondance entre les formes sonores et les formes graphiques nécessite que les premières partagent une partie des caractères graphiques des secondes. L'unité ainsi segmentée doit avoir des bords bien définis. Or de nombreuses œuvres électroacoustiques, en maniant une polyphonie spectrale complexe ou une évolution constante du matériau, rendent la segmentation en unités impossible ou nécessitent l'usage de représentations globales dans lesquelles les détails ne peuvent être définis avec précision ;
4. penser la transcription comme une étape préanalytique prive le chercheur d'un outil analytique qui nous semble essentiel. Nous avons toujours utilisé la transcription comme outil d'analyse, durant le processus de recherche ;
5. enfin, comme nous l'avons remarqué dans le premier point, réaliser une transcription suffisamment précise et détaillée pour être le support d'une analyse demande un long travail. Est-il réellement nécessaire ? Il nous semble qu'une partie de la recherche musicale sur l'électroacoustique a perdu beaucoup de temps ces dernières années dans la réalisation de nombreuses transcriptions. Si leur intérêt pédagogique est indéniable, leur apport pour l'analyse musicale a été bien plus réduit. Les transcriptions ont permis de parfaire notre connaissance du répertoire historique, mais elles ont aussi montré une impasse analytique.

La conservation de ce modèle de transcription depuis les années 1990 va de pair avec le modèle proposé par l'Acousmographe. Ce logiciel, qui reste la référence en matière de transcription, n'a quasiment pas évolué depuis vingt ans. S'il répondait à un besoin musicologique important, aider le chercheur dans la réalisation de ce support visuel indispensable à l'analyse musicale, il n'a pas su intégrer les nouvelles recherches dont certaines ont été réalisées au sein même du Groupe de recherches musicales :

1. la segmentation semi-automatique : Sound Spotting⁸ de Spevak et Polfreman et le système interactif pour l'analyse des musiques électroacoustiques⁹ de Gulluni. Ces deux projets de

8. SPEVAK, Christian, POLFREMAN, Richard, « Sound Spotting – An Approach to Content-Based Sound Retrieval », in *Music Without Walls ? Music Without Instruments ?*, Leicester, De Montfort University, 2001, <http://www.dmu.ac.uk/documents/technology-documents/research/mtirc/nowalls/mww-spevak.pdf>

9. GULLUNI, Sébastien, *Un système interactif pour l'analyse des musiques électroacoustiques*, Thèse de doctorat sous la direction de Gaël Richard, Paris, Télécom ParisTech, 2011, <https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00676691/document>

recherche ont pourtant donné des résultats extrêmement prometteurs dont le champ d'utilisation dépassait très largement le corpus électroacoustique ;

2. la transcription pour la création : le système de transcription morphologique en trois dimensions¹⁰ de Patton et les propositions graphiques de transcriptions spectromorphologiques¹¹ de Blackburn. L'absence de connexion entre les technologies de création et d'analyse musicale développées au GRM nous a toujours paru étrange.

Le modèle de l'acousmographie est ainsi passé à côté des évolutions technologiques qui ont fait de nos ordinateurs des outils très puissants pour l'analyse acoustique ou la réalisation de représentations musicales complexes.

La transcription de repérage¹² de « Sommeil », extrait des *Variations pour une porte et un soupir* de Pierre Henry réalisée par François Delalande, est caractéristique de cette problématique. Cette transcription a une utilité extrêmement réduite en analyse musicale. Ainsi, le discours musical du compositeur reste très lisible sans la transcription, l'usage d'un sonagramme travaillé sur le plan graphique aurait même permis de rendre compte des subtilités de variation du matériau d'une manière bien plus détaillée. De plus, l'évolution des paramètres musicaux – sur le plan des rythmes, de l'évolution des sites spectraux ou de la variation fine des morphologies – est masquée par l'absence de vision synoptique.

2.1.2 Les représentations acoustiques

L'utilisation de représentations acoustiques durant le processus d'analyse musicale est courante. Toutefois, les types de représentations se limitent bien souvent au sonagramme linéaire. Avec le développement du logiciel EAnalysis, nous avons exploré des types de représentations peu commun allant du tracé spectral aux visualisations de descripteurs audio. Dans une publication récente¹³, nous avons été jusqu'à remplacer la transcription par des représentations acoustiques. Leur précision et les différents points de vue qu'elles proposent nous ont permis de nous passer d'une transcription morphologique sans perdre pour autant l'objectif analytique.

2.1.2.1 Le tracé spectral

Lorsqu'il est question de représentation acoustique dans l'analyse des œuvres électroacoustiques, le sonagramme apparaît bien souvent comme la seule possibilité. Si le sonagramme linéaire ou logarithmique offre un support visuel à partir duquel la détection des morphologies est facilitée, d'autres formes de représentations du spectre peuvent aussi apporter des indices à l'analyste.

De nombreuses œuvres résistent à l'analyse morphologique, elles semblent surtout construites autour de transformations progressives du matériau, de flux enchevêtrés difficiles à segmenter ou de champs de forces¹⁴. Dans ces œuvres l'évolution morphologique se rapproche plutôt de l'étude des

10. PATTON, Kevin, « Morphological Notation for Interactive Electroacoustic Music », *Organised Sound*, vol. 12, n° 2, 2007, p. 123-128.

11. BLACKBURN, Manuella, « The Visual Sound-Shapes of Spectromorphology: An Illustrative Guide to Composition », *Organised Sound*, vol. 16, n° 1, 2011, p. 5-13.

12. DELALANDE, François, *Transcription de repérage de « Sommeil », de Pierre Henry*, Paris, INA, 2013, <http://www.institut-national-audiovisuel.fr/sites/ina/medias/upload/grm/mini-sites/acousmographies/co/sommeil.html>

13. COUPRIE, « Voyage dans "Grandeur nature", première partie de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle », *op. cit.*

14. MURAIL, *op. cit.*, p. 12.

2.1. De la transcription à la représentation analytique

morphogénèses en biologie qui détermine les formes en fonction de leur persistance¹⁵ : formes à l'équilibre, formes transitoires hors d'équilibre et formes stationnaires loin de l'équilibre. L'usage de ces formes en analyse musicale nécessite un changement de point de vue. L'analyse doit s'ancrer d'une part dans une dimension dynamique – la forme temporelle et spectrale des spectromorphologies – et d'autre part dans une dimension fonctionnelle – l'évolution de la forme est le résultat d'un processus de transformation ou d'édition/mixage et concourt à l'évolution du discours musical. Rappelons-nous que dans la théorie schaefferienne, à l'origine de nombreuses recherches, l'objet d'étude est séparé de son contexte immédiat – l'œuvre – mais aussi de son rôle musical à tous les niveaux – de l'œuvre au corpus.

Le sonagramme présente aussi un problème d'échelle, il est efficace lors d'un usage avec un facteur de grossissement suffisant, le sonagramme synoptique d'une œuvre de 40 minutes apporte rarement de renseignements sur les matériaux et n'est utile pour l'analyse de la forme que si celle-ci fonctionne avec des oppositions de masses sonores.

Il nous faut donc explorer de nouvelles formes de représentations acoustiques. Entendons-nous bien, ces représentations ne sont pas nouvelles en elles-mêmes, mais leur usage dans l'analyse musicale et plus particulièrement dans l'analyse des musiques électroacoustiques est plutôt rare, voire inexistant. Placer la représentation au cœur de l'analyse nécessite d'exploiter toutes les pistes qui s'ouvrent à nous afin d'y trouver les indices, saillances ou singularités qui pourront guider notre analyse. Dans nos recherches, nous avons exploité deux formes de représentations acoustiques : les représentations basées sur le tracé spectral et les représentations des descripteurs audio¹⁶.

Nous avons ainsi exploré quatre types de représentations du spectre :

1. le **sonagramme linéaire** ou **logarithmique** reste la représentation de référence pour un usage exploratoire de l'œuvre ;
2. le **sonagramme en ondelettes** est très efficace pour étudier les œuvres dont le matériau est harmonique. Nous l'avons notamment utilisé lors d'une conférence sur l'analyse de *L'oreille étonnée* de François Bayle ;
3. le **sonagramme différentiel**, présenté par Chouvel, Agon et Bresson¹⁷ pour l'analyse de l'interprétation, permet de mettre en évidence les microvariations spectrales, les différents types d'attaques ou le rôle des ruptures dans l'évolution formelle ;
4. la **matrice de similarité** réalisée à partir d'un sonagramme linéaire met en évidence les variations ou les récurrences spectrales.

Combinées entre elles, ces représentations deviennent un outil très efficace pour l'exploration des variations spectrales à différentes échelles. Elles sont aussi complémentaires des représentations réalisées à partir des descripteurs audio.

2.1.2.2 Les descripteurs audio

Développés pour la classification, la reconnaissance automatique ou l'extraction de caractéristiques sonores, les descripteurs audio commencent à apparaître en analyse musicale. Ils ont été créés

15. BOURGINE, Paul, LESNE, Annick, « Introduction », in *Morphogénèse. L'origine des formes*, Paris, Belin, 2006, p. 14.

16. *Ibid.*, p. 14.

17. CHOUVEL, Jean-Marc, BRESSON, Jean, AGON, Carlos, « L'analyse musicale différentielle : principes, représentation et application à l'analyse de l'interprétation », in *Electroacoustic Music Studies Conference*, Paris, 2007, <http://www.ems-network.org/IMG/JMChouvelEMS07/index.html>

pour l'étude de musiques modales ou tonales. Les utiliser dans l'analyse de matériaux principalement inharmoniques, comme dans le cas des œuvres électroacoustiques, n'est pas sans poser quelques difficultés. De plus, leur liste ne cesse de croître, même si nombre d'entre eux ne sont que des variations de descripteurs déjà existants. Enfin, ils sont aussi sujets à de nombreuses perturbations : les silences, les variations importantes d'intensité, les parties inharmoniques du spectre sont autant d'éléments qui occasionnent des résultats instables, voire inutilisables. Toutefois, l'usage des descripteurs en analyse n'en est qu'à son premier âge, les musicologues ont besoin de les expérimenter avant d'initier des recherches qui permettront de les améliorer ou de créer des représentations spécifiques. Nous nous sommes donc concentré sur l'exploration des descripteurs et sur l'usage de différents types de représentations¹⁸.

Ce travail empirique d'expérimentation a trouvé un écho dans le cadre du groupe de recherche Analyse de la musique électroacoustique de la Sfam. Ainsi, les travaux de Mikhail Malt ont été très inspirants pour nos recherches.

Nous avons sélectionné dix descripteurs que nous avons répartis en trois catégories :

1. les descripteurs basés sur une analyse spectrale : barycentre, *rolloff*, *skewness*, variance, MFCCs et irrégularité ;
2. deux descripteurs de niveau de bruit ou de niveau d'harmonicité : inharmonicité et *zero crossing rate* ;
3. les descripteurs d'intensité : intensité RMS et *loudness*.

Nous avons expérimenté ces descripteurs à l'aide de plusieurs types de représentations, quatre d'entre elles se sont révélées particulièrement adaptées à l'analyse musicale¹⁹ :

1. le graphique sur le modèle de la BStD²⁰ (*Brightness Standard Deviation*) utilisée par Emmanuel Malt et Emmanuel Jourdan pour l'analyse du timbre et permettant de visualiser trois descripteurs sur une seule courbe (Y, épaisseur et couleur). Cette représentation est très efficace pour visualiser les morphologies et les structures formelles ;
2. le graphique en nuage de points, permettant de visualiser jusqu'à cinq descripteurs (X, Y, taille du point, couleur, transparence) avec ou sans animation temporelle. Ce graphique met en évidence les regroupements de valeurs diachroniques sur l'ensemble de l'œuvre ou sur un fragment dans le cas d'une animation à l'aide d'un empan temporel ;
3. la matrice de similarité (figure 2.20 page 80), mettant en évidence les similarités dans une ou plusieurs séries de valeurs. Cette représentation permet d'analyser les récurrences et de mettre en évidence les singularités ;
4. le graphique de corrélation hiérarchique (figure 2.19 page 79), permettant d'étudier la corrélation entre deux séries de valeurs sur des niveaux continus de hiérarchie.

18. Nous décrirons plus en détail ces différents types de représentations dans la section 2.2.3.6 dédiée au développement du logiciel EAnalysis.

19. Voir le détail de chaque descripteur dans le tableau de la figure 2.2 page 53.

20. MALT, Mikhail, JOURDAN, Emmanuel, « Le "BStD" – une représentation graphique de la brillance et de l'écart type spectral, comme possible représentation de l'évolution du timbre sonore », in X. Hascher, M. Ayari, J.-M. Bardez (éd.), *L'analyse musicale aujourd'hui*, Paris, Delatour, 2015, p. 111-128.

2.1. De la transcription à la représentation analytique

Nos recherches sur l'usage de descripteurs dans l'analyse de la musique acousmatique ont mis en évidence trois difficultés principales :

1. le choix de descripteurs pertinents en fonction du matériau et des objectifs de l'analyse musicale. De nombreux descripteurs ne sont pertinents qu'avec certains types de matériaux, c'est la raison pour laquelle notre première catégorie ne contient pas moins de six descripteurs. Certains permettront d'obtenir de bon résultats avec des sons harmoniques, d'autres avec des sons plus bruités, d'autres encore avec des matériaux très hétérogènes. Le tableau de la figure 2.2 liste ces différents usages ;
2. les descripteurs utilisés sont tous de bas niveau, ce qui signifie qu'ils sont difficilement interprétables en eux-mêmes. Ils nécessitent d'être intégrés dans des représentations permettant de les comparer, de mettre en évidence les zones de similarité, leurs corrélations, de faire émerger leurs zones de singularités ou leur régularité ;
3. enfin, les descripteurs ne sont que rarement utilisés seuls, ils sont généralement combinés afin d'obtenir des représentations prenant en compte les caractéristiques principales de l'évolution des matériaux sonores. Cet usage est caractéristique de la matrice d'autosimilarité calculée à partir d'une matrice de descripteurs.

Une fois les difficultés résolues, les représentations auxquelles nous avons abouti nous ont conforté dans notre direction de recherche : dans bien des cas, un ensemble de représentations acoustiques permet de remplacer une transcription morphologique en apportant de nouvelles informations analytiques. Ainsi, notre analyse de la première partie de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle²¹, réalisée à partir de descripteurs audio (barycentre, *rolloff*, variance, amplitude RMS, *loudness*, inharmonicité, déviation spectrale et MFCCs) et de représentations (BStD, nuages de points et matrice d'autosimilarité), nous a permis de mettre en évidence :

1. la complexité des transformations spectrales progressives opérant à plusieurs niveaux hiérarchiques ;
2. la continuité de cette partie inscrite au cœur même de l'évolution spectrale ;
3. le rôle des gestes spectromorphologiques dans la construction de la forme musicale ;
4. la multiplicité des conduites d'écoute permise par la complexité des relations spectrales entre les différents matériaux.

Notons que nous n'avons pas exploré l'analyse automatique²² ou l'aide à la segmentation²³. Ces techniques s'appuient sur l'usage d'un panel de descripteurs audio. Si l'analyse automatique fonctionnant à partir d'une extraction de spectromorphologies semble être une impasse, les travaux de Gulluni sont bien plus prometteurs.

2.1.3 La représentation analytique comme modèle

Depuis quelques années, nous avons élaboré un modèle de représentation plus large, englobant la transcription morphologique (figure 2.3). Ce modèle est né d'une réflexion sur notre pratique de

21. COUPRIE, « Voyage dans "Grandeur nature", première partie de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle », *op. cit.*

22. KLIEN, Volkmar, GRILL, Thomas, FLEXER, Arthur, « On automated annotation of acousmatic music », *Journal of New Music Research*, vol. 41, n° 2, 2012, p. 153-173.

23. GULLUNI, Sébastien, BUISSON, Olivier, ESSID, Slim, RICHARD, Gaël, « An Interactive System for Electro-Acoustic Music Analysis », *in ISMIR*, Miami, Université de Miami, 2011, p. 145-150.

Descripteur	Description	Usages
Amplitude RMS	Mesure de l'amplitude efficace	Détection de ruptures, de gestes morphologiques, usage dans les matrices de similarité ou pour filtrer les données d'un autre descripteur
Barycentre spectral (<i>spectral centroid</i>)	Mesure de la moyenne de la masse spectrale	Évaluation de la brillance spectrale, détection de gestes spectromorphologiques
Inharmonicité	Distance entre le signal et un signal purement harmonique	Analyse de la présence de bruits blancs, de la granulosité des sons
Irrégularité spectrale	Degré de variation des différentes valeurs d'amplitude du spectre	Étude de l'irrégularité de l'amplitude d'un matériau dont le timbre est homogène
<i>Loudness</i>	Mesure psychoacoustique de l'amplitude du signal	Détection de gestes morphologiques au niveau des macrostructures ou des microstructures dans le cas de matériaux instables
<i>Mel-Frequency Cepstrum Coefficients</i> (MFCCs)	Mesure de l'énergie par bande de fréquences	En complément d'autres descripteurs dans les matrices de similarité
<i>Spectral rolloff</i>	Fréquence en dessous de laquelle se concentre un certain pourcentage de l'énergie du spectre	Complémentaire du barycentre spectral, analyse de matériaux très variables et occupant une large partie du spectre
<i>Spectral skewness</i>	Différence entre la partie du spectre située au-dessus du barycentre et celle située en dessous	Complémentaire du barycentre spectral, analyse spectrale d'un matériau hétérogène
Variance spectrale	Dispersion du spectre autour du barycentre	Utilisée en complément du barycentre afin de créer une représentation de l'évolution du timbre
<i>Zero crossing rate</i>	Fréquence de passage du signal à zéro	Mesure du niveau de bruit particulièrement efficace pour l'étude de textures spectrales très bruitées comme dans le cas des paysages sonores

FIGURE 2.2 – Tableau récapitulatif de notre sélection de descripteurs audio pour l'analyse de la musique acousmatique.

l'analyse musicale et sur les nombreuses possibilités de représentations offertes par les recherches en acoustique musicale. Loin d'être une rupture, ces recherches sont dans la lignée de celles effectuées pour notre thèse de doctorat. Notre objectif était de montrer comment la représentation pouvait devenir un véritable outil d'aide à l'analyse musicale. Le début des années 2000 a vu la multiplication de publications et de travaux dans lesquels les transcriptions ont acquis une part de plus en plus importante. Toutefois, force est de constater que ces transcriptions restent bien souvent au stade d'exemples musicaux ou d'illustrations parfois didactiques, sans être réellement intégrées au processus d'analyse.

2.1. De la transcription à la représentation analytique

La représentation analytique apparaît donc comme une étape importante dans cette direction que nous avons suivie dès la fin des années 1990.

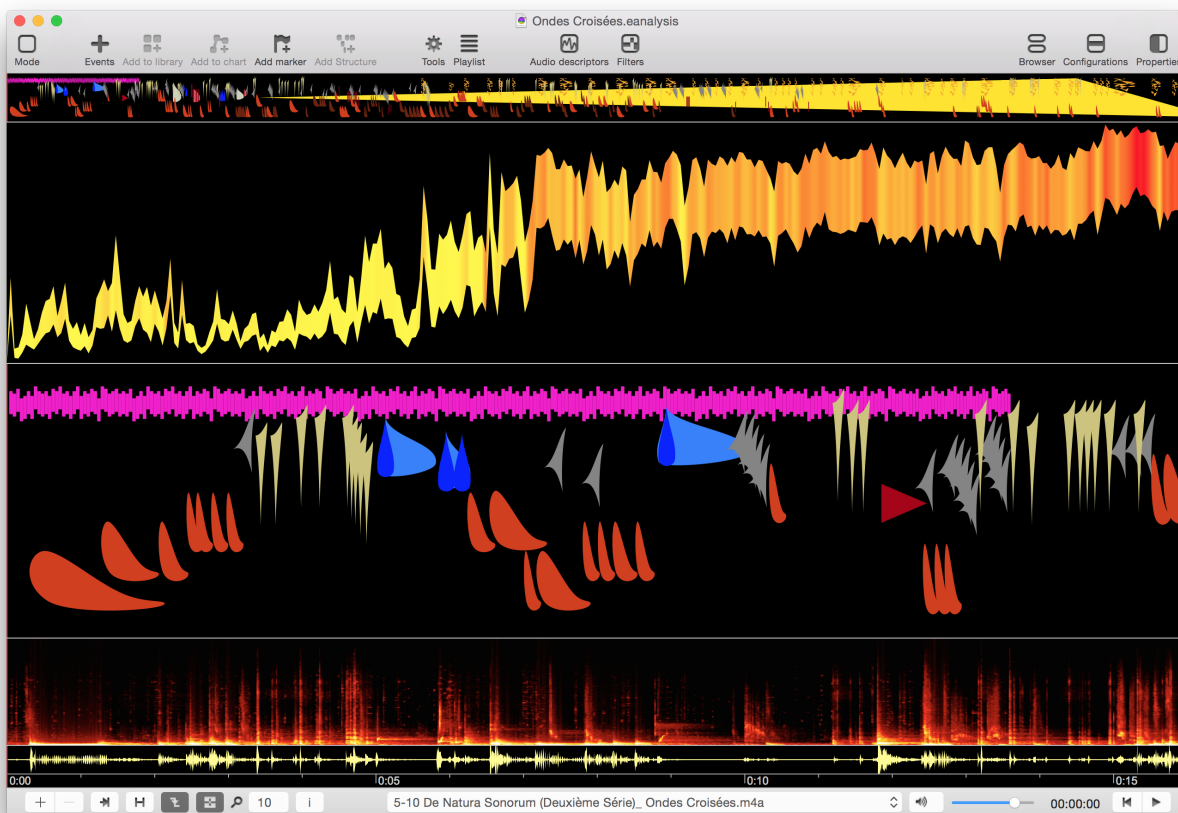


FIGURE 2.3 – Exemple de représentation analytique réalisée avec EAnalysis et réunissant une transcription et des représentations du signal (forme d’onde, sonagramme, descripteurs audio) à partir d’« Ondes croisées » (*De Natura Sonorum*) de Bernard Parmegiani (1975).

Comme toute représentation dans le domaine de l’analyse musicale, la représentation analytique est un modèle au sens que donne la linguistique à ce terme, c’est un « simulacre construit permettant de représenter un ensemble de phénomènes²⁴ ». La modélisation graphique ainsi obtenue n’est pas seulement un visuel avec lequel naviguer dans un fichier audiovisuel, elle est le résultat d’une analyse en présentant ou une plusieurs caractéristiques du flux musical. Ce modèle est aussi en construction durant sa réalisation, il porte alors la représentation à un niveau expérimental. De simple support – d’analyse, de présentation ou de publication – la représentation devient un outil de modélisation de l’œuvre et de l’analyse.

Dans la partie précédente, nous avons présenté les limites de la transcription. Cette étude a été réalisée à partir de transcriptions que nous avons réalisées ou que d’autres chercheurs ont produites. Ces transcriptions présentent toutes de nombreux points communs, elles se ressemblent tant par leur forme que par leur contenu. Ainsi, les transcriptions morphologiques, de loin les plus nombreuses, sont presque toujours identiques : elles mettent en évidence les caractéristiques morphologiques des unités segmentées lors de l’analyse musicale. Leur finalité se limite aux guides d’écoute ou aux illus-

24. GREIMAS, COURTÉS, *op. cit.*, p. 232.

trations de publications. Généralement multimédia, leur apparition dans les publications scientifiques a été un réel progrès, placées au niveau des exemples sur partition des analyses de musiques notées. Toutefois, cette pratique les a cantonnées dans un usage illustratif. Sans rompre avec cette pratique, notre objectif est de les intégrer dans un modèle plus large englobant l'ensemble des représentations du son et de la musique adaptées à l'analyse de la musique électroacoustique. La figure 2.4 présente une préfiguration de ce modèle. Préfiguration, car nous ne cessons de le faire évoluer et notre projet de recherche s'attachera à combler des parties encore absentes.

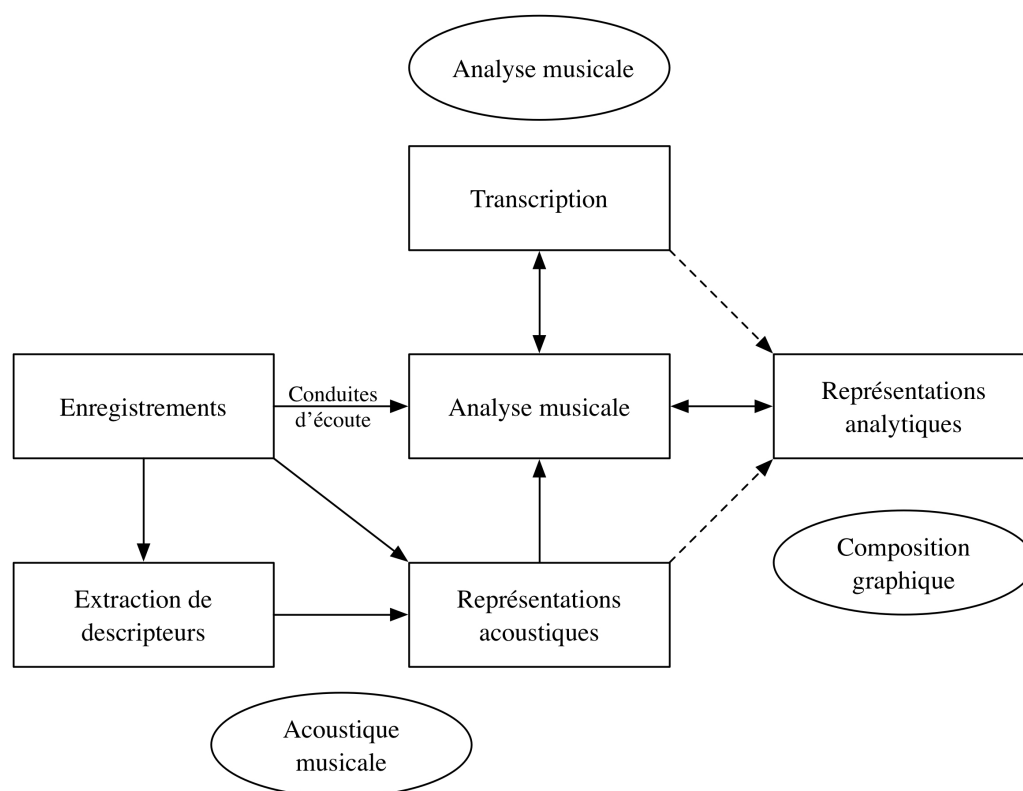


FIGURE 2.4 – Le modèle de la représentation analytique.

Basculer d'un modèle à un autre nécessite de repenser la nature même des éléments du modèle. La transcription est construite à partir d'unités, de fragments temporels identifiés lors de l'écoute ou mis en évidence par l'analyse. Ainsi que nous l'avons présenté dans la partie 1.3.1, la musique électroacoustique ne se laisse pas facilement découper en unités, de nombreuses œuvres fonctionnent comme une transformation progressive d'un matériau à un autre. Comme le souligne Tristan Murail, la musique électroacoustique pourrait ne pas être une musique d'atomes, mais une musique de flux²⁵. Nous l'avons expérimenté lors de l'analyse de la première partie de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle, œuvre dans laquelle le compositeur s'est attaché à créer une « ample respiration, un long survol en dilatations-compressions, sans impacts et sans heurts²⁶ ». La notion de flux permet de concevoir l'analyse d'une manière différente de celle mise en avant par les théories fondées sur la notion d'objet. Qu'elles considèrent la création musicale comme l'articulation d'unités perçues comme des objets sonores, des fonctions musicales, des unités sémiotiques ou des spectromorphologies, ces théories

25. MURAIL, *op. cit.*, p. 14.

26. BAYLE, François, *50 ans d'acousmatique*, Paris, INA-GRM/Magison, 2012, INA G 6033/6047, livret, p. 62.

2.1. De la transcription à la représentation analytique

ont toutes en commun d'isoler des fragments de son pour les analyser hors contexte et d'évacuer le paramètre temporel. Même si les chercheurs du MIM ou Denis Smalley ont tenté de réintroduire le temps dans l'analyse à travers la notion de geste sémiotique (unité sémiotique temporelle²⁷) ou spectromorphologique, le temps y est étudié comme un vecteur sous-tendant les paramètres analysés. De plus, isolé dans des unités, le temps y est étudié à un niveau microscopique. À l'échelle de l'œuvre, voire à celle d'un œuvre ou d'un ensemble de performances, il reste inaccessible. Changer d'échelle permettrait pourtant de faire des découvertes au niveau de notre perception. C'est un niveau auquel les technologies numériques nous offrent les moyens de faire de grands progrès.

Concevoir l'analyse électroacoustique non plus comme la segmentation d'unités sur le modèle de l'analyse phonologique mais comme la mise en évidence de flux, d'évolutions, de transformations nécessite de s'appuyer sur d'autres formes de représentations que la transcription. La figure 2.4 esquisse quelques directions en intégrant des formes de représentations très peu utilisées dans l'analyse des œuvres électroacoustiques. Nous avons passé quelques années à étudier ces représentations acoustiques basées sur des visualisations du spectre ou sur des descripteurs audio. Les résultats de ce travail sont prometteurs et laissent entrevoir de nouvelles manières d'envisager l'analyse des œuvres. Ainsi présentée, la représentation analytique est temporelle : les formes ne sont pas prises telles qu'elles se présentent à l'œil mais, comme des formes qui disent le temps, la forme et la représentation analytique sont dynamiques. Nous verrons lors de la présentation du projet de recherche que l'intégration du temps au cœur même de la représentation n'est pas sans poser des difficultés aussi bien sur le plan théorique que dans la réalisation technique d'un outil d'aide à l'analyse musicale.

Le modèle de la figure 2.4 articule trois domaines de recherches :

1. l'analyse musicale est représentée par l'usage de conduites d'écoute et l'analyse en elle-même. Ce domaine a été largement présenté dans le premier chapitre. Ces deux activités – écouter et analyser – sont à la base du travail musicologique ;
2. l'acoustique musicale nous fournit des outils d'analyse du signal, d'extraction de données et de visualisation qui facilitent les conduites d'écoute et les complètent lors de l'analyse ;
3. la composition graphique apporte des méthodes de visualisation de données et de composition de graphiques afin de constituer des représentations de haut niveau essentielles pour l'analyse musicale.

Ces trois domaines sont utilisés en interaction pendant le processus d'analyse musicale.

2.1.4 La composition de représentations

En 2000, l'INA-GRM publiait le cédérom *La musique électroacoustique* dans lequel la partie « Écouter » contenait l'analyse de six œuvres, chacune d'entre-elles étant analysée par plusieurs musicologues et compositeurs. Multiplier les points de vue sur une œuvre était un des principaux objectifs de cette partie. Une transcription seule peine à rendre compte de la complexité d'une œuvre électroacoustique ; associer plusieurs transcriptions, offrant chacune un point de vue très différent, permet de démultiplier l'analyse. En 2005, nous nous sommes saisi de cette idée pour l'intégrer à nos recherches. Nous avons publié une analyse d'une de nos œuvres²⁸ dans laquelle un fragment était représenté sous deux points de vue différents : une transcription réalisée à partir des images d'écran de la station audionumérique et une représentation de la position spatiale de chacun des sons. Cette

27. (Collectif), *Les unités sémiotiques temporelles*, Paris, Eska, 1996.

28. COUPRIE, « Analyse de *Jukurrpa - Quatre rêves* », *op. cit.*

double transcription nous a permis de rendre visible la spatialisation sur huit canaux de la version de concert. Cette simple juxtaposition allait nous amener vers la composition de représentations.

En 2007, nous avons publié un article dans lequel nous nous interrogeons sur l'utilité de représentation en trois dimensions²⁹. L'usage de plus de deux dimensions aurait pu être un autre moyen d'obtenir des représentations à plusieurs points de vue. Toutefois, nous avons mis en évidence les problèmes générés par ce type de représentation :

1. une perte de la précision de la transcription ou de la représentation des valeurs. Certaines formes graphiques se trouvant dans des plans éloignés peuvent paraître de la même taille que les formes d'autres plans. De plus, la précision des axes X et Y est plus faible dans les plans éloignés ;
2. une perte de la dimension intuitive de certaines transcriptions. Nous sommes peu habitués à manipuler des objets numériques en trois dimensions et la complexité de certaines transcriptions peut rapidement les rendre illisibles ;
3. une redondance d'informations risque d'être nécessaire afin de retrouver la précision que vont perdre certaines valeurs ;
4. une difficulté de réalisation graphique risque de rebuter de nombreux musicologues, l'usage des logiciels de dessin en trois dimensions nécessitant un temps d'adaptation dû à la démultiplication des positions des formes graphiques.

Composer une représentation analytique en associant plusieurs représentations en deux dimensions nous semble donc être la meilleure solution. Malheureusement, les logiciels permettant de créer ce type de représentation n'existaient pas³⁰ au milieu des années 2000. L'Acousmographe, Sonic Visualiser ou Audiosculpt, seuls logiciels permettant d'annoter un fichier audio, ne permettaient au mieux que de juxtaposer des représentations construites sur le même modèle. Composer des représentations ne prend son sens qu'en associant des graphiques de différents types afin de montrer l'évolution du matériau sous plusieurs aspects. Il nous a donc fallu imaginer un logiciel capable de gérer la composition de représentations.

2.2 Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

2.2.1 Historique du développement

2.2.1.1 Les origines : iAnalyse

L'idée du développement d'un logiciel d'aide à l'analyse de la musique électroacoustique a germé durant notre thèse de doctorat. Une partie de notre travail portait sur une analyse fine des paramètres acoustiques des objets sonores afin de produire des analyses distributionnelles. Nous avons exposé ce modèle analytique dans plusieurs articles³¹. Il permet d'étudier l'évolution des paramètres acoustiques sur l'ensemble d'une pièce, voire de comparer plusieurs pièces afin d'analyser la distribution

29. COUPRIE, Pierre, « Dessin en 3D et systèmes immersif pour la représentation de la musique électroacoustique », in *Electroacoustic Music Studies Network : The Language of Electroacoustic Music*, Paris, Université Paris-Sorbonne, 2007, http://www.ems-network.org/IMG/pdf_CouprieEMS07.pdf.

30. Une des solutions consistait à créer des animations multimédia en Flash, tâche difficile et peu adaptée.

31. COUPRIE, Pierre, « Trois modèles d'analyse de "L'Oiseau moqueur", un des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle », *Les cahiers de l'OMF*, n° 3, 1998, p. 50-70 ; COUPRIE, « Un modèle d'analyse pour les musiques électroacoustiques », *op. cit.* ; COUPRIE, « Analyse comparée des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle », *op. cit.*

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

de chaque objet dans la typomorphologie schaefferienne ou dans tout autre système de classification sonore.

Toutefois, le temps et la maîtrise d'environnement de programmation suffisamment puissant pour intégrer la gestion de données et la mettre en relation avec les fichiers audiovisuels des œuvres nous ont manqué. Nous avons terminé notre thèse en 2003 sans avoir pu travailler sur le développement de cette future application. Nous avons tout de même poursuivi notre réflexion en intégrant à nos recherches des études prospectives sur la place de l'informatique dans la musicologie³². Cette question est progressivement devenue centrale dans nos recherches.

Durant l'année 2005, nous avons commencé le développement d'une application conçue pour l'aide à l'analyse de la musique écrite, son historique est listé dans le tableau de la figure 2.5 et des images d'écran de chaque version sont présentées dans l'annexe E page 113. Nommée tout d'abord Diaposonore (première maquette) puis EDiMu pour Édition de diaporamas musicaux, elle deviendra lors de sa sortie officielle en juin 2007 iAnalyse. L'objectif d'iAnalyse était de développer un logiciel de présentation assistée par ordinateur (PAO) adapté à la musique. C'est la raison pour laquelle il a été conçu afin de manipuler des diapositives de la même manière que n'importe quel logiciel de PAO. La différence principale vient du fait que l'ensemble des éléments graphiques est synchronisé sur le plan temporel avec un fichier audiovisuel.

Dates	iAnalyse	EAnalysis	Langage
Année 2005	Diaposonore, maquette		Realbasic
Février 2006	EDiMu 0.1, prototype public		Realbasic
Juin 2007	iAnalyse 1.0.617		Realbasic
Juin 2008	Prototype adapté à la musique électroacoustique		Realbasic
Novembre 2008	iAnalyse 2.0.206		Objective-c
Février 2009	iAnalyse 3.0		Objective-c
Mars 2011		Prototype privé	Objective-c
Octobre 2011		EAnalysis 0.4.1 (alpha)	Objective-c
Mai 2012		EAnalysis 0.5.1 (bêta public)	Objective-c
Septembre 2013		EAnalysis 1.0	Objective-c
Mai 2013	iAnalyse 4.0		Objective-c
Novembre 2014	iAnalyse 4.2.4	EAnalysis 1.1.3	Objective-c

FIGURE 2.5 – Développement des différentes versions d'iAnalyse et d'EAnalysis.

Conçu à l'origine pour des présentations d'exemples musicaux lors de cours ou de conférences (EDiMu), il s'est avéré que ce logiciel pouvait être d'une grande utilité pour l'analyse musicale (iAnalyse). Il s'est donc vu progressivement ajouter des fonctions (figure 2.6) liées à des pratiques analytiques comme les graphiques ou les outils d'analyse. De même, l'annotation de la partition afin de mettre en évidence les éléments analysés pouvait aussi être utilisée durant le processus d'analyse. Cette simple opération d'illustration se transformait alors en processus d'analyse à travers la réalisation de modélisations graphiques de la forme, des structures ou des relations entre différents éléments

32. COUPRIE, Pierre, « La place de l'informatique et du multimédia dans l'analyse des musiques électroacoustiques », in R. Barbanti, E. Lynch, C. Pardo, M. Solomos (éd.) *Musique, arts, technologies, pour une approche critique*, Paris, L'Harmattan, 2004, p. 361-374 ; COUPRIE, « L'écoute et les technologies numériques », *op. cit.*

de la partition³³. C'est à ce moment que le développement d'iAnalyse a commencé à croiser nos travaux sur la représentation analytique.

La bascule en 2008 de Realbasic³⁴ vers l'objective-c nous a permis d'améliorer les fonctions du logiciel et ses performances. Ce changement a nécessité l'apprentissage d'un nouveau langage et d'un environnement de programmation professionnel : Xcode³⁵. C'est aussi cet environnement qui a été choisi pour le développement d'EAnalysis. L'objective-c et Xcode impose un développement compatible uniquement avec les systèmes Macintosh ; avant d'être acceptée, cette contrainte a fait l'objet d'une réflexion approfondie. Nous avons alors réalisé qu'il nous fallait choisir entre trois options :

1. choisir un langage de développement multiplateforme – comme par exemple Qt³⁶ et le langage C++ – en réalisant des cycles de développement longs. En effet, le développement multiplateforme impose de travailler avec des systèmes fortement fragmentés ;
2. utiliser un environnement conçu pour l'informatique musicale comme Max permettant de créer des applications multiplateformes, mais qui présentait alors de nombreuses limites sur le plan graphique ;
3. choisir un langage et une plateforme peu fragmentée (Macintosh) et dont les cycles de développement peuvent être bien plus courts car ils s'appuient sur un ensemble de *frameworks* facilitant l'écriture du code.

Le choix de la troisième option nous a permis d'expérimenter de nombreuses fonctions que nous n'aurions probablement pas réussi à implémenter dans un logiciel multiplateforme. De plus, nous avons pris conscience qu'iAnalyse et EAnalysis étaient à considérer comme des outils personnels de recherche mis à la disposition d'autres utilisateurs, l'objectif n'étant pas de développer un logiciel commercial avec toutes les contraintes de plateformes et de stabilité que cela demande.

2.2.1.2 EAnalysis

En octobre 2010, le projet de recherche *New Multimedia Tools for Electroacoustic Music Analysis* a commencé avec Simon Emmerson, Leigh Landy et Mike Gatt au *Music, Technology and Innovation Research Centre* de l'université De Montfort de Leicester. Ce projet a duré trois années et répondait à trois objectifs principaux :

1. étudier la musique électroacoustique à travers l'analyse d'œuvres et l'évaluation de méthodes d'analyse ;
2. développer un logiciel pour l'analyse de la musique électroacoustique ;
3. créer une plateforme en ligne afin de fédérer une communauté de musicologues et publier des analyses musicales.

33. COUPRIE, Pierre, « iAnalyse : un logiciel d'aide à l'analyse musicale », in *Journées d'Informatique Musicale*, GMEA, Albi, 2008, p. 115-121 ; COUPRIE, Pierre, « Utilisations avancées du logiciel iAnalyse pour l'analyse musicale », in *Journées d'Informatique Musicale*, Rennes, Université de Rennes 2, 2010, p. 113-118.

34. Le langage orienté objet de Realbasic a été élaboré autour d'un mélange de BASIC et de langage C.

35. Xcode est l'environnement de développement proposé par la société Apple pour la réalisation des applications compatibles avec les systèmes Mac OS et IOS.

36. Qt est un environnement de développement multiplateforme : <http://qt-project.org>

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

Versions	Nouvelles fonctions
EDiMu	<p>Lecture Diapositives Curseurs (avec outil de synchronisation rapide) Curseur automatique (sur l'ensemble de la diapositive) Annotations avec une bibliothèque Marqueurs temporels Exportation en image et vidéo</p>
iAnalyse 1	<p>Forme d'onde Importation du média depuis iTunes Importation des images depuis iPhoto Édition : alignements des annotations Calques d'annotations Fonctions musicales (structure, thèmes, tonalités et modes, accords, degrés, typomorphologie, UST, sérielle, <i>set-theory</i>, divers) Graphiques (courbe de tempo, courbe de propriétés, structure, diagramme formel, tonalité par cycle de quintes, vue synoptique) Rapports de durées sur la ligne temporelle Affichage en plein écran Moteur de recherche Exportation en texte</p>
iAnalyse 2	<p>Sonagramme Importation des partitions en PDF Annotations multimédia Fonctions musicales (degrés harmoniques, degrés mélodiques, cadences, vecteur harmonique, montage, objet-fonctions, plan de film) Navigateur Export des données en XML</p>
iAnalyse 3	<p>Transfert des fonctions musicales en annotations avancées Nouveaux outils d'analyse (convertisseur, échelles et modes, <i>set-theory</i>, carte) Incrustation dans les diapositives (vidéo, plan formel) Recadrage des diapositives Masques d'annotations Enregistrement de <i>snapshots</i></p>
iAnalyse 4	<p>Les structures deviennent autonomes Le sonagramme est transféré dans la ligne temporelle Modes (normal, texte, dessin) Groupes de calques Animation d'annotations Texte temporel Panneau d'outils (navigateur, texte temporel, signets) Importation de données externes en format texte Graphiques à partir de données externes dans la ligne temporelle</p>

FIGURE 2.6 – Les principales fonctions des différentes versions d'iAnalyse.

Notre implication dans ce projet s'est faite à plusieurs niveaux :

1. un référencement et une analyse systématique des logiciels utilisés en analyse musicale et plus particulièrement dans le domaine des musiques non écrites. Nous avons déjà commencé à réaliser cette évaluation d'une manière informelle lors du développement d'un premier prototype d'iAnalyse adapté à l'étude de la musique électroacoustique³⁷ ;
2. un référencement des méthodes d'analyse et de représentation dont l'implémentation informatique était possible. Cette partie avait été largement couverte par nos travaux de recherches (figure 1.1 page 11), il ne s'agissait donc que d'évaluer la transposition informatique de ces méthodes ;
3. le développement du logiciel EAnalysis et la production de l'ensemble des éléments permettant de l'utiliser : exemples de réalisations, documentation et tutoriel vidéo.

Comme le montre la figure 2.5 page 58, le développement d'iAnalyse et d'EAnalysis a été un peu complexe à gérer. Nous avons dû mettre en pause celui d'iAnalyse pendant deux années afin de mener à bien le projet EAnalysis. Depuis 2013, le développement d'iAnalyse a repris progressivement sans toutefois faire l'objet de nouvelles fonctions. Durant l'année 2014, nous avons décidé d'arrêter le développement d'iAnalyse afin de nous concentrer sur les futures évolutions d'EAnalysis, et ce même si le projet *New Multimedia Tools for Electroacoustic Music Analysis* était alors terminé. Le tableau de la figure 2.7 rend compte du cycle de développement des différentes versions publiques d'EAnalysis. Les double lignes horizontales marquent les changements majeurs : le passage à la version 1.0 et la profonde refonte des vues lors de la version 1.1. Ce tableau permet aussi de mesurer la complexité du développement d'EAnalysis. En effet, si l'architecture choisie au début du développement s'est révélé parfaitement adaptée, la refonte majeure du fonctionnement des vues lors de la version 1.1., l'ajout puis l'abandon de l'OSC, l'apparition de liens avec certains logiciels (Audiosculpt, l'Acousmographe, SuperVP, plugin LibXtract) montrent qu'il existe des fonctions non anticipées et ajoutées, voire testées, au fur et à mesure du développement.

Dans certains cas, l'expérimentation et l'ajout de certaines fonctions ont nécessité le développement d'applications spécifiques :

1. importation des projet XML de l'Acousmographe ;
2. importation graphique de la fonction Timbre Scope de l'Acousmographe (fonction non ajoutée) ;
3. création de graphique de corrélation hiérarchique ;
4. expérimentation sur l'usage de filtres graphiques pour la réalisation de plusieurs types de sonagrammes (différences et similarités), seul le sonagramme différentiel a été retenu ;
5. déformation logarithmique de l'image du sonagramme ;
6. importation et exportation des formats OMF et AAF (fonction non ajoutée) ;
7. importation des informations de session Pro Tools ;
8. rotation des vues à 90° (fonction non ajoutée) ;
9. expérimentation sur la coloration du sonagramme en pseudo-couleurs (figure 2.8) ;
10. assistant d'analyse musicale (fonction non ajoutée).

37. COUPRIE, Pierre, « Analyser la musique électroacoustique avec le logiciel iAnalyse », *Electronic Music Studies Network*, Paris, Université Paris-Sorbonne, 2008, <http://www.ems-network.org/ems08/papers/couprrie.pdf>

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

Versions	Nouvelles fonctions
0.4.2	Extensions : objet sonore et fonctions
0.4.4	Moteur de recherche
0.4.5	Compatibilité 64 bits Modèles (<i>templates</i>) pour la création de nouveaux projets
0.4.7	Nouvelle annotation structure
0.4.8	Modes : éditer, texte, dessin
0.4.9	Export en texte, XML et images
0.5.0	Modification de l'architecture des vues Mode dessin : enregistrement de la pression du stylet d'une tablette Vue image
0.6.0	Importation de plusieurs fichiers audiovisuels Exportation sans les fichiers audiovisuels
0.6.2	Importation de données depuis d'autres logiciels en format texte ou CSV Vue données Vue sonagrammes (superposition de sonagrammes)
0.6.3	Copier-coller les marqueurs depuis Audiosculpt
0.6.4	Liste de lecture (<i>playlist</i>)
0.7.0	Vue en carte (<i>chart view</i>)
0.8.0	Nombreuses modifications du <i>design</i> des fenêtres Modification des formats de plusieurs fichiers enregistrés par le logiciel Vue vidéo Aperçu <i>quicklook</i>
0.8.1	Importation de texte formaté en <i>coll list</i> depuis Max et Open Music OSC (fonction ensuite supprimée)
0.8.3	Sonagramme logarithmique
0.8.4	Export en CSV et JSON
0.9.4	Importation des projets Acousmographe en XML
0.9.5	Mode lecture
1.0.3	Suppression de la fonction OSC Vue structure : linéaire, diagramme formel, matrice de similarité, diagramme en arcs
1.0.5	Extension <i>form-building</i> (Thoresen) Vues : données (simple), données en nuage de points, BStD, sonagramme différentiel
1.1.0	Nouvelle architecture des vues Lien avec le plugin LibXtract afin de calculer les descripteurs audio Lien avec SuperVP afin de calculer des filtres à partir des annotations Matrice de similarité à partir des données et de l'image du sonagramme

FIGURE 2.7 – Les principales nouvelles fonctions des différentes mises à jour publiques d'EAnalysis.

Concevoir et développer un logiciel dans son ensemble n'est pas chose aisée. Le projet *New Multimedia Tools for Electroacoustic Music Analysis* a été une formidable expérience : il est important que les musicologues soient intégrés dans les différentes étapes du développement de leurs outils. De-

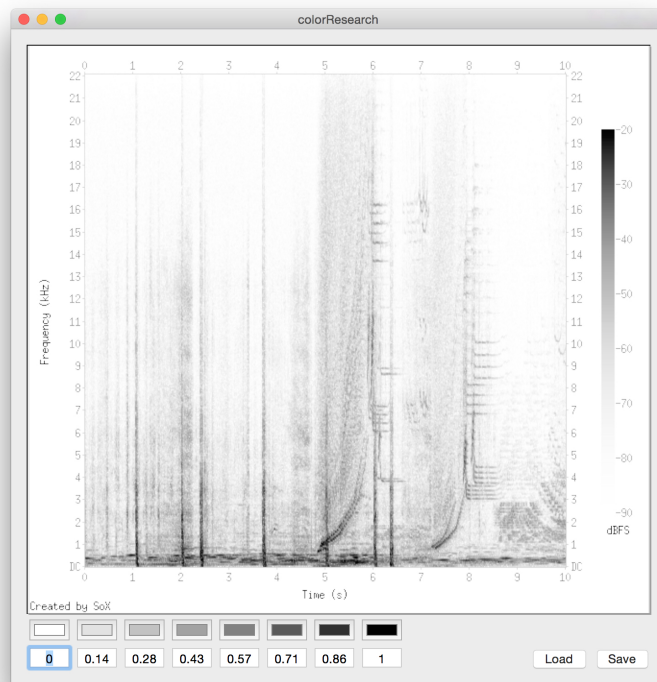


FIGURE 2.8 – L’interface de l’outil permettant d’expérimenter les gammes de couleurs sur le spectre et les matrices de similarité.

puis le démarrage d’EAnalysis, le projet TACEM³⁸ a débuté à l’université d’Huddersfield. Ce projet, comme le nôtre, réunit des musicologues dont certains sont aussi des développeurs. Il semble que cette configuration d’équipe de recherche permette d’obtenir d’excellents résultats pour le développement d’outils d’aide à l’analyse musicale.

2.2.2 Les concepts à la base d’EAnalysis

Les concepts principaux à la source du cahier des charge d’EAnalysis sont au nombre de trois :

1. concevoir un véritable outil pour l’analyse musicale et pas seulement un simple lecteur audiovisuel ou un logiciel de dessin. Ce concept inclut l’exploration de nouvelles formes de représentations ;
2. déconnecter l’étape d’analyse de l’étape de représentation afin de permettre la création de plusieurs représentations à partir d’une seule analyse ;
3. faciliter l’importation et l’exportation des données d’analyse afin de concevoir un véritable espace de travail pour l’analyste.

Chacun de ces trois objectifs a été mené à bien même si le résultat final diffère légèrement des idées originales. Nous n’allons pas détailler précisément chaque fonction du logiciel, nous l’avons

³⁸. Le projet TACEM a pour objectif d’évaluer l’impact de la technologie dans les processus de création de la musique électroacoustique : <http://www.hud.ac.uk/research/researchcentres/tacem/>.

déjà réalisé dans deux publications³⁹. Nous allons plutôt analyser chacun de ces trois concepts et présenter leur réalisation dans le développement.

2.2.2.1 Concevoir un outil pour l'analyse musicale

L'étude des actions mise en œuvre lors de l'analyse et de la représentation de la musique électro-acoustique nous a permis de dégager un ensemble de fonctions rarement présentes dans les logiciels mais couramment utilisées en analyse musicale :

1. faciliter l'écoute et la comparaison de plusieurs fragments de la même œuvre ou d'œuvres différentes ;
2. annoter avec des commentaires textuels synchronisés durant l'écoute ;
3. annoter un sonagramme avec des dessins à main libre durant l'écoute ;
4. visualiser plusieurs représentations juxtaposées avec des niveaux de grossissement différents ;
5. transformer des positions temporelles simples en annotations graphiques ou en textes.

Ces différentes actions sont caractéristiques de l'usage de documents audiovisuels en analyse musicale. La figure 2.9 représente la chaîne des actions réalisées sur un document audiovisuel. Ces actions se résument en réalité à une boucle (écoute → annotation → choix d'un ou plusieurs fragments ↔) dans laquelle l'analyste manipule des échelles de temps différentes. Il n'est pas rare d'avoir à basculer la lecture d'un fragment de l'œuvre à l'autre afin de les comparer ou de les mettre en relation à l'aide d'une annotation. De même, la comparaison entre plusieurs œuvres nécessite de pouvoir naviguer dans plusieurs fichiers audiovisuels avec différentes échelles temporelles et d'enchaîner la lecture de ces fragments. La partie annotation utilise différents types de graphiques allant des marqueurs ne possédant qu'une date temporelle à des annotations graphiques possédant une durée et des propriétés graphiques complexes. Il doit être possible de gérer l'ensemble de ces réglages indépendamment et de permettre le passage d'un type d'annotation à l'autre sans perte des propriétés. En effet, il est courant de faire une première série d'annotations sous la forme de marqueurs temporels pour ensuite préciser les propriétés des unités sonores qui leur correspondent avec des propriétés graphiques plus élaborées ou avec des textes. Les sept étapes du protocole⁴⁰ de Geslin et Sprenger-Ohana utilisent le même positionnement des annotations pour représenter des niveaux de plus en plus symboliques. Toutefois, ces étapes, annotées sur des calques différents, n'ont aucun lien entre elles et nécessitent un nouveau travail d'annotation alors que ce sont des pratiques courantes en transcription. Utiliser les mêmes annotations ou les mêmes propriétés pour générer plusieurs types de transcriptions nous a donc semblé être une des idées importantes pour la transcription morphologique.

Pour chacune de ces actions, nous avons trouvé un ensemble de solutions permettant de passer outre les limitations des logiciels actuels. EAnalysis offre la possibilité de juxtaposer des représentations – par exemple de la forme d'onde ou du sonagramme – de positions temporelles différentes dans la même œuvre ou d'œuvres différentes. Chaque représentation est contenue dans une vue⁴¹ indépendante, l'échelle temporelle de chacune des représentations peut ainsi être contrôlée d'une manière

39. COUPRIE, Pierre, « EAnalysis : aide à l'analyse de la musique électroacoustique », in *Journées d'Informatique Musicale*, Mons, Numediart, 2012, p. 183-189 ; COUPRIE, Pierre, « Représentations analytiques avancées avec EAnalysis », in *Journées d'informatique musicale*, Montréal, Université de Montréal, 2015, http://jim2015.oicrm.org/actes/JIM15_Couprrie_P.pdf

40. GESLIN, SPRENGER-OHANA, *op. cit.*

41. La notion de vue correspond au patron MVC (modèle-vue-contrôleur) utilisé en programmation orientée objet. Chaque élément de l'interface est une vue. Dans le cas présent, chaque représentation est dessinée dans une vue qui possède son propre modèle (code manipulant les données) et son propre contrôleur gérant le lien entre le modèle et la vue.

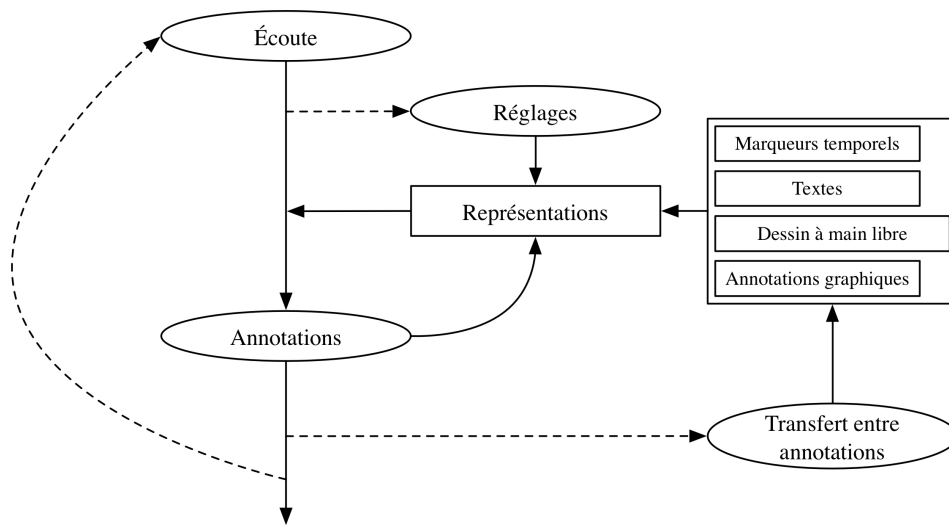


FIGURE 2.9 – Utilisation de la transcription en analyse musicale.

autonome. En offrant la possibilité de désynchroniser la lecture des différentes vues, nous permettons de résoudre cette difficulté d'une manière très simple (figure 2.10).

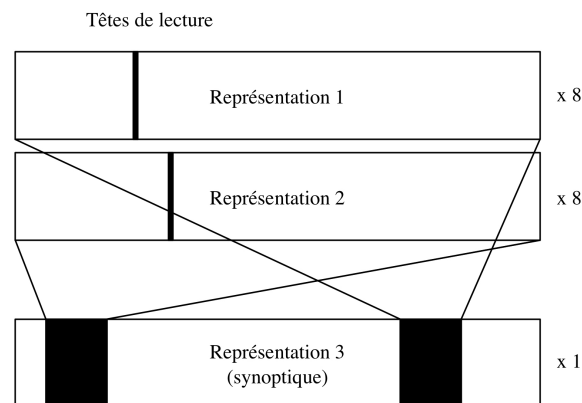


FIGURE 2.10 – Fonctionnement de la désynchronisation de la lecture des vues.

2.2.2.2 Déconnecter l'étape d'analyse de l'étape de représentation

La transformation d'un type d'annotation en un autre type (figure 2.9), par exemple le passage d'un marqueur à une annotation graphique par ajout d'une date temporelle de fin, n'a pas été complètement résolue dans EAnalysis. La solution proposée a été de déconnecter les données d'analyse des données de dessin par l'usage d'une feuille de style. Ainsi, le logiciel propose d'utiliser des annotations simples (rectangle neutre avec ou sans texte) associées à un modèle paire attribut-valeur⁴². Les attributs correspondent à des paramètres analytiques qui peuvent prendre des valeurs différentes.

42. Le modèle paire attribut-valeur (*attribute-value pair*) est utilisé en informatique pour enregistrer des données dans une structure qui peut évoluer sans avoir à modifier les données déjà enregistrées.

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

Il est ensuite possible de connecter la valeur de ces paramètres à des propriétés graphiques (figure 2.16 page 73). Ce système répond à un besoin souvent formulé lors de la création de représentations analytiques : pouvoir basculer d'un type de représentation à un autre sans avoir à modifier l'ensemble de la représentation. Chaque annotation a ainsi deux types de propriétés (graphiques et analytiques), les propriétés analytiques pouvant influencer sur les propriétés graphiques à l'aide d'une feuille de style.

Nous n'avons malheureusement pas exploité cette idée jusqu'au bout. Ainsi, les marqueurs restent différents des annotations, de même un dispositif de feuille de style plus complexe aurait permis de gérer le lien entre le texte et les propriétés graphiques. Il aurait été aussi très intéressant de permettre le fonctionnement de la feuille de style dans les deux sens, ouvrant ainsi l'usage de la représentation à des allers-retours entre propriétés analytiques et propriétés graphiques sans perdre le contenu de chacune d'entre elles. Ces limitations ne sont bien évidemment que temporaires et un des objets de notre projet de recherche sera de les résoudre.

2.2.2.3 L'usage de technologies externes

Le projet *New Multimedia Tools for Electroacoustic Music Analysis* étant limité à trois années, il nous a fallu faire des choix drastiques dans la liste des fonctions à intégrer. Nous nous sommes bien évidemment appuyé sur iAnalyse afin de construire sur une base existante solide. Ainsi, le lecteur audiovisuel et le moteur graphique d'EAnalysis sont directement issus de ceux développés pour iAnalyse. De même, le système de représentation en carte permettant de produire différents types de tableaux (typologique, paradigmatique, génératif, etc.) provient d'une extension d'iAnalyse qui n'a finalement pas été intégrée dans la version actuelle. Toutefois, des solutions concernant des fonctions assez complexes à programmer restaient à trouver. Nous avons alors décidé de lier EAnalysis à des logiciels intégrés ou externes (figure 2.11). Deux types de technologies ont été utilisés :

1. les logiciels en ligne de commande présents dans le *bundle*⁴³. Ces logiciels n'ont pas été intégrés dans le code, afin de réduire le temps de développement et la maintenance du code. Ils sont au nombre de deux :
 - a. SoX⁴⁴ est un logiciel permettant de réaliser de nombreuses opérations de conversion, d'extraction de données et de transformation sur les fichiers audio. Il est ainsi capable de générer un sonagramme linéaire en niveau de gris de grande qualité sous la forme d'images. Le développement d'une telle fonction dans EAnalysis nous aurait demandé beaucoup de temps et aurait limité notre expérimentation de fonctions musicologiques ;
 - b. intégré plus tardivement, le logiciel Vamp Simple Host permet de communiquer très facilement avec les plugins Vamp⁴⁵. Nous avons utilisé cette technologie afin de permettre le calcul de descripteurs audio à l'aide du plugin LibXtract⁴⁶ ;
2. les logiciels en ligne de commande extérieurs à EAnalysis. Dans la version actuelle, seul SuperVP⁴⁷ a été utilisé de cette manière. Cette technologie est développée par l'Ircam et est

43. Les applications sous Mac OSX ayant une interface graphique sont en réalité un répertoire (un *bundle*) contenant l'ensemble des ressources (application(s), *frameworks*, extensions, éléments d'interface, modèles de fichier, etc.) permettant de les faire fonctionner.

44. Sound eXchange (SoX) : <http://sox.sourceforge.net>

45. Ce format de plugin est utilisé dans l'analyse sonore afin d'extraire différents types d'informations (descripteurs audio, valeurs moyennes diverses) ou de générer des représentations spécifiques.

46. Le plugin Vamp LibXtract, développé par Chris Cannam et Jamie Bullock, permet de calculer une quarantaine de descripteurs audio.

47. Super Vocoder de Phase (SuperVP) : <http://forumnet.ircam.fr/fr/product/supervp-pour-max/>

disponible sous la forme d'un outil en ligne de commande ou intégré dans plusieurs logiciels comme Audiosculpt. Avec cette fonction, le musicologue peut ainsi associer n'importe quelle annotation à une modification de gain⁴⁸, EAnalysis se chargeant de communiquer avec SuperVP afin d'appliquer ces modifications, de calculer un nouveau fichier audio et de l'intégrer dans le projet.

Logiciels	Intégrés	Fonctions
SOX (<i>Sound eXchange</i>)	Oui	Calcul du sonagramme
Vamp Simple Host	Oui	Communication avec les plugins Vamp
LibXtract		Calcul des descripteurs audio
SuperVP		Calcul des filtres

FIGURE 2.11 – Utilisation de logiciels intégrés ou externes.

Ces différentes technologies ont pour objectif de faciliter le travail de l'utilisateur en étant transparentes ou en offrant une interface d'édition dans EAnalysis. De plus, elles ont permis un gain de temps non négligeable dans le développement du logiciel.

2.2.2.4 La gestion de fichiers différents

Une des limites les plus importantes d'iAnalyse s'est avérée être la gestion de fichiers audiovisuels différents. Le développement d'un autre logiciel capable de gérer l'ensemble des fichiers nécessaire à une analyse musicale a alors été envisagé. Le projet *New Multimedia Tools for Electroacoustic Music Analysis* ayant alors commencé, nous avons dû mettre en sommeil cette idée. Toutefois, nous avons veillé à ne pas limiter le nombre de fichiers audiovisuels dans EAnalysis, il est aussi devenu évident qu'il fallait utiliser le même principe pour l'ensemble des types de fichiers. C'est ainsi qu'EAnalysis fonctionne à la fois comme un logiciel de représentation analytique et comme un espace de travail permettant de regrouper des fichiers générés par d'autres logiciels.

Comme nous l'avons présenté dans la partie 1.3.2, les fichiers utilisés en analyse musicale sont souvent de différents formats et les logiciels n'en gèrent qu'un nombre limité. Le développement d'EAnalysis a donc nécessité une étude des flux de travaux en analyse musicale et des logiciels employés par les compositeurs et les musicologues. De cette étude, nous avons listé un ensemble de fichiers types avec les usages qui leur sont associés ainsi que les problèmes d'échange ou d'importation/exportation qui en découlent. Ces problèmes peuvent être de divers ordres : incompatibilités, difficultés d'utilisation des fichiers propriétaires, gestion ou non du temps dans le contenu des données, etc. De plus, le développement d'un outil qui serait capable de gérer l'ensemble des formats fichiers était bien évidemment impossible, nous avons donc dû faire des choix en fonction des besoins exprimés lors des séminaires, ateliers et réunions organisés par l'université De Montfort dans le cadre du projet de recherche. L'interface d'importation et d'exportation d'EAnalysis reflète les résultats de ce travail en proposant la gestion de trois catégories de fichiers :

1. les **fichiers audiovisuels** : EAnalysis gère les fichiers présentant une piste vidéo et permet l'importation de plusieurs fichiers audiovisuels dont la piste audio est monophonique ou stéréophonique. Il est ainsi possible de travailler sur des œuvres multipistes en important les fichiers

48. Ces modifications ne peuvent prendre que deux formes différentes sur le tracé du spectre : polygones (dont les rectangles) et dessin à main libre.

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

de chaque piste ou sur des œuvres audiovisuelles. L'importation de plusieurs fichiers permet en outre de réaliser des analyses comparatives sur plusieurs versions d'une même œuvre ou sur des œuvres différentes ;

2. les **fichiers textes** sont gérés dans plusieurs formats : TXT, CSV, XML et JSON. Suivant leur format, ils sont présents en importation et/ou en exportation. Certains types de données sont aussi disponibles à l'aide d'un simple copier-coller : les marqueurs et les descripteurs audio réalisés avec le logiciel Audiosculpt. Plusieurs types de données peuvent ainsi être travaillés :
 - a. marqueurs temporels : date temporelle + label ;
 - b. données numériques (décimal) sans valeurs temporelles : les valeurs sont ensuite alignées sur l'ensemble de la durée du projet ;
 - c. données numériques (décimal) : date temporelle + valeur en décimal ;
3. il existe aussi un certain nombre de **fichiers spécifiques** utilisés par des logiciels de création ou d'analyse : information de session du logiciel Pro Tools⁴⁹ et exportation XML provenant du logiciel Acousmographe.

Après plusieurs mois d'utilisation du logiciel, la gestion de ces différents formats de fichiers s'est révélé très riche sur le plan analytique. Nous avons dû développer des modes de représentation supplémentaire permettant de lire des données toujours plus variées.

2.2.3 L'architecture du logiciel

Après avoir détaillé les concepts clés du logiciel, il convient maintenant de présenter son architecture et la manière dont elle a été élaborée à partir d'une analyse précise des processus mis en jeu lors d'une analyse musicale.

2.2.3.1 Des processus d'analyse musicale à l'architecture du logiciel

Comme nous l'avons remarqué dans le chapitre précédent, l'analyse d'œuvres électroacoustiques, c'est-à-dire d'œuvres utilisant la technologie dans leur processus de composition et durant leurs performances, nécessite l'usage de technologies spécifiques. Les supports mêmes de l'œuvre, qu'ils soient analogiques ou numériques, requièrent des outils pour les lire, les décoder et les analyser. L'absence de visuels pour une partie ou l'ensemble de l'œuvre nécessite aussi la création de représentations. De plus, la nature même du matériau utilisé dans ces œuvres – un matériau complexe et donc difficile à décrire et à analyser – demande bien souvent de faire appel à des techniques d'analyse issues d'autres domaines scientifiques comme l'acoustique musicale. Il est donc indispensable d'avoir une véritable boîte à outils pour analyser les œuvres électroacoustiques. Dans la partie 1.4.1, nous avons listé les outils habituellement utilisés pour la réalisation de transcriptions. Nous avons mis en évidence les limites des rares logiciels développés pour l'analyse musicale ou de ceux adaptés au domaine de la création. Tout comme le projet TIAALS, EAnalysis est né de besoins spécifiques à la musicologie, son architecture reflète donc l'état des recherches en analyse musicale. Toutefois, le

49. L'importation des informations de session des fichiers Pro Tools permet de récupérer les positions de chacun des clips sur la ligne temporelle et dans les différentes voies de mixage. L'analyste peut ainsi s'appuyer sur une transcription directement issue du travail du compositeur pour réaliser sa représentation analytique. Cet usage nous a été directement inspiré de la transcription que nous avons réalisée en 2000 sur *M.É.* de Philippe Leroux.

logiciel est aussi un laboratoire expérimental pour nos propres recherches. Nous avons donc dû concilier l'intégration de fonctions couramment utilisées en analyse musicale à la possibilité d'ajouter des fonctions répondant à des besoins futurs mais non encore connus. L'élaboration de l'architecture a été réalisée en trois étapes. Lors de la première étape, nous avons développé plusieurs maquettes non fonctionnelles de l'interface présentant les fonctions connues et les moyens d'ajouter de nouvelles fonctions. La difficulté a été de créer des zones d'ouvertures dans chaque partie du logiciel afin de faciliter la création de nouvelles fonctions. De ces maquettes, nous avons déduit une architecture qui a servi au développement du logiciel. Cette deuxième étape a permis l'élaboration de la première version d'EAnalysis. Enfin, environ six mois après la fin du projet, nous avons modifié l'architecture afin de regrouper certaines parties, ce qui nous a permis de simplifier le code et d'ajouter de nouvelles fonctions. L'architecture présentée ci-dessous est donc celle qui correspond à cette dernière étape.

La figure 2.12 représente le schéma général de l'architecture d'EAnalysis. Cette architecture est somme toute assez classique, elle est organisée autour d'un ensemble de classes (modèles) faisant le lien entre le projet créé par l'utilisateur (données) et l'interface utilisateur (interface graphique). Une partie des calculs est déportée dans des applications en ligne de commande internes ou externes au logiciel. Enfin, un système d'extensions a été ajouté afin de permettre aux utilisateurs de partager des annotations graphiques et analytiques. Ce système nous permet aussi de modifier les annotations analytiques ou d'en ajouter de nouvelles sans avoir à modifier le code du logiciel ⁵⁰.

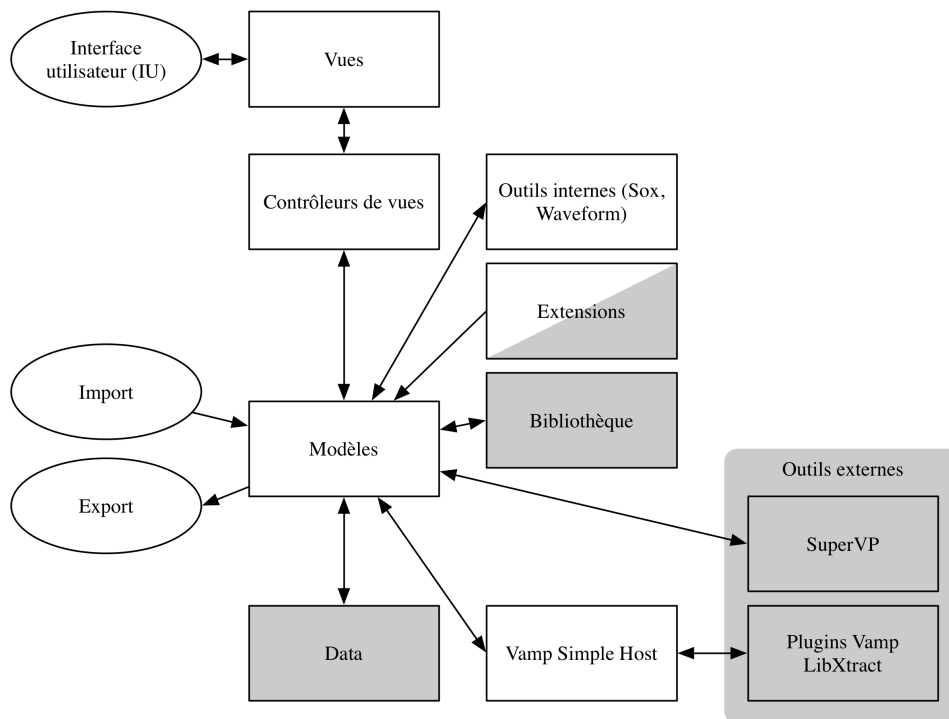


FIGURE 2.12 – Architecture générale du logiciel (les ressources et logiciels externes apparaissent sur un fond gris).

La figure 2.13 présente l'architecture des classes mises en jeu lors du dessin d'une annotation graphique de type rectangle sur un sonagramme. L'ensemble se présente comme un jeu de construction dans lequel chaque pièce peut être activée ou non (règle temporelle, tête de lecture, nom de la

50. Les annotations proposées par défaut sont intégrées dans des extensions internes au logiciel, les annotations échangées entre les utilisateurs sont ajoutées au dossier *Library > Application Support > EAnalysis* du système.

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

piste audiovisuelle associée à la vue, etc.) ou peut être remplacée par une autre pièce (par exemple, dessin d'une ellipse au lieu d'un rectangle). De plus, certaines classes sont contenues les unes dans les autres (la classe *rectangle* est un surclassement de la classe *shapes*). Ce principe de construction habituel en programmation orientée objet nous a permis d'élaborer une architecture ouverte. L'ajout d'un nouveau type d'annotation graphique ou d'une nouvelle vue est ainsi facilité. Cette construction du code s'accorde parfaitement avec notre projet de réalisation d'un logiciel expérimental.

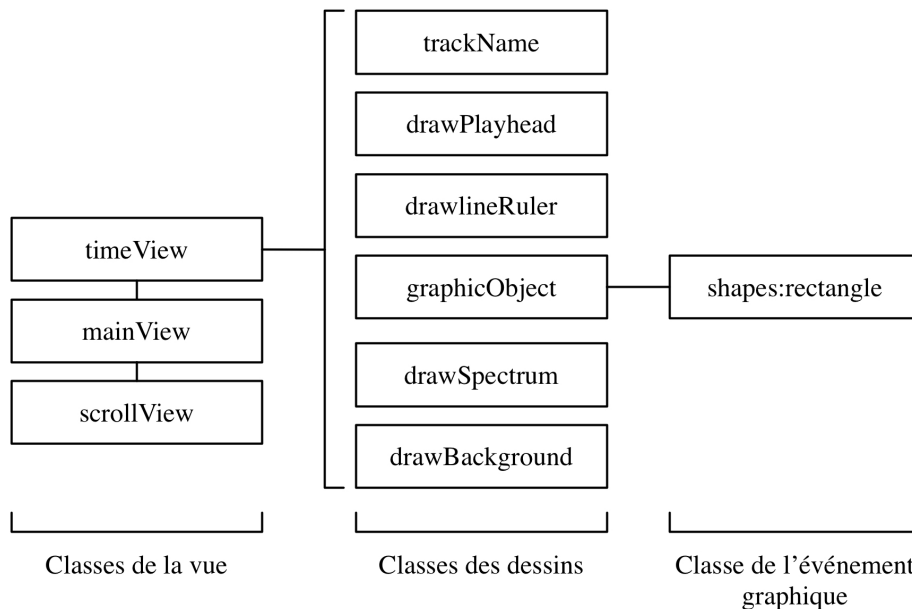


FIGURE 2.13 – Exemple des classes mises en œuvre lors du dessin d'une annotation de type rectangle sur un sonogramme.

Un de nos objectifs en analyse musicale, l'exploration de nouvelles formes de représentations, a guidé l'élaboration de l'architecture afin de créer un logiciel parfaitement adapté aux besoins musico-logiques.

2.2.3.2 Les différentes catégories de vues

Les vues sont des espaces graphiques en deux dimensions dans lesquels sont réalisées les représentations. Certaines vues représentent le temps sur l'axe horizontal, d'autres n'ont pas obligatoirement d'axe dédié au temps. EAnalysis contient deux catégories principales de vues : les vues sur lesquelles l'utilisateur peut ajouter des marqueurs temporels et des annotations graphiques, et les autres types de vues. La première catégorie est réservée aux différents usages de la transcription et aux représentations acoustiques du son. La seconde catégorie contient différents types de vues qui servent à l'affichage du média (vidéo) ou à la réalisation de graphiques particuliers (tableaux, cartes, structure, diaporama). L'usage de marqueurs et d'annotations est impossible dans les vues de cette seconde catégorie. Chaque vue superpose différentes couches dans lesquelles sont dessinés les éléments graphiques, l'ordre des couches étant déterminé en fonction des usages en analyse musicale.

La première catégorie de vues contient six couches (figure 2.14) réparties en trois plans⁵¹ :

1. l'arrière-plan regroupe les visuels qui sont utilisés en fond de représentation : couleur, sonagrammes (sonagramme linéaire ou logarithmique, superposition de sonagrammes, sonagramme différentiel, matrice de similarité), forme d'onde et image. Ces différents éléments offrent de nombreuses possibilités allant de l'usage simple du sonagramme à l'importation d'autres représentations acoustiques sous la forme d'images, en passant par l'intégration de transcriptions déjà réalisées dans d'autres logiciels. De plus, l'interface permet de basculer facilement d'un arrière-plan à un autre, facilitant ainsi l'exploration analytique des œuvres ;
2. le plan graphique permet de réaliser des graphiques à partir de données diverses, comme les descripteurs audio, et d'ajouter des marqueurs et des annotations sur ces graphiques ou sur l'arrière-plan. Comme l'arrière-plan, le plan graphique offre de nombreuses possibilités de transcriptions allant de la mise en évidence de singularités dans les graphiques de données à la réalisation de transcriptions morphologiques complexes. Il contient aussi les deux têtes de lecture : la tête principale, utilisée dans tous les graphiques, et la tête secondaire (horizontale), utilisée dans les matrices de similarité. D'autres têtes de lecture sont aussi intégrées à la couche de graphiques de données et utilisées lors de la réalisation de graphiques en nuage de points ;
3. le premier plan contient les éléments graphiques d'habillage de la représentation. Ceux-ci facilitent la navigation dans les fichiers audiovisuels ainsi que la réalisation d'exemples graphiques à des fins de présentation ou de publication.

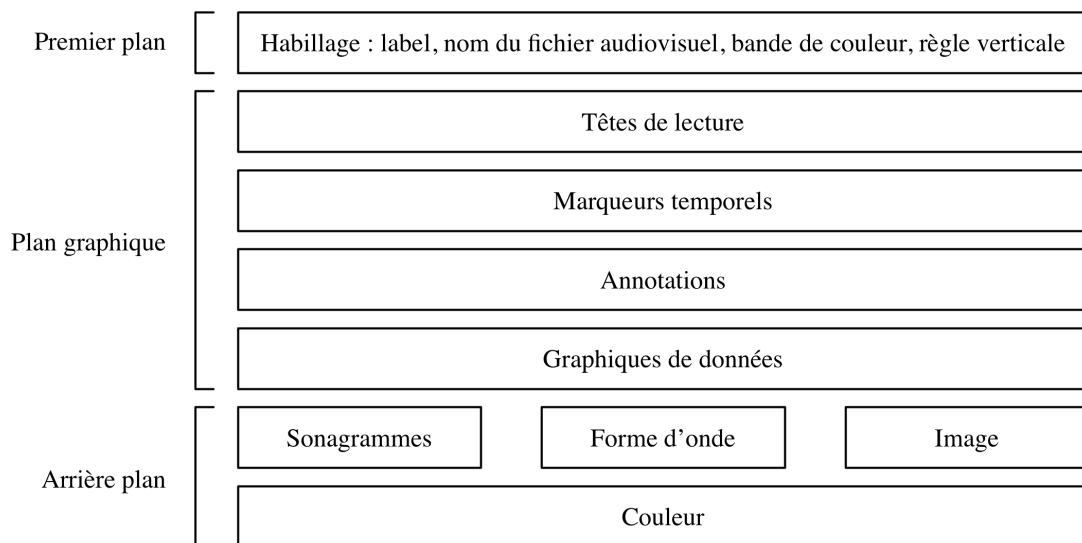


FIGURE 2.14 – Les différentes couches de la première catégorie de vues.

La seconde catégorie regroupe des vues très différentes les unes des autres dans lesquelles il est impossible d'ajouter des marqueurs ou des annotations. La figure 2.15 présente les quatre types de vues de cette catégorie :

1. la vue **image** permet de réaliser des diaporamas synchronisés avec les fichiers audiovisuels. Cette fonction est utile pour l'analyse de paysages sonores associant le son et l'image ou l'affichage de partition pour l'analyse de la musique mixte ;

51. Ces trois plans n'ont aucune existence dans le code, ils ne sont utilisés que pour cette présentation.

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

2. la vue **vidéo** affiche simplement la piste vidéo des fichiers audiovisuels ainsi qu'un aperçu sous la forme de vignettes ;
3. la vue **carte** permet d'extraire des fragments de fichiers audio afin de réaliser tous types de tableau ou de cartes tels qu'ils sont utilisés en typologie, analyse paradigmatique ou syntagmatique, analyse génétique, etc. Chaque fragment affiche une représentation du son (sonagramme ou forme d'onde), une tête de lecture et un label ;
4. la vue **structure** permet de réaliser des représentations à partir d'une segmentation linéaire : graphique linéaire, diagramme formel, diagramme en arc afin de mettre en évidence les patterns, matrice de similarité calculée sur les labels de chacun des segments. Comme pour les vues de la première catégorie, cette vue présente le temps sur l'axe horizontal.

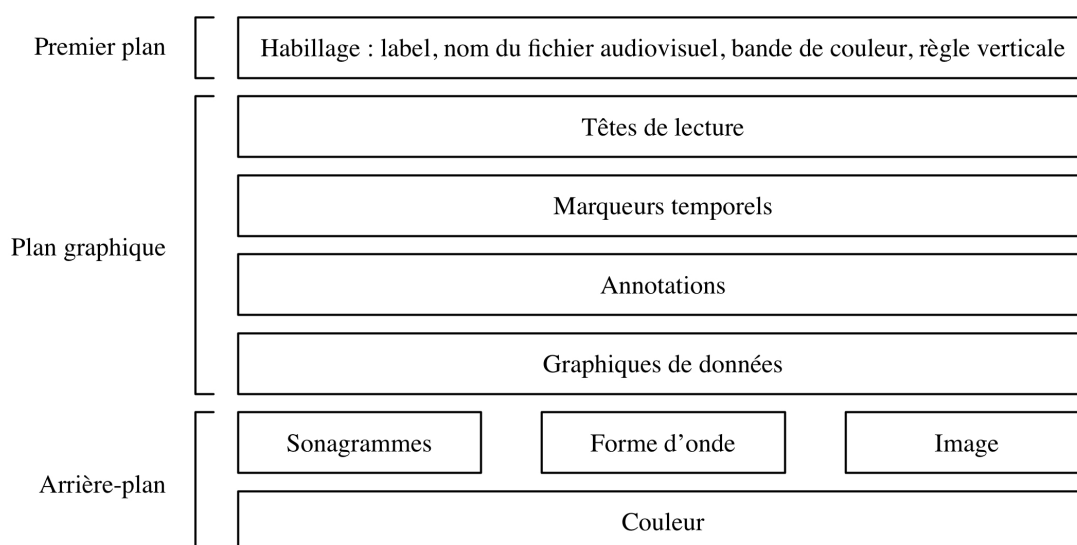


FIGURE 2.15 – Les différentes couches de la seconde catégorie de vues.

L'architecture des vues a été élaborée à partir de l'étude de transcriptions graphiques, de méthodes d'analyse musicale et d'une réflexion sur les logiciels existants. De cette étude, nous avons déduit un ensemble de pratiques pour développer progressivement l'architecture des vues. L'étude des logiciels actuels et de leurs limites nous a permis d'améliorer les flux de travaux et de développer un outil numérique parfaitement adapté à l'analyse musicale.

2.2.3.3 Les annotations

Les annotations⁵² d'EAnalysis sont une première étape vers un dispositif de transcription adapté à l'analyse musicale. Cette étape nous a permis de créer un lien plus fort entre l'analyse musicale et la représentation. Jusqu'ici reléguées à de simples formes graphiques dans des transcriptions morphologiques, les annotations peuvent devenir un véritable outil d'analyse. EAnalysis réalise en partie ce

⁵². Les annotations d'EAnalysis se nomment en anglais des *events*. En français, nous préférons utiliser le terme d'annotation, correspondant mieux à l'usage qui en est fait.

projet en ajoutant des propriétés analytiques aux annotations. Chaque annotation possède trois types de propriétés (figure 2.16) :

1. les propriétés générales contiennent les informations de positionnement et de taille de la forme graphique sur une vue standard ;
2. les propriétés graphiques contiennent toutes les caractéristiques visuelles des annotations ;
3. les propriétés analytiques sont une liste de paires attribut-valeur (mots-clés et valeurs) permettant de caractériser l'élément analytique représenté par l'annotation. Cet élément analytique peut être une morphologie au sens schaefferien, une fonction musicale ou simplement une caractéristique musicale de l'état du flux sonore. L'utilisateur peut créer des propriétés analytiques utiliser celles que contient déjà le logiciel :
 - a. propriétés typomorphologiques des objets sonores (Schaeffer) ;
 - b. propriétés des événements sonores (Schafer) ;
 - c. grille de langage (Emmerson) ;
 - d. quelques propriétés spectromorphologiques (Smalley) ;
 - e. types d'images-de-sons (Bayle) ;
 - f. critères d'opposition (Cogan) ;
 - g. figures d'espace (Vande Gorne) ;
 - h. fonctions musicales (Roy) ;
 - i. types d'unités sémiotiques temporelles ;
 - j. morphologie ADSR ;
 - k. types d'émotions ;
 - l. positions dans l'espace ;
 - m. types d'effets ;
 - n. positions et types de plans vidéo.

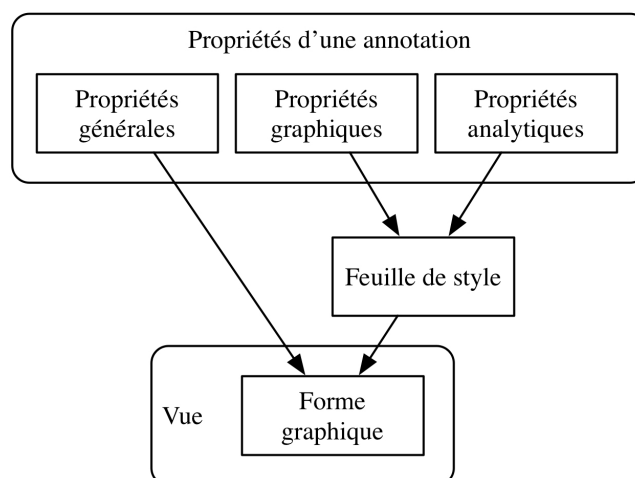


FIGURE 2.16 – Fonctionnement des annotations et leurs dessins à l'aide de la feuille de style.

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

De cet ensemble de propriétés découle la forme graphique qui sera dessinée sur la vue. Comme indiqué dans la figure 2.16, une feuille de style vient s'intercaler entre les propriétés de l'annotation et sa réalisation graphique. Cette feuille de style se présente sous la forme d'une liste de règles non limitées permettant de modifier une propriété graphique ou de transformer une propriété analytique en propriété graphique. Bien évidemment, les règles de cette feuille de style peuvent s'appliquer à l'ensemble des annotations d'une vue ou à un groupe d'annotations. De même, il est possible d'utiliser une feuille de style vide, ce qui lie directement les propriétés graphiques à la forme dessinée.

Nous avons décrit ce principe de fonctionnement adapté à iAnalyse lors d'une conférence en 2008⁵³. Il offre plusieurs avantages :

1. l'utilisateur peut réaliser une représentation sans se soucier du graphisme en transcrivant les caractéristiques analytiques des annotations à l'aide de simple formes rectangulaires ;
2. il est possible de modifier l'ensemble d'une représentation afin de mettre en évidence une caractéristique musicale particulière ;
3. la juxtaposition de plusieurs vues présentant les mêmes annotations avec des angles analytiques différents est alors possible ;
4. la correction d'une erreur de représentation est facilitée.

Le développement des annotations représente une importante amélioration des logiciels existants.

2.2.3.4 La représentation des structures

Durant le développement d'EAnalysis, il s'est avéré que la représentation des structures nécessitait un outil spécifique. L'analyse musicale produit des tableaux proportionnels figurant des formes musicales ou des diagrammes représentant des structures. Avec iAnalyse, nous avons déjà expérimenté la réalisation de ce type de graphique de structures sur plusieurs niveaux ou de diagramme formel. Sonic Visualiser est le logiciel qui propose une visualisation de la forme la plus simple et efficace que nous ayons étudiée. Les fragments de l'œuvre segmentée sont définis par leur seule date de début, la date de fin correspondant à la date de début du segment suivant. Chaque segment contient un label et une couleur. C'est ce dispositif que nous avons adopté pour EAnalysis. Mais nous l'avons amélioré afin de rendre l'outil plus souple et surtout de proposer des représentations différentes de la même segmentation. Nous avons ainsi créé quatre types de représentations des structures (figures de l'annexe E page 113) :

1. la **structure linéaire** (au milieu de la figure E.1) fonctionne comme dans le logiciel Sonic Visualiser : la segmentation est représentée par une succession de fragments. Chaque fragment peut contenir un label et une couleur. Les couleurs peuvent être générées localement ou globalement. Lorsqu'elles le sont localement, les segments prennent la couleur que l'utilisateur a choisie. Lorsqu'elles le sont globalement, la couleur peut prendre différentes valeurs :
 - a. alternance de deux couleurs permettant de rendre la segmentation plus lisible ;
 - b. couleurs en fonction de la durée du segment afin de mettre en évidence leurs relations de durées ;
 - c. couleurs en fonction du label afin de mettre en évidence les relations syntaxiques ;

53. COUPRIE, « Analyser la musique électroacoustique avec le logiciel iAnalyse », *op. cit.*

2. le **diagramme formel**⁵⁴ (en haut de la figure E.1) est construit en fonction du label et de l'ordre d'apparition des segments. Les options de couleurs fonctionnent de la même manière que pour la structure linéaire ;
3. le **diagramme en arc** (figure E.2) ne représente pas la structure mais les relations de patterns calculées sur les labels. Ainsi, deux suites de segments identiques seront reliées par un arc graphique. Afin d'éviter de dessiner des arcs inutiles et risquer de rendre la représentation illisible, nous avons appliqué les recherches de Martin Wattenberg sur la visualisation des structures⁵⁵. Les couleurs des arcs sont déterminées automatiquement ;
4. dans la **matrice de similarité** (figure E.3), la distance est calculée sur les labels : les lettres sont comparées en fonction de leur index dans le label. Une seule couleur est utilisée et la distance est représentée par la transparence.

La segmentation peut aussi être importée et plusieurs niveaux de segmentation peuvent être édités. Toutefois, pour des raisons de facilité d'édition et de visualisation, les vues ne peuvent représenter qu'un seul niveau, il faut donc juxtaposer plusieurs vues pour représenter plusieurs niveaux en même temps.

2.2.3.5 Les représentations spectrales

Les tracés du spectre sont une base importante des transcriptions utilisées dans l'analyse de la musique électroacoustique. Avec EAnalysis, notre objectif a été de rendre accessibles au musicologue certains tracés jusqu'ici peu utilisés. Étant d'un usage commun, nous ne présentons pas les sonagrammes calculés à partir d'une FFT sur une échelle linéaire ou logarithmique des fréquences (C.1 de l'annexe C page 105). Nous avons ajouté à EAnalysis trois autres types de représentations du spectre : la superposition de sonagrammes, le sonagramme différentiel et la matrice de similarité.

Dans l'analyse interactive auditive de *Wind Chimes* de Denis Smalley⁵⁶, Michael Clarke propose d'explorer le spectre à l'aide d'un sonagramme stéréophonique, les deux canaux étant dessinés avec deux couleurs différentes (vert et rouge). Nous avons adapté cette technique afin de proposer une **superposition de sonagrammes** (figure C.2 de l'annexe C) dans EAnalysis. Le logiciel dessine chaque sonagramme sur des couches différentes avec une couleur et une transparence. Notre interface ne limite pas le nombre de sonagrammes et peut ainsi permettre la superposition de tracés spectraux provenant des différents canaux d'une pièce multipiste. Ce type de tracé spectral permet de visualiser sur une seule représentation le positionnement et les mouvements des sons entre les différents canaux. La représentation est bien évidemment sûr efficace lorsque les canaux sont bien différenciés sur le plan spectral.

L'usage du **sonagramme différentiel** (figure C.3 de l'annexe C) en analyse musicale a été mis en évidence par Chouvel, Bresson et Agon⁵⁷ sur une étude de l'interprétation. Le sonagramme différentiel ne révèle que les modifications spectrales. Sa réalisation dans EAnalysis est effectuée à l'aide d'un filtre graphique : le logiciel superpose deux occurrences du même sonagramme en niveau de gris en en décalant une sur l'axe horizontal (temps) et en appliquant un filtre de différence. L'image

54. CHOUVEL, Jean-Marc, *Analyse musicale. Sémiologie et cognition des formes temporelles*, Paris, L'Harmattan, 2006, p. 51-62.

55. WATTENBERG, Martin, « Arc Diagrams: Visualizing Structure in Strings », in *IEEE Symposium on Information Visualization (INFOVIS)*, Boston, IEEE, 2002, p. 110-116.

56. CLARKE, Michael, « *Wind Chimes: An Interactive Aural Analysis* », in *Portrait polychrome Denis Smalley*, Paris, INA-GRM, 2010, p. 35-57.

57. CHOUVEL, BRESSON, AGON, *op. cit.*

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

résultante apparaît en blanc sur fond noir. Ce type de sonagramme se révèle très efficace pour étudier deux aspects particuliers du spectre. Le premier aspect concerne les microvariations des sons perçus comme stables ou des sons harmoniques tenus. Les sons parfaitement stables disparaissent dans le sonagramme différentiel et les sons légèrement instables sont mis en évidence. Le second aspect porte sur la répartition des différents types d'attaques : elles apparaissent sous la forme de lignes verticales plus ou moins inclinées suivant leur type. Elles peuvent être analysées avec une différenciation assez fine sur des fragments de 0'30 à 2'00 et sous la forme d'opposition (attaque abrupte/molle) sur les œuvres entières.

La **matrice de similarité** (figure C.4 de l'annexe C) est calculée à partir de l'image du spectre⁵⁸. Elle permet de mettre en évidence les similarités entre les valeurs, elle ne représente donc pas les valeurs elles-mêmes. La matrice de similarité du sonagramme est réalisée en quatre étapes (figure 2.17⁵⁹) :

1. échantillonnage (redimensionnement) de l'image du spectre en niveau de gris en suivant les paramètres d'unité temporelle et de bande de fréquences. La durée du fichier audiovisuel divisée par l'unité temporelle indique la largeur de l'image résultante. La hauteur de l'image est indiquée par le nombre de bandes de fréquences ;
2. l'image est ensuite traduite en matrice, chaque pixel devenant une valeur décimale entre 0,0 et 1,0 décrivant la valeur de niveau de gris ;
3. une matrice de similarité est alors calculée en distance euclidienne ;
4. le résultat de la matrice est traduit en niveau de gris puis coloré en pseudo-couleurs.

Ces différentes formes de tracé spectral peuvent aussi être complétées par des représentations réalisées avec d'autres logiciels et importées sous la forme d'images dans EAnalysis.

2.2.3.6 Les représentations à partir de données

L'utilisation et l'interprétation de données diverses soulèvent généralement plusieurs difficultés. L'une des plus importantes est la réalisation de représentations adaptées à l'analyse musicale. Représenter une suite de valeurs provenant de descripteurs audio sous la forme de graphiques simples n'est pas toujours la technique la plus efficace pour étudier les morphologies, les singularités, les similarités ou les corrélations qui caractérisent les valeurs. Ainsi, une courbe de corrélation entre deux descripteurs ne mettra pas forcément en évidence leur relation dans une perspective musicale. Il faudra généralement l'expérimenter sur plusieurs niveaux hiérarchiques. De plus, les données se présentent souvent avec un échantillonnage des valeurs et des unités de mesure différentes. Ainsi, des descripteurs de mêmes catégories extraits d'un même fichier audio avec les mêmes paramètres n'auront pas forcément le même échantillonnage des valeurs. Ces différences augmentent avec l'usage de logiciels différents pour l'extraction des données. Notre objectif a donc été de résoudre ces difficultés et de faciliter l'usage de certaines données, comme dans le cas des descripteurs audio.

EAnalysis propose sept types de représentations de données (figure 2.18). Si certaines représentations se ressemblent, elles sont toutes adaptées à des usages différents. L'ensemble offre ainsi de nombreuses possibilités de représentations statiques ou dynamiques. Ce dernier aspect a été peu exploré en analyse musicale et nécessitera des développements particuliers dans les projets futurs.

Afin de faciliter les calculs, EAnalysis réalise au préalable deux opérations. Six des sept types de représentations sont réalisés à partir de plusieurs séries de données, les calculs doivent pouvoir être

58. Elle n'est donc pas calculée directement à partir des données de la FFT.

59. COUPRIE, « Représentations analytiques avancées avec EAnalysis », *op. cit.*

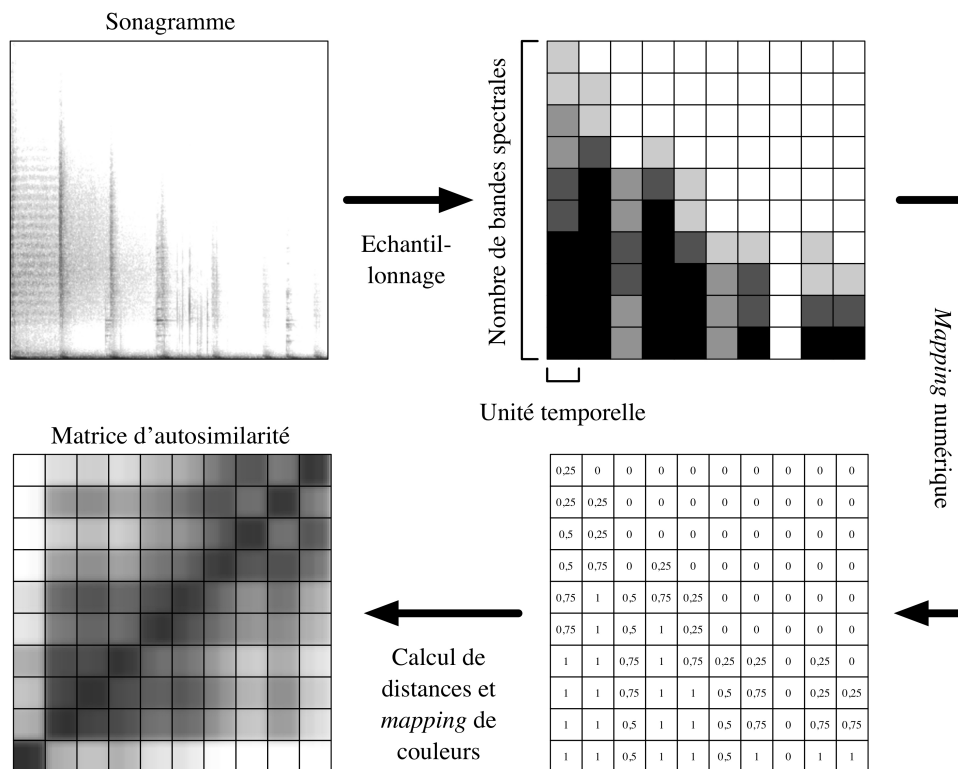


FIGURE 2.17 – Le principe du calcul de la matrice de similarité à partir de l’image du tracé spectral.

effectués sur des séries dont les valeurs sont alignées sur le plan temporel. Nous avons donc introduit un paramètre d’unité temporelle qui détermine l’échantillonnage des valeurs. Cet échantillonnage influe sur la précision de la représentation⁶⁰. Pour certains types (corrélation et matrice), cet échantillonnage influe aussi sur le temps de calcul. Ainsi, une unité temporelle réduite permettra d’obtenir un graphique plus précis, mais pourra occasionner un temps de calcul important. L’échantillonnage temporel est ensuite complété par une conversion des valeurs alignant la plus petite sur 0,0 et la plus grande sur 1,0. Cette conversion facilite ensuite les calculs nécessaires à certaines représentations et permet d’obtenir des graphiques dont le contraste des valeurs est optimal. Ces deux opérations sont réalisées d’une manière transparente pour l’utilisateur.

Les graphiques simples, multiples et complexes

Les graphiques simples et multiples (figure D.1 de l’annexe D page 109) offrent différentes possibilités d’affichage d’une ou plusieurs séries de valeurs. Le graphique complexe suit les propositions de Mikhail Malt et d’Emmanuel Jourdan afin de créer une représentation de trois descripteurs en une seule courbe⁶¹ (graphique du haut de la figure D.2 de l’annexe D). Les auteurs utilisent la BStD afin de créer une représentation de l’évolution du timbre à l’aide du barycentre spectral, de la variance spectrale et d’un descripteur supplémentaire comme l’intensité ou l’inharmonicité. Toutefois, ce type de courbe peut être adapté et utilisé avec d’autres séries de données. Dans le cas de l’analyse de la

⁶⁰. L’échantillonnage est réalisé en regroupant les valeurs par intervalles temporels pour ensuite en calculer la moyenne. C’est cette valeur moyenne pour chaque intervalle temporel de l’échantillonnage qui entre ensuite dans le calcul de la représentation.

⁶¹. MALT, JOURDAN, *op. cit.*

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

Type	Dynamique	Description
Simple		Une série de données en courbe ou en dégradé de couleurs
Multiple		Plusieurs séries de données en courbe superposées ou juxtaposées
Complexe		Une courbe à partir de trois séries de données (X, épaisseur, dégradé de couleurs)
Nuage de points	Oui	Un ou plusieurs graphiques en nuage de points, chaque graphique pouvant représenter cinq valeurs (X, Y, taille, couleur, opacité)
Corrélation hiérarchique		Corrélation de deux séries de données sur tous les niveaux hiérarchiques
Matrice de similarité		Comparaison de deux séries de données
Matrice d'autosimilarité		Une ou plusieurs séries de données

FIGURE 2.18 – Les sept types de représentations de données d'EAnalysis.

musique électroacoustique, nous l'avons expérimenté⁶² avec le *spectral rolloff*, l'inharmonicité et le *loudness*.

Les nuages de points

Les représentations en nuage de points sont très utilisées en mathématiques afin de mettre en évidence des regroupements de valeurs non contiguës. Nous nous sommes inspiré du logiciel de création CataRT développé par Diemo Schwarz afin de manipuler des fragments audio en synthèse concaténative⁶³. Après avoir utilisé ce logiciel pour créer des représentations de descripteurs lors de conférences, nous avons décidé de l'intégrer dans EAnalysis en l'adaptant à une utilisation musicologique (graphique du bas de la figure D.2 de l'annexe D). La représentation ainsi obtenue offre plusieurs possibilités :

1. créer un graphique à partir de plusieurs descripteurs d'une manière diachronique. Nous obtenons des cartes dans lesquelles des zones ou des lignes se dégagent. L'interprétation des valeurs est alors réalisée sur l'ensemble de l'œuvre ;
2. créer plusieurs graphiques en différenciant les données provenant de canaux différents ou d'œuvres différentes. Avec EAnalysis, les graphiques peuvent être superposés ou juxtaposés afin de faciliter la comparaison des valeurs ;
3. explorer le matériau correspondant aux points du graphique par un simple clic de souris. L'utilisateur peut aussi sélectionner une zone et visualiser la répartition temporelle des valeurs de chaque point sur un sonagramme ;
4. créer des graphiques dynamiques en choisissant un empan temporel et un positionnement de la tête de lecture sur cet empan. EAnalysis peut ainsi montrer les valeurs correspondant aux sons qui viennent d'être lus ou qui seront lus avec un réglage fin de la fenêtre temporelle.

62. COUPRIE, « Voyage dans "Grandeur nature", première partie de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle », *op. cit.*

63. SCHWARZ, Diemo, BELLER, Grégory, VERBRUGGHE, Bruno, BRITTON, Sam, « Real-Time Corpus-Based Concatenative Synthesis with CataRT », in *9th Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06)*, Montréal, DAFx, 2006, p. 279-282.

La corrélation hiérarchique

L'utilisation de courbes de corrélation dans le domaine de l'analyse musicale pose une difficulté d'échelle. Le calcul de la corrélation s'effectue à partir de deux séries de valeurs, les valeurs sont regroupées par deux ou plus afin de créer des échantillons sur lesquels est appliqué un algorithme de corrélation. Le musicologue doit estimer la taille des échantillons à corrélérer et réaliser généralement plusieurs essais en créant des échantillons de différentes tailles. Le projet de recherche Mazurka (CHARM⁶⁴) portant sur l'analyse de l'interprétation d'œuvres de Chopin a développé une représentation hiérarchique de la corrélation⁶⁵ s'appuyant sur le coefficient de corrélation de Pearson ou PPMC (*Pearson Product Moment Correlation*). La figure 2.19 décrit le principe : les valeurs sont tout d'abord regroupées par deux, puis par trois, quatre, etc., un calcul de corrélation est effectué à chaque regroupement. Le résultat obtenu varie entre +1 (corrélation complète) et -1 (corrélation inverse), le 0 représentant une absence de corrélation. La matrice résultante est alors transformée en représentation à l'aide d'un *mapping* de couleurs.

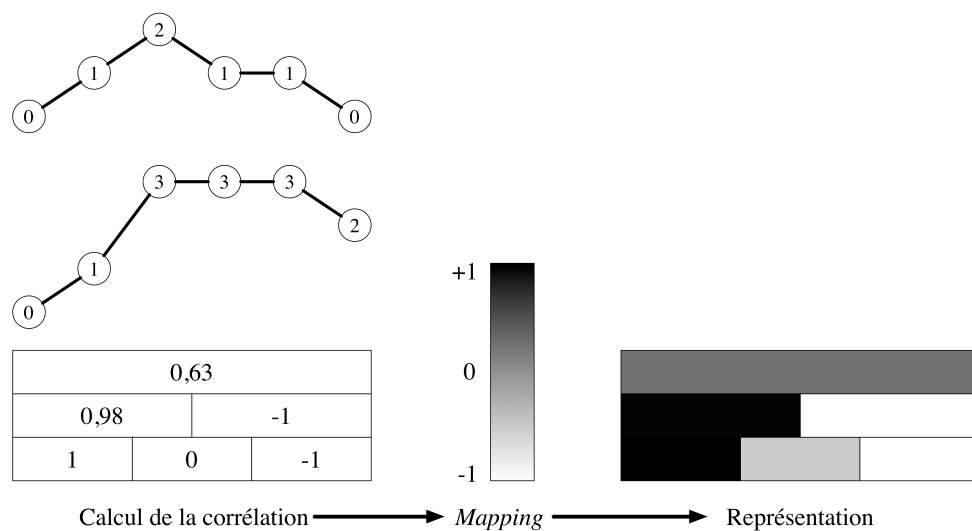


FIGURE 2.19 – Principe de réalisation de la représentation hiérarchique de la corrélation.

La représentation de la corrélation hiérarchique d'EAnalysis suit ce principe (figure D.5 de l'annexe D).

Les matrices de similarité

Les deux matrices de similarité sont assez souples pour s'adapter à différents calculs. Le calcul d'une matrice de similarité est réalisé en trois étapes (figure 2.20) :

1. le calcul de la distance entre les valeurs des deux listes. Si la matrice est calculée en autosimilarité, le calcul de distance est effectué entre les valeurs de la même liste. Il est aussi possible de calculer une matrice d'autosimilarité avec plusieurs listes, dans ce cas, les valeurs sont regroupées en matrices et la similarité des valeurs est calculée en distance euclidienne ;

64. http://www.charm.rhul.ac.uk/analysing/p9_4.html

65. (Collectif), *Hierarchical Correlation Plots*, Londres, King's College, 2009, <http://www.mazurka.org.uk/ana/timescape/>

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

2. la *mapping* des valeurs de distance vers des valeurs de couleurs (niveaux de gris), l'interprétation de matrices numériques étant humainement impossible ;
3. une troisième étape optionnelle consiste à colorer la matrice résultante en pseudo-couleurs à l'aide d'un filtre graphique.

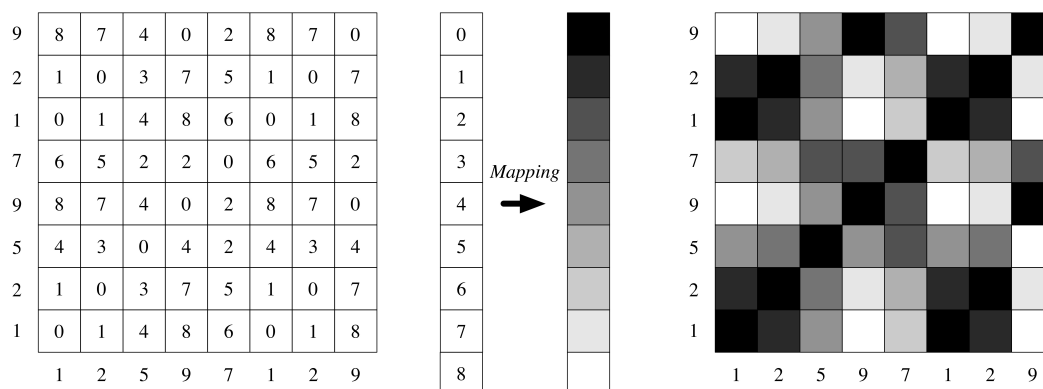


FIGURE 2.20 – Principe de réalisation d'une matrice de similarité entre deux listes différentes.

La première matrice (figures D.3 de l'annexe D) permet de rechercher les similarités en comparant deux séries de données. Les séries proviennent alors de la même œuvre ou d'œuvres différentes. Dans ce dernier cas, il n'y a pas d'alignement des valeurs, l'ajout d'un algorithme de déformation temporelle dynamique⁶⁶ sera nécessaire dans une évolution future. La seconde matrice (figure D.4 de l'annexe D) calcule l'autosimilarité d'une ou plusieurs séries de données.

La coloration des matrices de similarité suit le même principe que celui employé pour le tracé spectral, les modèles de pseudo-couleurs sont donc identiques. Cet aspect semble trivial, mais l'usage de filtre de couleurs sur des matrices en niveaux de gris permet d'obtenir des représentations plus facilement interprétables pour l'analyse musicale. Deux opérations s'offrent au musicologue :

1. le renforcement des fortes similarités par l'utilisation d'une échelle de couleurs décalée vers les valeurs élevées ;
2. l'opération inverse afin de mettre en évidence l'absence de similarité de certaines zones, leur caractère unique.

2.2.4 Bilan et perspectives

Le développement d'EAnalysis répond aux constats théoriques et technologiques décrits dans le premier chapitre. Afin de résoudre certaines limites liées aux flux de travaux en analyse musicale, EAnalysis a été conçu comme un espace de travail permettant de lier différents logiciels et d'offrir de nouvelles possibilités à l'analyste :

1. l'importation et l'exportation des principaux types de fichiers utilisés en analyse musicale ;
2. la prise en charge de fichiers audiovisuels, ouvrant ainsi la voie à l'analyse de performances, d'interprétations ou de musiques associées aux arts visuels ;

66. L'algorithme de déformation temporelle dynamique (DTW ou *Dynamic Time Warping*) permet d'aligner temporellement deux séries de valeurs en mesurant leur similarité.

3. la manipulation simple de données comme les descripteurs audio, étape jusqu'ici difficile à réaliser ;
4. l'enrichissement de la transcription morphologique par de nouvelles formes de représentations du tracé spectral ou des données extraites du signal audio ;
5. la composition de graphiques proposant chacun leur point de vue et augmentant ainsi les possibilités de représentations des paramètres acoustiques et musicaux.

EAnalysis ne doit pas être vu comme un concurrent de l'Acousmographe. En effet, si un des principaux objectifs était de pallier certaines limites de ce logiciel et d'ouvrir la transcription à de nouveaux modes de représentations, EAnalysis et l'Acousmographe doivent avant tout être présentés comme complémentaires. Morrison met d'ailleurs en évidence cette complémentarité sur le plan des usages⁶⁷ à travers l'analyse d'une œuvre caractéristique du répertoire électroacoustique, *M.É.* de Philippe Leroux.

Toutefois, EAnalysis n'est qu'une première étape dans notre travail de recherche. Les résultats obtenus et le succès du logiciel sont très encourageants. La figure 2.21 montre les statistiques de téléchargement d'iAnalyse et d'EAnalysis⁶⁸. Si iAnalyse reste un modèle avec plus de 50 000 téléchargements, toutes versions confondues, EAnalysis a fait une belle percée dans le milieu musicologique, des représentations commencent à apparaître dans les plateformes de partage vidéo et les publications scientifiques, et plus de 1 370 personnes se sont enregistrées.

Nous avons relevé les parties du développement qui nécessitent encore des améliorations⁶⁹ :

1. l'ajout de nouveaux descripteurs qui demandent diverses expérimentations, comme celui de *novelty*⁷⁰ à associer avec les matrices de similarité ou ceux de MFCCs (*Mel-Frequency Cepstrum Coefficients*), nécessitant une visualisation par bandes de fréquences ;
2. la déformation temporelle dynamique ou *Dynamic Time Warping* (DTW) permet d'aligner deux listes de valeurs à l'aide d'un algorithme de similarité. L'usage de la DTW améliorerait deux fonctions d'EAnalysis :
 - a. elle permettrait d'aligner automatiquement deux fichiers audio en fonction de leur forme d'onde lors de la lecture, comme le fait le logiciel Sonic Visualiser. Il serait ainsi possible d'imaginer des fonctions de lecture avancées ;
 - b. l'usage d'une matrice de similarité pour comparer deux versions d'une même œuvre a déjà été expérimenté par Zattra et Orïo⁷¹. L'usage de la DTW permettrait d'obtenir une matrice optimisée dont les deux séries de valeurs seraient alignées ;
3. les fonctions de transformation des matrices de similarité : similarité cosinus ou transformation exponentielle ;

67. MORRISON, Landon, « Graphical Music Representations: A Comparative Study Based on the Aural Analysis of Philippe Leroux's *M.É.* », in *Electroacoustic Music Studies Network*, Berlin, Universität der Künste, 2014, http://www.ems-network.org/IMG/pdf_EMS14_morrison.pdf

68. Pour l'année 2015, le graphique prend en compte la période allant du 1^{er} janvier au 8 août.

69. COUPRIE, « Représentations analytiques avancées avec EAnalysis », *op. cit.* ; COUPRIE, « Le développement d'un outil d'aide à l'analyse musicale : bilan et perspectives musicologiques », *op. cit.*

70. COOPER, Matthew L., FOOTE, Jonathan, « Media Segmentation using Self-Similarity Decomposition », in *Electronic Imaging*, Bellingham, SPIE Press, 2003, p. 167-175 ; LARTILLOT, Olivier, CEREGHETTI, Donato, ELIARD, Kim, GRANDJEAN, Didier, « A Simple, High-Yield Method for Assessing Structural Novelty », in *International Conference on Music Emotion*, Finlande, Université de Jyväskylä, 2013, p. 1-9.

71. ZATTRA, Laura, ORIO, Nicola, « ACAME - Analyse Comparative Automatique de la musique électroacoustique », *Musimédiane*, n° 4, 2006, <http://www.musimediane.com/numero4/LZattra/index.html>

2.2. Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis

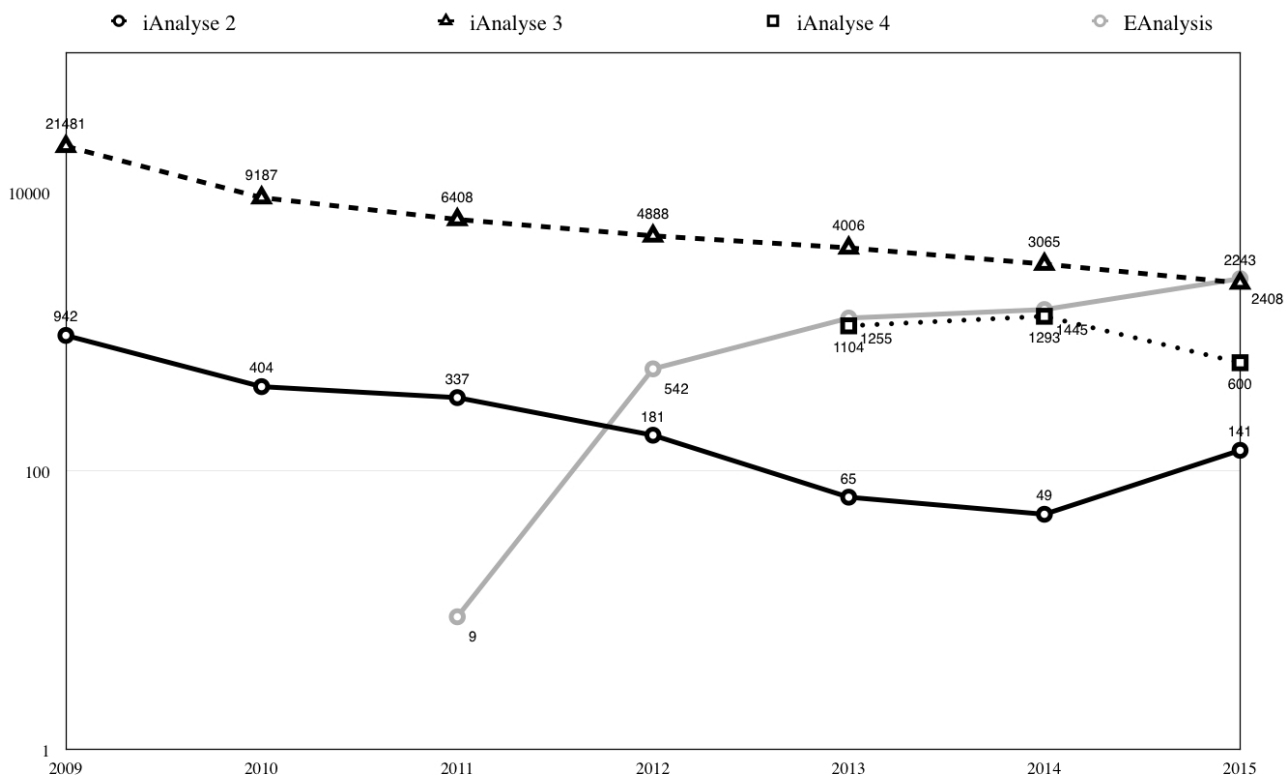


FIGURE 2.21 – Les statistiques de téléchargement d'iAnalyse et EAnalysis. L'axe Y est logarithmique afin de permettre une bonne visualisation de toutes les valeurs.

- la représentation des structures dans EAnalysis obéit aux standards de la transcription morphologique : une ligne temporelle sur laquelle sont alignés des segments sur plusieurs niveaux. Nous avons déjà évoqué l'inadéquation entre cette conception de la forme musicale et de la création musicale actuelle (section 1.3.6). Notre projet de recherche sera l'occasion d'élargir les possibilités en matière de représentation de la forme et des structures ;
- le travail d'exploration de nouvelles formes de représentations initiées avec EAnalysis nécessitera d'être poursuivi afin d'intégrer des représentations spécifiques pour certains types de données qui ne sont pas encore prises en charge par le logiciel, comme les données textuelles ou hiérarchisées.

Le choix de l'environnement de programmation Xcode et du langage objective-c nous a permis d'explorer des fonctions que nous n'avions pas anticipées lors du démarrage du projet. Toutefois, l'amélioration des fonctions actuelles et le passage dans un environnement multiplateforme s'avèrent très délicats et nécessiteraient d'imaginer un projet de recherche réunissant plusieurs développeurs et des financements importants. De plus, le maintien d'iAnalyse et d'EAnalysis se révèle impossible. EAnalysis a toujours été conçu comme un laboratoire d'expérimentation, transférer le travail dans un environnement ne posera pas réellement de problème. Comme tout logiciel, celui-ci n'est pas indépendant des usages auxquels il répond ou pour lesquels il propose des fonctions numériques. Les objectifs qui y sont liés ont été parfaitement remplis. Mais le travail d'observation des utilisateurs a aussi confirmé l'aspect espace de travail ou l'aspect logiciel modulaire dans lequel il est facile d'ajouter de nouvelles formes de représentations ou de nouveaux groupes d'annotations graphiques et/ou analytiques. Un logiciel dépasse souvent les fonctions qu'il est censé remplir. L'usage d'EAnalysis

s'est ainsi développé pour des corpus pour lesquels il n'avait pas été conçu : l'ensemble des musiques non notées. Même si nous avons envisagé un usage en ethnomusicologie, le logiciel nous paraissait bien pauvre par rapport à ceux qui sont généralement utilisés (comme PRAAT). En effet, EAnalysis est peu adapté à l'étude des sons à hauteur déterminée. Toutefois, les fonctions avancées d'annotations, la possibilité de travailler sur des fichiers audiovisuels ou les diverses formes de représentations des descripteurs audio comblent une absence chez ses concurrents.

2.3 Conclusion

Parallèlement à l'aspect technologique, EAnalysis nous a ouvert une voie très prometteuse dans le domaine de la musicologie. La première partie de ce chapitre nous a permis de mettre en évidence la pertinence du modèle de la représentation analytique qui s'exerce dans deux directions. La première concerne l'ouverture de l'analyse musicale vers deux domaines de l'acoustique : la représentation spectrale et l'extraction de descripteurs audio. Cette voie est ancienne pour l'acoustique mais réellement nouvelle pour la musicologie. Avec EAnalysis, nous avons cherché à combler le fossé existant entre le développement de ces méthodes de visualisation et d'extraction d'informations et l'usage que l'on peut en faire en analyse musicale. La seconde direction est plus épistémologique, elle concerne notre réflexion sur la pratique même de l'analyse musicale à l'aide des technologies numériques. iAnalysis et EAnalysis interrogent les méthodes et proposent une nouvelle définition des relations entre l'informatique et l'analyse musicale. Souvent réduites à de simples méthodes d'exemplification, les technologies numériques entrent en interaction avec les méthodes d'analyse. Le modèle de la représentation analytique est aussi rendu nécessaire par la profonde évolution du corpus électroacoustique, intégrant des niveaux d'interactivité très avancés et s'ouvrant de plus en plus sur des domaines scientifiques ou sur d'autres domaines artistiques.

Les deux premiers chapitres, bilans de nos recherches, relient des pratiques très différentes de la musicologie. D'une étude sur la terminologie à l'élaboration d'un modèle de transcription analytique en passant par l'analyse de la pratique de la transcription, l'analyse musicale d'œuvres du répertoire, la recherche de transcriptions issues de l'acoustique musicale et des mathématiques ou le développement informatique d'applications d'aide à l'analyse, un tel parcours peut paraître dispersé. Toutefois, cette multiplicité des démarches n'a servi qu'un seul objectif : l'exploration de nouveaux champs dans le domaine de l'analyse des œuvres du répertoire électroacoustique.

2.3. Conclusion

Chapitre 3

Projet de recherche : La représentation comme processus d'aide à la création et à l'analyse de l'interprétation de la musique électroacoustique

« Constatons enfin que le parcours de la technologie musicale suit au XX^e siècle un étrange cycle. Elle apparaît d'abord comme instrument à part entière dans la première moitié du siècle. Dès la naissance de la musique sur support, dans les années 50, elle prend la forme d'un réseau de machines de laboratoire pourvues de fonctions délimitées. Les années récentes la virent se revêtir de claviers et retrouver l'apparence d'instruments et de boîtiers électroniques de traitement ; progressivement, l'ordinateur se glisse en leur sein. À cette même époque, se fit jour la notion d'instrument muet, simple contrôleur d'un dispositif extérieur de production du son : clavier, instruments à vent qui en perdirent du coup leur voix propre, interfaces gestuelles ou buccales, etc.

Aujourd'hui s'ouvre une quatrième période : l'électronique numérique – dont la puissance pourtant indiscutable n'arrive toujours pas vraiment à se substituer aux fonctions traditionnelles de la musique électronique –, qui hésite entre la machine tous usages, multifonctions, universelle et les systèmes adaptés à une fonction précise. Mais surtout, l'instrument y retrouve sa place traditionnelle, et l'instrumentiste ses gestes de virtuose ; il n'est plus isolé : au moyen de divers procédés, son jeu est saisi par la machine, et s'installe alors une véritable interaction ¹. »

1. BATTIER, Marc, « Sculpter la transparence. L'écriture, le geste, l'environnement », *op. cit.*, p. 66.

3.1 Prélude

3.1.1 Entre recherche scientifique et création musicale

Nous avons commencé ce mémoire en justifiant nos activités par la pratique d'une recherche musicale créative au sens où Schaeffer l'entendait : une alliance entre la recherche scientifique et l'expérimentation artistique. Les deux premiers chapitres ont été l'occasion de contextualiser notre recherche scientifique, de démontrer notre apport à travers la représentation analytique et de lier cette recherche au développement numérique. Le deuxième chapitre aurait pu s'ouvrir sur la place des humanités numériques dans la musicologie. Nous avons préféré revenir aux fondements de notre recherche afin de mettre en évidence l'originalité de notre démarche. Mais le lien tissé entre analyse musicale et développement informatique ne saurait être complet sans une troisième base : la création musicale. Comme nous l'avons souligné dans les premières pages en reprenant des propos de Jean-Marc Chouvel, il nous semble difficile, voire impossible, de mener une telle recherche sans avoir nous-même expérimenté l'acte créatif. Si nous n'avons jamais pratiqué la recherche-création, nous avons quelques fois utilisé nos œuvres musicales ou nos performances improvisées afin d'expérimenter des méthodes d'analyse ou valider des formes de représentations. La raison pour laquelle notre recherche ne s'est jamais complètement ancrée dans nos créations vient probablement d'une des grandes difficultés que pose la recherche-création : comment l'artiste peut-il s'impliquer dans une recherche scientifique sur son œuvre pendant le processus de création ? Chacun des moments de création que nous avons vécu ne nous a jamais laissé le temps d'analyser nos processus d'élaboration de l'œuvre ou de nos performances improvisées. Les quelques travaux que nous avons produits à partir de nos œuvres² ou de nos improvisations³ ont mis plusieurs mois, voire plusieurs années après la création pour se réaliser. Toutefois, si les résultats de ces recherches ne forment qu'une petite partie de notre travail, le lien entre création, recherche scientifique et développement informatique ne nous a jamais semblé aussi fort.

L'expérience que nous avons acquise depuis nos premières recherches à la fin des années 1990 s'est constamment nourrie de notre pratique artistique. Cette dernière porte en germe des concepts forts que nous avons retrouvés durant nos recherches sur l'analyse musicale : la notion de complexité, la réalisation de systèmes ouverts, le rôle de l'imprécis dans la construction d'une forme, l'importance de la modélisation, le mélange entre l'indépendance et l'interdépendance dans le fonctionnement d'un système, les interrelations entre les éléments qui composent une forme ou la polysémie des formes créées par l'artiste. Ces concepts touchent à des domaines scientifiques très différents allant de la théorie de l'information aux sciences cognitives en passant par la psychologie de la perception ou les fondements scientifiques de l'informatique. Il est désormais temps d'ouvrir nos recherches à ces différents domaines, sans toutefois s'enfermer dans une recherche de théorie unitaire, mais en les intégrant comme des îlots de connaissances sur le modèle proposé par Edgar Morin :

« Il faut [...] par principe, refuser une connaissance générale : celle-ci escamote toujours les difficultés de la connaissance, c'est-à-dire la résistance que le réel oppose à l'idée : elle est toujours abstraite, pauvre, "idéologique", elle est toujours simplifiante⁴. »

Quels sont les savoirs inhérents à la pratique musicale qui sont transposables dans la recherche scientifique ou comment la création au sens large peut-elle être un support pour la recherche scien-

2. COUPRIE, « Analyse de *Jukurrpa - Quatre rêves* », *op. cit.*

3. COUPRIE, « Improvisation électroacoustique : analyse musicale, étude génétique et prospectives numériques », *op. cit.* ; COUPRIE, SOUSA DIAS, « *Vertiges de l'espace* : analyse d'une performance électroacoustique improvisée », *op. cit.*

4. MORIN, Edgar, *La méthode I*, Paris, Seuil, 2/2008, p. 35.

tifique ? Quels liens existe-t-il entre la pratique de l'improvisation électroacoustique et le développement informatique d'outils d'aide à l'analyse musicale ? Au-delà des aspects évidents, existe-t-il des bases – oserions-nous dire des universaux pour reprendre un terme cher à Mâche ? – reliant création, recherche musicologique et développement informatique ?

Notre projet de recherche pour les années à venir va s'appuyer sur l'ensemble de nos compétences afin d'étudier de nouveaux champs dans le domaine de l'analyse musicale, de la représentation, de la création et de l'interprétation. Comme le déclarait Marc Battier au début des années 1990, les technologies numériques ont tout d'abord permis une véritable interaction entre le musicien et la machine, celles-ci devenant plus précises et s'adaptant plus facilement au jeu de l'interprète. Depuis une dizaine d'années, la dernière partie de la citation s'est totalement confirmée : les nouveaux instruments numériques permettent de pratiquer un jeu tout aussi virtuose que celui des instruments traditionnels. Ces instruments portent les noms d'interfaces gestuelles, de capteurs, d'interfaces tactiles, d'interfaces tangibles⁵, d'instruments augmentés ou, plus récemment, d'instruments actifs ou *smart instruments*⁶. La différence entre le geste instrumental et le geste électronique soulignée par Philippe Lalitte⁷ semble progressivement se résorber. Le moment est donc venu d'intégrer la création et la performance à travers l'interprétation ou l'improvisation dans notre recherche scientifique.

3.1.2 Le développement d'un instrument augmenté

Depuis 1999, nous développons un instrument augmenté pour nos performances. Comme le montre la figure 3.1, cet instrument s'est progressivement stabilisé autour d'une flûte ténor équipée d'un microphone. Nous sommes passé du hautbois et du didgeridoo à la flûte ténor pour les possibilités de jeu qu'offre cet instrument.

Le dispositif complet (figure 3.2) comprend la flûte augmentée (flûte, carte son et ordinateur) ainsi que trois interfaces : un contrôleur MIDI CNTRL:R⁸, le logiciel Mira⁹ installé sur un iPad et l'interface gestuelle Hothand¹⁰. Le contrôleur et les deux interfaces nous permettent d'interagir avec le logiciel Max.

Avec le contrôleur CNTRL:R, nous intervenons sur les paramètres de contrôle du gain et du volume ainsi que sur les connexions programmées dans le logiciel Max :

1. le gain d'entrée de la flûte et le niveau de la *gate*¹¹ ;
2. les volumes de chaque chaîne d'effets (entre quatre et six selon les performances) ;

5. Les interfaces tangibles mélangent des objets physiques rétroactifs ou non, des capteurs et des écrans afin de créer des interfaces plus naturelles.

6. Les instruments actifs ou *smart instruments* sont actuellement en développement dans le cadre du projet ANR IMA-REV ([http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-ant/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-11-PDOC-0010](http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-ant/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-11-PDOC-0010)). Le principe consiste à capter les vibrations de l'instrument acoustique, modifier ces vibrations au niveau le plus fin et réinjecter les vibrations corrigées dans l'instrument. Les instruments actifs sont un moyen très innovant de corriger les imperfections acoustiques des instruments ou de créer des instruments électroacoustiques sans haut-parleurs.

7. LALITTE, Philippe, « Towards a Semiotic Model of Mixed Music Analysis », *Organised Sound*, vol. 11, n° 2, 2006, p. 101.

8. Le contrôleur CNTRL:R est construit par la société Liine (<http://lividinstruments.com/products/cntrlr/>). Il offre huit contrôleurs rectilignes, 36 contrôleurs rotatifs et 48 interrupteurs.

9. Le logiciel Mira est développé par la société Cycling'74 et fonctionne en interaction avec Max (<https://cycling74.com/products/mira/>).

10. L'interface Hothand se compose d'une bague permettant de capter l'orientation de la main (axes X et Y) et d'un récepteur connecté à l'ordinateur (http://www.sourceaudio.net/products/hothand/hothand_usb.php).

11. La *gate* nous permet de filtrer les sons environnants provenant des autres musiciens.

3.1. Prélude

Date	Dispositif
1999	Hautbois, microphone et transformation par un autre musicien
2001	Hautbois, microphone, processus d'effet Lexicon MPX-100 et pédalier MIDI
2002	Hautbois, didgeridoo, microphone, processus d'effet Lexicon MPX-100 et pédalier MIDI
2002	Hautbois, didgeridoo, microphones, processus d'effet Lexicon MPX-100 et pédalier MIDI
2003	Flûte ténor, didgeridoo, microphones, ordinateur (Max), carte son, contrôleur Évolution UC-16
2004	Flûte ténor, didgeridoo, microphones, ordinateur (Max), carte son, contrôleur Évolution UC-33
2005	Flûte ténor, didgeridoo, microphones, ordinateur (Max), carte son, contrôleur Lemur
2007	Instruments Baschet, microphones, ordinateur (Ableton Live), carte son, contrôleur Lemur (ce dispositif n'a été utilisé que pour deux concerts)
2008	Flûte ténor, microphone, ordinateur (Ableton Live), carte son, contrôleur Lemur
2011	Flûte ténor, microphone, ordinateur (Ableton Live), carte son, contrôleur sur iPad
2011	Flûte ténor, microphone, ordinateur (Ableton Live), carte son, contrôleur sur iPad
2014	Flûte ténor, microphone, ordinateur (Max), carte son, contrôleur sur iPad, contrôleur Hothand

FIGURE 3.1 – Évolution de notre instrument augmenté pour l'improvisation musicale.

3. les connexions entre les générateurs de son (flûte, synthétiseur granulaire, synthétiseur de texture, système de réinjection à partir du son de la flûte) ;
4. un ensemble de paramètres divers.

L'interface multitactile iPad combinée au logiciel Mira nous permet de contrôler une grande partie des paramètres des effets. Chaque paramètre est défini directement dans le logiciel Max.

L'interface Hothand nous offre la possibilité de contrôler deux ou trois paramètres à l'aide de gestes de la main. Nous l'utilisons pour deux types de contrôles :

1. le contrôle de l'interpolation des paramètres du synthétiseur de texture ;
2. le contrôle d'un module d'effet placé à la fin de la chaîne de transformation du son et constitué d'un modulateur d'amplitude (axe Y), d'un filtre (axe X) et d'un générateur d'enveloppe (axe X ou jeu tactile sur le logiciel Mira).

Cette présentation de notre dispositif d'improvisation électroacoustique était nécessaire afin de mettre en évidence le lien entre ces recherches musicales menées depuis 1999 et notre futur projet. À travers le développement de cet instrument augmenté, nous avons commencé à élaborer une réflexion sur la prise en compte des interfaces gestuelles et tactiles dans l'analyse musicale. Dans la section 1.4.2 du premier chapitre, nous avons présenté un premier travail de réflexion¹² dans lequel nous envisagions de prendre en compte une grande partie des flux de communication entre les interfaces et le ou les logiciels utilisés pendant la performance. Avec notre instrument augmenté nous avons expérimenté différents types de flux de communication et nous nous sommes intéressé au filtrage et à la gestion automatique de certains de ces flux. Cette première expérience nous permet d'envisager

12. COUPRIE, « Improvisation électroacoustique : analyse musicale, étude génétique et prospectives numériques », *op. cit.*

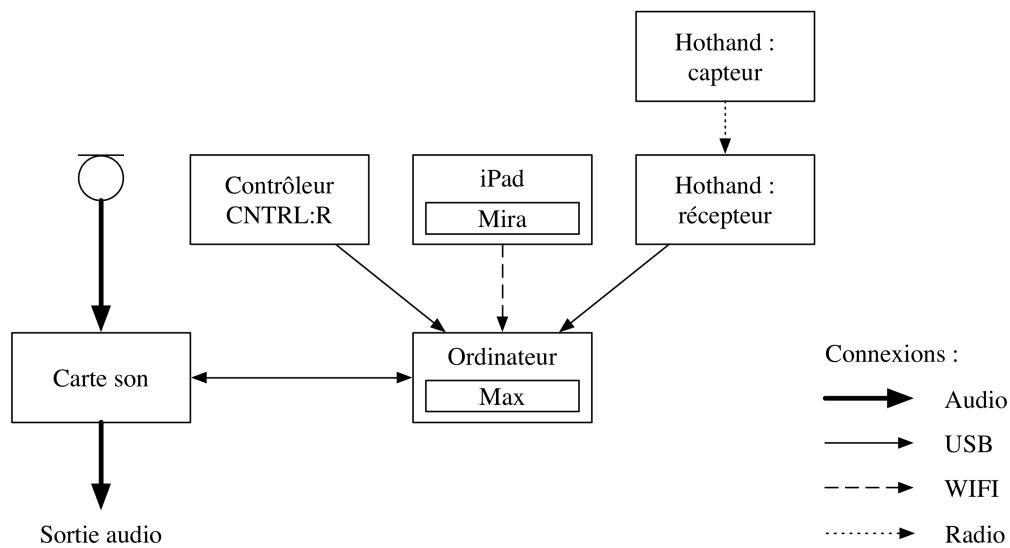


FIGURE 3.2 – Notre dispositif de jeu pour l'improvisation électroacoustique.

notre projet de recherche en intégrant l'ensemble des questions reliant la création et l'interprétation à l'aide d'interfaces gestuelles à l'analyse musicale.

Enfin, notre objectif artistique va maintenant se concentrer sur la création d'une interface gestuelle complète à l'aide de capteurs. Elle remplacera la flûte augmentée et l'enjeu sera de créer une interface aussi expressive que celle-ci. Cette interface nécessitera de nombreuses expérimentations afin de gérer et analyser en temps réel les flux provenant des capteurs. Elle sera aussi le support de recherches pour l'analyse de ces flux et leur mise en relation avec la réalisation sonore afin de générer des représentations de structure en cours de réalisation¹³.

3.2 Définition du champ de recherche

Comme nous l'avons présenté dans un article récent¹⁴, EAnalysis n'intègre que quelques fonctions parmi celles qui avaient été envisagées à l'origine. À la fin 2009, avec Leigh Landy, nous avons réfléchi à ce que pourrait être un logiciel d'aide à l'analyse musicale sur le modèle d'iAnalyse mais adapté au corpus des musiques de sons¹⁵. Deux des aspects qui avaient été imaginés concernaient l'analyse de l'interprétation spatialisée utilisée en acousmatique¹⁶ et l'analyse automatique de certaines composantes du matériau sonore. Ces deux aspects n'ont finalement pas été intégrés pour des raisons de temps. Parallèlement à nos recherches sur l'utilisation de représentations issues de l'acoustique musicale, nous avons commencé à imaginer l'intégration de représentations semi-automatiques et de représentations liées aux processus de création et d'interprétation. La représentation analytique

13. Cet aspect de nos recherches est déjà intégré dans un appel à projet ANR *Trait d'union* (Puce Muse, Eowave, IReMus, LAM, Labri, Limsi) dans lequel notre rôle sera d'expérimenter les premières représentations analytiques automatiques réalisées sur des œuvres ou des improvisations électroacoustiques.

14. COUPRIE, « Le développement d'un outil d'aide à l'analyse musicale : bilan et perspectives musicologiques », *op. cit.*

15. LANDY, Leigh, *Understanding the Art of Sound Organization*, Cambridge, MIT Press, 2007, p. 17.

16. VANDE GORNE, *op. cit.*

3.2. Définition du champ de recherche

sur laquelle nous travaillions pouvait ainsi devenir le lien entre plusieurs processus et méthodes d'analyse musicale (figure 3.3).

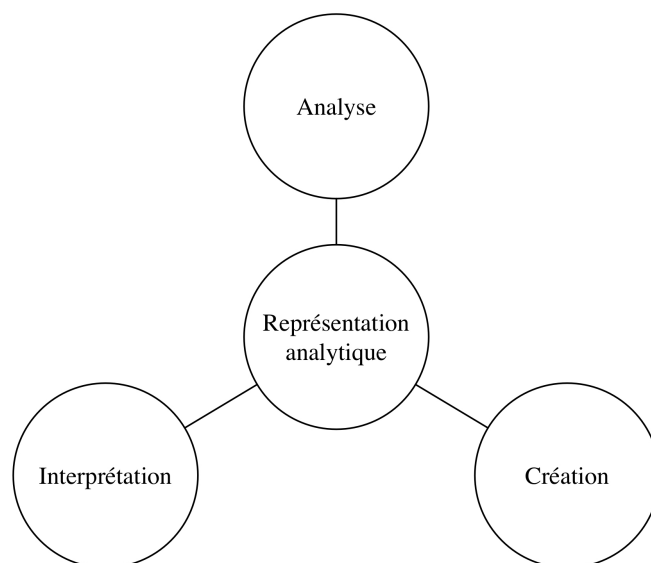


FIGURE 3.3 – Notre proposition d'articulation entre l'analyse musicale, la création et l'interprétation.

En outre, ce projet présente l'avantage de couvrir plusieurs champs de recherches jusqu'ici peu explorés :

1. l'analyse de l'interprétation d'œuvre acousmatique et/ou électroacoustique¹⁷ ;
2. l'analyse du jeu instrumental sur des interfaces gestuelles¹⁸ ;
3. l'étude des processus de création en électroacoustique ;
4. l'automatisation de l'extraction d'informations permettant de faciliter certaines étapes de l'analyse musicale.

Notre projet de recherche vise donc à mettre en synergie plusieurs aspects de la création et de l'interprétation dans une dimension musicologique (figure 3.4). L'analyse musicale constituant l'objet principal du projet, la représentation est utilisée à la fois dans une dimension musicologique et dans une dimension interprétative et créative. Ce dernier aspect est représenté par l'analyse de l'interprétation et par la création d'un retour visuel pour le musicien et le compositeur tout en apportant une dimension pédagogique¹⁹.

Ce projet ne saura exister sans la collaboration avec des laboratoires de recherche, des musiciens et des compositeurs. Une part importante consistera donc à analyser des pratiques de création et de

17. Peu de travaux de recherche ont été menés sur le sujet, citons entre autres le n° 4 de la revue *Ars Sonora* (PLANEL, Hélène, MERLIER, Bertrand, BAYLE, François, DONATO, François, FAVRE, Marc, DUFOUR, Denis, « L'interprétation des œuvres acousmatiques », *Ars Sonora*, n° 4, 1996, <http://www.ars-sonora.org/html/numeros/numero04/04e.htm>), l'article d'Annette Vande Gorne déjà cité et l'actuel projet de recherche mené par Féron et Boutard (FÉRON, François-Xavier, BOUTARD, Guillaume, « Construction d'une enquête sur l'interprétation des musiques acousmatiques », in *Journées d'informatique musicale*, Montréal, Université de Montréal, 2015, http://jim2015.oicrm.org/actes/JIM15_Feron_F-X_et_al.pdf).

18. Il existe une littérature importante sur les aspects techniques (conférence NIME) ou sur l'analyse du geste du musicien, mais un travail d'analyse du jeu instrumental mis en relation avec les œuvres reste à initier.

19. L'aspect pédagogique ne sera probablement pas développé dans un premier temps. En effet, il pourrait constituer un projet à part entière.

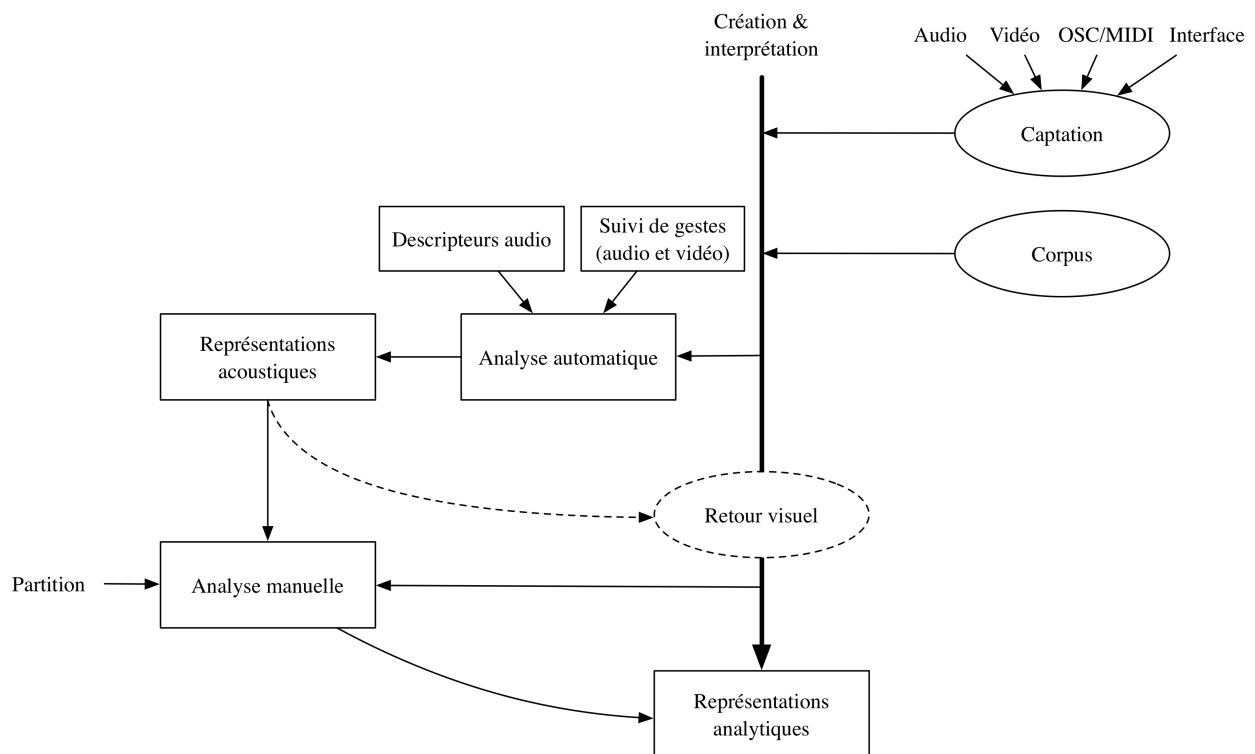


FIGURE 3.4 – Modélisation du projet de recherche.

performance *in situ* en couvrant un champ assez large afin de faire émerger de nouvelles méthodes de captation, d'analyse et de représentation.

3.2.1 Interprétation musicale et captation numérique

L'interprétation est prise au sens large – dans le sens de *performance* –, il existe plusieurs champs d'application :

1. l'interprétation spatialisée des musiques acousmatiques, aussi nommée mise en espace ou spatialisation. Les travaux de Vande Gorne²⁰ et Wishart²¹ ont été fondateurs pour la mise en évidence de figures et de mouvements d'espaces réalisés lors de la performance ou inscrits dans les œuvres multipistes. Dans ce domaine, nous chercherons des méthodes de captation et d'analyse de ces interprétations ;
2. l'interprétation des musiques interactives à l'aide d'interfaces gestuelles. Ces interfaces ont fait l'objet de nombreuses publications étudiant leurs aspects technologiques et leur intégration dans un processus de création ou d'interprétation. Toutefois, il n'existe que peu d'études musicologiques sur ces nouveaux instruments. Elles sont pourtant nécessaires afin d'apporter une vision historique et analytique de l'instrument ;
3. l'interprétation d'œuvres interactives autonomes de type installation sonore dans lesquelles le public interagit avec un dispositif numérique de captation. Cette part du corpus de la musique

20. VANDE GORNE, *op. cit.*

21. WISHART, *op. cit.*, p. 191-235.

3.2. Définition du champ de recherche

électroacoustique commence à faire l'objet de publications musicales sous la forme de DVD-Audio surround 5.1, la question de la transmission de l'œuvre semble donc émerger. La musicologie n'a que très peu étudié ce corpus en prenant en compte la captation dans le processus d'analyse musicale, ce sera donc l'objet de notre apport dans ce domaine ;

4. la performance improvisée libre dans laquelle la notion même d'interprétation n'a pas réellement de sens, mais pour laquelle le musicien interprète un dispositif numérique qu'il a bien souvent lui-même conçu. Le processus de développement du dispositif nous intéresse particulièrement afin d'expérimenter des technologies de retour visuel à partir d'analyses automatiques du matériau sonore. L'analyse de ce corpus nécessite aussi la mise en œuvre de techniques comme la *faktura*, que nous avons présentée en 1.1.3.

Nous élargissons donc la notion d'interprétation dans deux directions :

1. la prise en compte de musiciens occasionnels non spécialistes comme dans le cas des installations sonores. Cette direction englobe aussi le champ de la pédagogie ;
2. le regroupement de la partition et du dispositif numérique : le musicien peut interpréter une partition, celle-ci peut elle-même résulter de l'exécution d'un algorithme²² ou être un dispositif dans lequel elle peut être considérée comme un cadre plus ou moins formalisé et inscrite sous la forme d'algorithmes, de processus, de bases de données, de listes de valeurs ou d'emplacement mémoire, etc.

Nous resterons dans le champ des musiques n'utilisant que des technologies numériques. Le corpus des musiques mixtes associant un ou plusieurs instruments acoustiques et un dispositif électronique ne sera donc pas pris en compte. Ce corpus est bien évidemment sujet à changement en fonction des collaborations que nous pourrions mettre en œuvre et des choix musicologiques et techniques que nous ferons dans les années à venir.

En 2008, Magnusson et Hurtado avançaient l'idée que le développement d'interfaces gestuelles toujours plus performantes était une réponse au problème de la coupure entre le geste et le résultat sonore dans la musique électroacoustique en direct²³. Parmi les nombreuses interfaces gestuelles développées, quelques-unes sont de grande qualité, elles offrent la possibilité d'un jeu virtuose aussi précis que celui de l'instrument traditionnel. Ces avancées technologiques commencent à porter leurs fruits, les compositeurs et les interprètes s'interrogent désormais sur la notation de l'interactivité²⁴ non plus en termes de symboles dédiés au réalisateur en informatique musicale, mais sous la forme d'une intégration dans l'écriture de la partition. L'interprète de l'interface gestuelle devient alors un musicien intégré à l'ensemble de musique de chambre ou à l'orchestre. Au sein du groupe sur les nouveaux espaces de la notation musicale de l'AFIM, nous avons constaté l'émergence de nouvelles formes de notations en rupture avec les habitudes des compositeurs du XX^e siècle²⁵. L'intégration de l'écriture de l'interactivité dans l'écriture musicale semble être une nouvelle voie très prometteuse. Elle ne relègue plus la partie interactive dans un espace de réalisation différent de celui du

22. BERRY, Gérard, « Parler du temps, mais de façon formelle », in H. Vinet (éd.) *Produire le temps*, Paris, Hermann, 2014, p. 69.

23. MAGNUSSON, Thor, HURTADO, Enrike, « The Phenomenology of Musical Instruments: A Survey », *eContact!* vol. 10, n° 4, 2008, http://cec.sonus.ca/econtact/10_4/magnusson_hurtado_survey.html.

24. Le travail de Mays et Faber est caractéristique de cette direction de recherche : MAYS, Tom, FABER, Francis, « A Notation System for the Karlox Controller », in B. Caramiaux, K. Tahiroğlu, R. Fiebrink, A. Tanaka (éd.) *New Interfaces for Musical Expression*, Londres, Université de Goldsmiths, 2014, p. 553-556.

25. FOBER, Dominique, BRESSON, Jean, COUPRIE, Pierre, GESLIN, Yann, « Les nouveaux espaces de la notation musicale », in *Journées d'informatique musicale*, Montréal, Université de Montréal, 2015, http://jim2015.oicrm.org/actes/JIM15_Fober_D_et_al.pdf.

musicien – comme c’est le cas avec l’héritage des stations d’informatique musicale –, mais inscrit l’électronique au cœur même de la partition au point d’en confier la réalisation au musicien lui-même.

Parallèlement à l’interprétation d’œuvres interactives, l’interprétation de la musique acousmatique remonte à la fin des années 1960. Même si Schaeffer et Poullin avaient imaginé dès 1951 un dispositif de spatialisation du son à l’aide de quatre haut-parleurs disposés autour et au-dessus du public, les recherches avancées dans ce domaine remontent à 1967 avec le premier dôme de haut-parleurs Audium à San Francisco, puis en 1973 avec le Gmebophone à Bourges et 1974 avec l’acousmonium du GRM à Paris²⁶. De nombreux dispositifs ont alors essaimé, proposant chacun un espace différent : frontal, en arches, en cube, en dôme, etc. Toutefois, peu de recherches musicologiques ont été réalisées sur ces dispositifs. De plus, si la communauté musicale revendique le terme d’interprétation, aucune étude systématique n’a été réalisée dans ce domaine.

En ce qui concerne l’aspect technologique, nous avons déjà identifié la problématique de la captation pour l’analyse des musiques improvisées²⁷ : quelles données doit-on capter pendant la performance et comment les capter ? Il sera donc nécessaire d’étudier chaque source disponible et d’évaluer sa pertinence pour l’analyse musicale :

1. audio stéréophonique ou multiphonique, enregistrement d’ambiance et/ou en sortie de carte son ;
2. vidéo permettant d’étudier les gestes de l’interprète ;
3. données de communication entre l’interface utilisée par l’interprète et le dispositif numérique de production du son ;
4. modifications de l’interface du ou des logiciels utilisés pendant l’interprétation : captation de l’écran et des interfaces de saisie.

L’enregistrement est non seulement « *autre chose* que le phénomène lui-même²⁸ », mais il n’est pas non plus neutre pour l’analyse musicale. Chez certains artistes, l’enregistrement de la performance fait partie intégrante de l’interprétation²⁹, le travail de prise de son et la post-exécution entrent en interaction forte avec l’interprétation musicale. Il nous faudra donc aussi nous pencher sur les techniques d’enregistrement citées ci-dessus en évaluant leur impact sur l’étude musicologique.

3.2.2 Méthodes

Notre projet de recherche est ancré dans l’analyse musicale assistée par ordinateur. L’étude et le développement de technologies numériques seront donc une part importante du travail. Comme dans nos précédentes recherches, la part musicologique et la part technologique seront étudiées en synergie. Plusieurs axes transversaux peuvent déjà être identifiés (figure 3.4) :

1. le lien entre ce projet et les deux logiciels déjà développés, iAnalyse et EAnalysis ;
2. la captation de différents flux lors de la performance : audio, vidéo, OSC/MIDI³⁰ ;

26. COUPRIE, « La musique électroacoustique en concert : histoire et perspectives », *op. cit.*, p. 44.

27. COUPRIE, « Improvisation électroacoustique : analyse musicale, étude génétique et prospectives numériques », *op. cit.*, p. 165-167.

28. SCHAEFFER, Pierre, *De la musique concrète à la musique même*, Québec, Mémoire du livre, 2/2002, p. 85.

29. LEPHAY, Pierre-Emmanuel, « La prise de son et le mixage, élément de l’interprétation : les exemples de Herbert von Karajan et Glenn Gould », in P.-H. Frangne, H. Lacombe (éd.) *Musique et enregistrement*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 2014, p. 113.

30. Le MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*) et l’OSC (*Open Sound Control*) sont des protocoles de communication utilisés en informatique musicale afin de relier les interfaces, les instruments et les ordinateurs.

3.2. Définition du champ de recherche

3. la semi-automatisation de certaines étapes de l'analyse musicale et notamment des premières étapes de segmentation, d'identification de singularités, de similarités ou de corrélations ;
4. l'usage de technologies jusqu'ici réservées à la création musicale comme le calcul de descripteurs audio en temps réel ou le suivi de gestes ;
5. l'analyse musicale de corpus de matériau ou d'œuvres dans le cas de la création musicale ;
6. l'aide à l'interprétation par retour visuel.

Ces premiers axes ne sont ni limitatifs ni impératifs, l'avancée de la recherche permettra de dégager les éléments réellement pertinents pour une application créative de l'analyse musicale.

3.2.2.1 La semi-automatisation de certaines tâches analytiques

Nous avons déjà évoqué les travaux de segmentation automatique ou semi-automatique³¹ réalisés à partir de l'extraction de descripteurs audio. De même Jourdan et Malt³² ont montré l'utilisation de descripteurs pour la détection automatique de certains événements dans un flux musical de type électroacoustique. L'intégration de ces recherches nécessitera la collaboration avec des chercheurs provenant des domaines de l'informatique et de l'acoustique musicale et entrera dans notre projet à plusieurs niveaux :

1. l'analyse automatique de corpus de matériaux, de fragments d'œuvres en cours de réalisation ou d'œuvres complètes ;
2. la visualisation de paramètres sonores analysés automatiquement durant l'interprétation ;
3. la visualisation d'éléments musicaux analysés d'une manière automatique ou semi-automatique durant une performance improvisée comme l'évolution de la structure musicale.

Cet aspect du projet de recherche reste probablement le plus expérimental. Même si certains chercheurs ont obtenu des résultats convaincants, il reste un chemin très important à parcourir afin d'offrir à la communauté scientifique des méthodes d'analyse fiables et faciles à mettre en œuvre.

3.2.2.2 Les technologies en temps réel

Le dispositif d'analyse semi-automatique s'appuiera sur des technologies utilisées jusqu'alors dans le domaine de la création musicale. Il existe de nombreux projets de recherche portant sur la captation et la reconnaissance de geste afin de faciliter le suivi de partition, d'augmenter les possibilités de l'instrument ou de soutenir le travail d'apprentissage du jeune musicien³³. De même, l'extraction de descripteurs durant la performance permettra de détecter différents types de morphologies ou de ruptures.

31. SPEVAK, POLFREMAN, *op. cit.* ; GULLUNI, BUISSON, ESSID, RICHARD, *op. cit.*

32. MALT, Mikhail, JOURDAN, Emmanuel, « Real-Time Uses of Low Level Sound Descriptors as Event Detection Functions Using the Max/MSP Zsa.Descriptors Library », in M. Pimenta, D. Keller, R. Faria, M. Queiroz, G. Ramalho, G. Cabral (éd.) *12th Brazilian Symposium on Computer Music (SBCM)*, Recife, NUCOM/SBC, 2009, p. 45-56.

33. BEVILACQUA, Frédéric, ZAMBORLIN, Bruno, SYPNIEWSKI, Anthony, SCHNELL, Norbert, GUÉDY, Fabrice, RASAMIMANANA, Nicolas, « Continuous Realtime Gesture Following and Recognition », in S. Kopp, I. Wachsmuth (éd.) *Gesture in Embodied Communication and Human-Computer Interaction*, Berlin, Springer Verlag, 2009, p. 73-84.

3.2.2.3 L'analyse musicale de corpus de matériaux ou d'œuvres

Pour la réalisation de représentations en nuage de points, nous nous sommes inspiré du logiciel CataRT (section 2.2.3.6). Ce logiciel de synthèse concaténative est lui-même basé sur des travaux d'analyse de corpus³⁴. Le classement dynamique de fichiers numériques fragmentés puis analysés à partir d'une extraction de descripteurs permet une navigation très proche des besoins de l'analyste ou du compositeur. Les fragments sonores sont classés en fonction de leur timbre ou de caractéristiques particulières du matériau. Il est aussi envisageable de croiser ce classement avec une analyse des gestes qui ont permis la réalisation de ces matériaux afin de mettre en évidence les éléments logiques de la chaîne de fabrication du son. De même, le classement peut aussi être croisé avec le résultat d'une analyse musicale et révéler, par exemple, les structures sous-jacentes d'une improvisation.

3.2.3 Représentations : le retour visuel

Durant le développement d'EAnalysis, nous avons expérimenté la réalisation de représentations à partir d'informations de session d'une station d'informatique musicale. Le transfert de la position de chaque échantillon audio sur le plan temporel et sur celui des voies de mixage permet de créer une visualisation différente du fichier de l'œuvre. De même, nous venons de le souligner, les représentations en nuage de points peuvent permettre de naviguer dans des matériaux provenant de fichiers numériques différents.

Ces deux fonctions, secondaires dans EAnalysis, serviront de base à une expérimentation sur la visualisation d'une forme musicale en cours de construction et la navigation dans un corpus de matériaux.

Un des aspects les plus innovants de cette recherche sera probablement la création de retours visuels pour les musiciens pendant la performance. Les interfaces de jeu sont souvent réduites au strict minimum, voire masquées durant le concert, le musicien préférant se concentrer sur la partition ou sur une écoute acousmatique de sa performance. Le projet vise donc ici à créer un retour visuel non intrusif durant la performance, par exemple sur le modèle de la partition augmentée d'INScore³⁵. Il peut aussi avoir un rôle pédagogique dans le cas où le musicien découvre un dispositif et doit apprendre à s'en servir rapidement, comme c'est le cas de la spatialisation des œuvres acousmatiques. Enfin, le retour visuel peut prendre la forme d'une interface interactive réagissant, voire se modifiant, en fonction des données captées³⁶.

Dans le domaine de la représentation des structures musicales, EAnalysis s'est arrêté à la première étape. Même si nous avons intégré l'utilisation de diagrammes en arc permettant de visualiser les récurrences ou de matrice de similarités mettant en évidence les variations structurelles, les structures complexes, polyphoniques ou polysémiques évoquées en 1.3.6 restent difficiles à représenter. La représentation sous la forme d'un retour visuel permet d'envisager la visualisation des structures avec une plus grande liberté afin de souligner les formes pendant leur construction, que ce soit lors du travail de studio du compositeur, pendant l'interprétation ou durant l'improvisation d'une œuvre.

34. SCHWARZ, Diemo, « Interacting with a Corpus of Sounds », *eContact!*, n° 16, 2014, http://cec.sonus.ca/econtact/16_2/schwarz_corpus.html

35. FOBER, Dominique, ORLAREY, Yann, LETZ, Stéphane, « INScore – An Environment for the Design of Live Music Scores », in *Proceedings of the Linux Audio Conference*, Stanford, CCRMA, 2012, p. 47-54.

36. SCHWARZ, « Interacting with a Corpus of Sounds », *op. cit.*

3.3 Le futur d'iAnalyse et d'EAnalysis

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la maintenance de deux projets de développement informatique de l'envergure d'iAnalyse et d'EAnalysis est impossible. De plus, les deux logiciels partagent de nombreuses classes, fonctions et ressources, il semble donc logique de réunir ces deux projets en un seul.

Le développement en objective-c³⁷ nous a permis de réduire significativement le temps de travail. Le choix d'une seule plateforme, peu fragmentée, a facilité l'expérimentation de techniques de représentation, mais aussi les différentes étapes de développement et la maintenance du code. Toutefois, ce choix technologique a aussi entraîné quelques inconvénients et difficultés :

1. la prise en compte d'une seule plateforme a limité l'usage du logiciel auprès des musicologues et des enseignants ;
2. l'intégration de technologies indispensables à notre futur projet de recherche sera difficile : enregistrement audiovisuel ou multipiste, connexion MIDI et OSC, usage d'extraction de descripteurs en temps réel, utilisation de techniques de suivi de mouvements ou de gestes, etc. ;
3. l'interconnexion avec des logiciels de création ou des technologies de partition augmentée pour l'analyse de l'interprétation posera aussi un certain nombre de difficultés.

De plus, depuis quelques mois, nous sommes engagé dans différents appels à projets dans lesquels des technologies temps réel sont au cœur de la recherche. Il est temps de nous orienter vers un environnement de programmation s'intégrant dans ces technologies et permettant de pallier les difficultés que nous venons de présenter.

Nous avons donc décidé de transférer iAnalyse et EAnalysis dans l'environnement Max³⁸. L'objectif ne sera pas de créer une application autonome mais plutôt de repenser nos deux logiciels sous une forme modulaire, une boîte à outils pour l'analyse musicale. Le travail informatique se concentrera sur le développement d'une bibliothèque d'abstractions s'appuyant sur plusieurs bibliothèques d'objets et d'abstractions existantes :

1. les zsa.descriptors³⁹ développés par Jourdan et Malt permettant de calculer les descripteurs en temps réel ;
2. l'objet MaxScore⁴⁰ développé en JAVA par Didkovsky et permettant d'utiliser dynamiquement la notation musicale ou toute notation symbolique ;
3. les bibliothèques Bach⁴¹ et Cage⁴² développées par Agostini et Ghisi pour l'édition de partitions augmentées et contenant des outils d'aide à la composition ;
4. l'environnement INScore⁴³ développé au Grame⁴⁴ pour la création de partitions augmentées.

37. L'objective-c est un langage de programmation orienté objet et basé sur le langage C. Il est essentiellement utilisé pour le développement de logiciels pour la plateforme Macintosh.

38. Max est un environnement de programmation pour la création audiovisuelle.

39. <http://www.e--j.com/index.php/what-is-zsa-descriptors/>

40. <http://www.computermusicnotation.com>

41. <http://www.bachproject.net>

42. <http://www.bachproject.net/cage>

43. <http://inscore.sourceforge.net>

44. Le Grame est un centre national de création musicale à Lyon (<http://www.grame.fr>). Il développe plusieurs technologies pour la création musicale.

Avec Xcode, l'amélioration de la partie graphique aurait nécessité la traduction du code en OpenGL⁴⁵. C'est aussi en OpenGL que seront réalisées les représentations dans la future bibliothèque de Max. De plus, le code de cette bibliothèque d'abstractions sera distribué en *open source*, permettant ainsi aux musicologues, compositeurs et musiciens de participer au développement et de l'intégrer plus facilement dans leurs projets.

3.4 Conclusion

Le projet que nous venons de présenter constitue la troisième étape de nos recherches. Nous avons tout d'abord travaillé sur l'analyse musicale et la transcription des œuvres acousmatiques du répertoire. Durant plusieurs années, nous avons expérimenté les différents outils et méthodes d'analyse développés par les compositeurs et réalisé une vingtaine de transcriptions à l'aide de logiciels spécialisés. Lors de la deuxième étape, nous avons utilisé des techniques de représentation analytique inspirées de travaux réalisés en acoustique musicale, en mathématiques ou en analyse de l'interprétation. Le développement d'EAnalysis a constitué une part importante de cette étape. Elle nous a permis de réunir nos travaux de recherche sur les outils et méthodes d'analyse et d'étudier les flux de travaux en analyse musicale et en transcription des musiques de sons. Cette phase préparatoire au développement proprement dit a été essentielle car riche en ouverture sur des domaines que nous n'avions pas encore envisagés au sein de l'analyse musicale mais aussi en termes d'humanité numérique. En effet, le développement d'un logiciel adapté aux recherches musicologiques afin d'expérimenter de nombreuses représentations à partir du tracé spectral et des descripteurs audio n'aurait été possible sans une synergie forte entre une réflexion approfondie sur le numérique et la recherche musicologique. La troisième étape que constitue ce projet de recherche nous permettra de relier les champs de l'analyse musicale à ceux de la création et de l'interprétation à travers la représentation analytique. Nous allons nous appuyer sur les résultats obtenus avec nos transcriptions et ceux issus de nos recherches sur l'usage des descripteurs audio afin d'intégrer l'analyse au cœur de la création et de l'interprétation. Nous comptons aussi sur l'extension de nos recherches dans ces deux directions pour enrichir notre travail scientifique dans le domaine de l'étude des œuvres électroacoustiques.

Les théories et méthodes qui constituent le fondement de la recherche musicologique sur la musique électroacoustique sont nées de pratiques compositionnelles. Comme le soulignent Donin et Feneyrou⁴⁶, la notion de théorie aux XX^e et XXI^e siècles doit être prise au sens large, elle reste souvent liée au travail d'un compositeur-théoricien ou à un corpus restreint et est difficilement généralisable. Toutefois, la musique électroacoustique est probablement un cas particulier. À travers nos études, nous avons montré la validité de certaines théories et méthodes pour un corpus dépassant largement le cadre d'une œuvre ou d'une production musicale spécifique. Ce cas particulier s'explique probablement à travers deux idées. Tout d'abord, ces théories portent sur le même objet d'étude, le son, autour duquel les compositeurs n'ont eu de cesse de tourner afin d'en saisir toujours plus de détails. Ensuite, et en lien avec la première idée, le son peut être approché avec plusieurs techniques d'analyse – mécanique, perceptive, acoustique, musicale – qui démultiplient les résultats, mais ne permettent pas une analyse globale et complète. De l'analyse du processus de création sonore à l'analyse du signal en passant par l'analyse musicale, chacune d'entre elles ouvre une porte mais ne donne aucune clé pour une analyse complète du phénomène musical. Chaque théorie est finalement incom-

45. OpenGL (*Open Graphics Library*) est un ensemble de fonctions développées pour la réalisation de graphiques en 2D et en 3D. Il est devenu un standard dans toutes les applications nécessitant une réalisation graphique de haut niveau.

46. DONIN, Nicolas, FENEYROU, Laurent, « Introduction », in N. Donin, L. Feneyrou (éd.) *Théories de la composition musicale au XX^e siècle*, vol. 1, Paris, Symétrie, 2013, p. 5.

3.4. Conclusion

plète et les espaces vides ou indéterminés qui la composent laissent au musicologue une grande liberté d'application. Cet objet unique d'étude qu'est le son et son impossibilité à le cerner dans son entièreté ouvrent les théories à une grande partie des corpus du genre électroacoustique. Avec notre projet de recherche, nous espérons montrer la validité de ces idées, continuer à explorer de nouvelles méthodes analytiques et, peut-être, entrevoir de nouveaux champs théoriques.

Annexe A

Liste des transcriptions morphologiques et des représentations analytiques

Cette annexe contient une liste des transcriptions et représentations que nous avons réalisées depuis 1998.

(1998-2003) *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle :

- « L'oiseau moqueur »
- « L'oiseau triste »
- « L'oiseau zen »

(2000) « Dulcinée » extrait de *Don Quichotte Corporation* d'Alain Savouret

(2000) Extrait de *M.É.* de Philippe Leroux (réalisée avec Christian Zanési)

(2000-2003) Deux extraits de *De Natura Sonorum* de Bernard Parmegiani :

- « Ondes croisées »
- « Géologie sonore » (inédit)

(2001) *Sud* de Jean-Claude Risset :

- « Partie 1 »
- « Partie 2 »
- « Partie 3 »

(2001) Extrait d'*Hétérozygote* de Luc Ferrari

(2001) Deux extraits de *Musique promenade* de Luc Ferrari

(2001) Trois extraits de *Presque rien n° 1, le lever du jour au bord de la mer* de Luc Ferrari

(2001) Trois extraits de *Presque rien n° 2, ainsi continue la nuit dans ma tête* de Luc Ferrari

(2001) Deux extraits de *Presque rien avec filles* de Luc Ferrari

(2001) Quatre extraits de *Presque rien n° 4, la remontée du village* de Luc Ferrari

(2001) Extraits de *Lumina* d'Ivo Malec

(2001) Cinq extraits de *Vox vocis, f* d'Ivo Malec

- (2002) Extrait de *Pré-texte* de Philippe Fénelon (inédit)
- (2003) *Stilleben* de Kaija Saariaho (inédit)
- (2003) *Spirale* de Pierre Henry (inédit)
- (2005) Extraits de *Jukurrpa - Quatre rêves* de Pierre Couprie
- (2007) *Bohor* de Iannis Xenakis
- (2012) « La fleur future » extrait de *La main vide* de François Bayle
- (2012) *Emak Bakia*, improvisation par Laurence Bouckaert, Pierre Couprie et Francis Larvor
- (2014) Extrait de la bande-son de *Kill Bill* de Quentin Tarantino (inédit)
- (2015) *Vertiges de l'espace*, improvisation par Laurence Bouckaert, Pierre Couprie, Francis Larvor et António de Sousa Dias
- (2015) Bande-son d'*Elephant* de Gus van Sant
- (2015) « Grandeur nature » extrait de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle

Annexe B

Interfaces des différentes versions d'iAnalyse

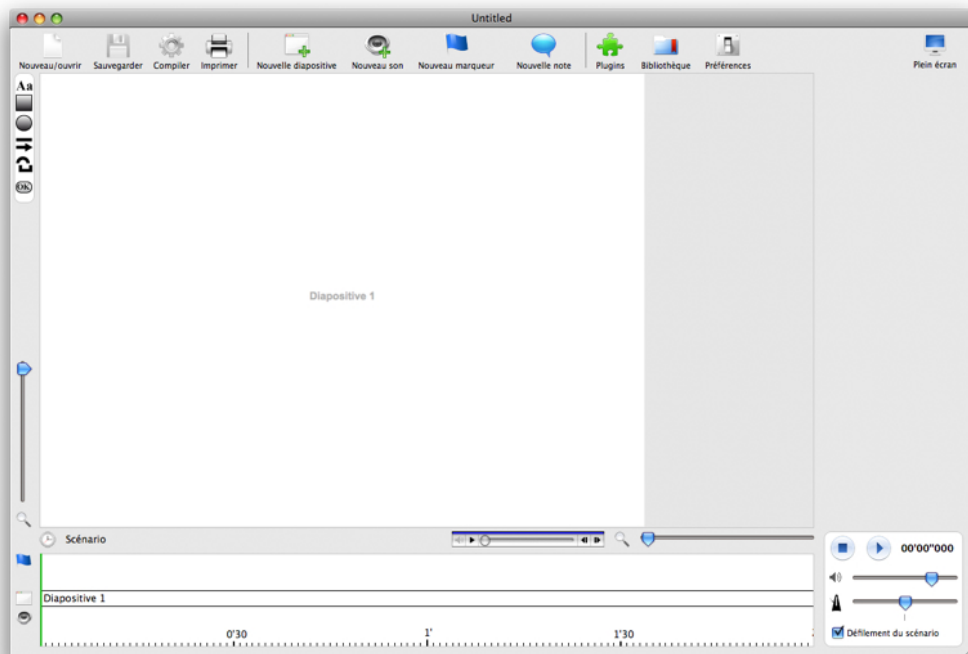


FIGURE B.1 – Première maquette, nommée Diapasonore et réalisée dans l’environnement Realbasic durant l’année 2005.

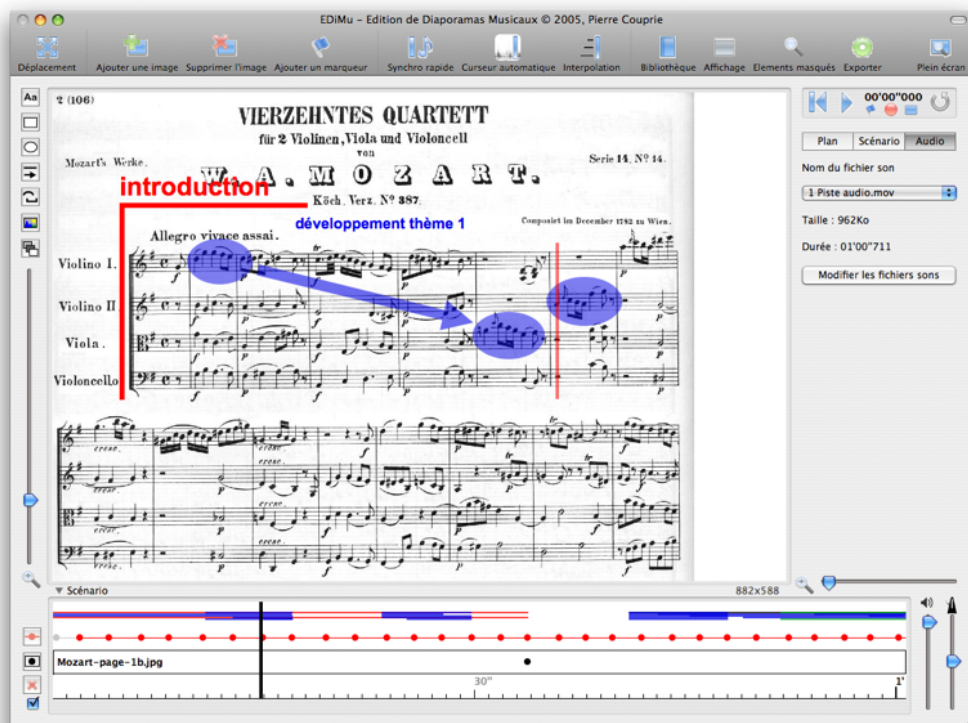


FIGURE B.2 – Première version publique, nommée EDiMu (Édition de diaporamas musicaux) et développée entre février 2006 et janvier 2007.



FIGURE B.3 – iAnalyze version 1, sortie en juin 2007. Première version, qui intègre des outils d'analyse.

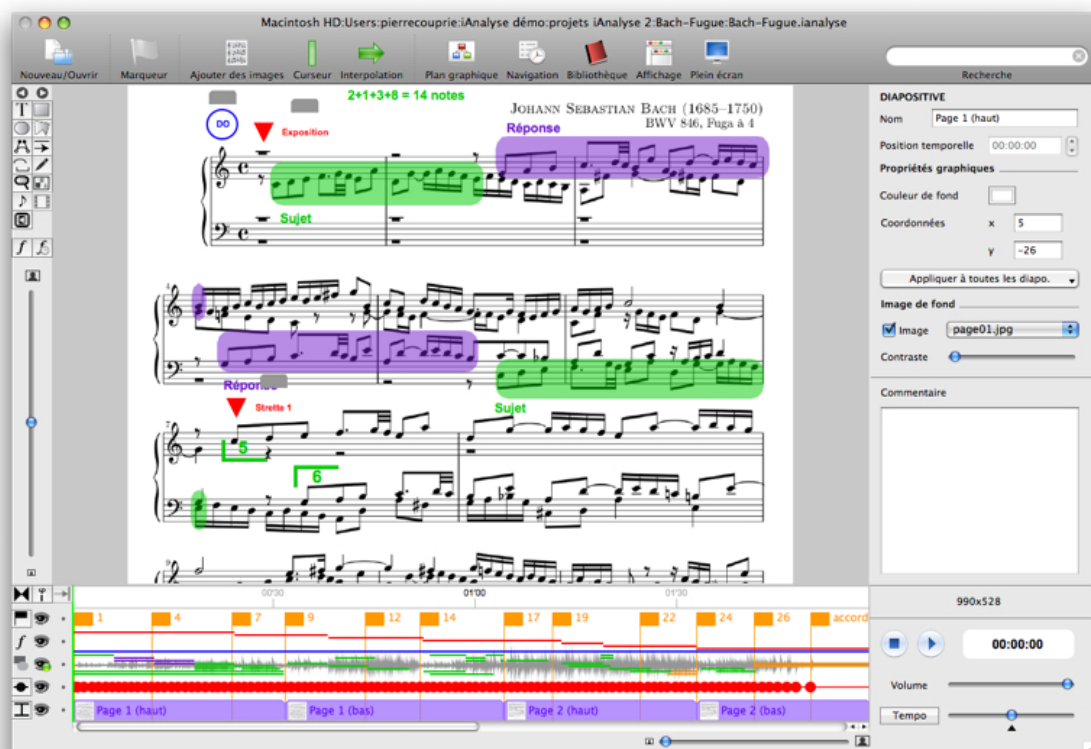


FIGURE B.4 – iAnalyze version 2, sortie en novembre 2008.

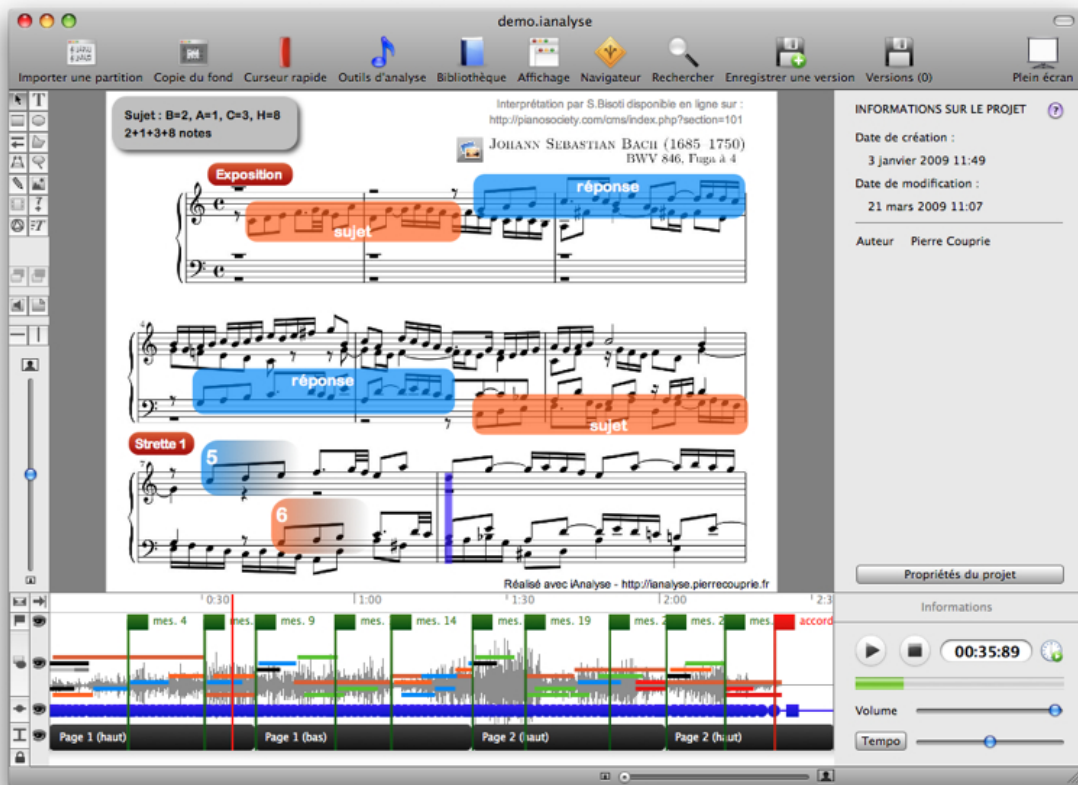


FIGURE B.5 – iAnalyze version 3, développée en objective-c dans l’environnement Xcode et sortie en février 2009.

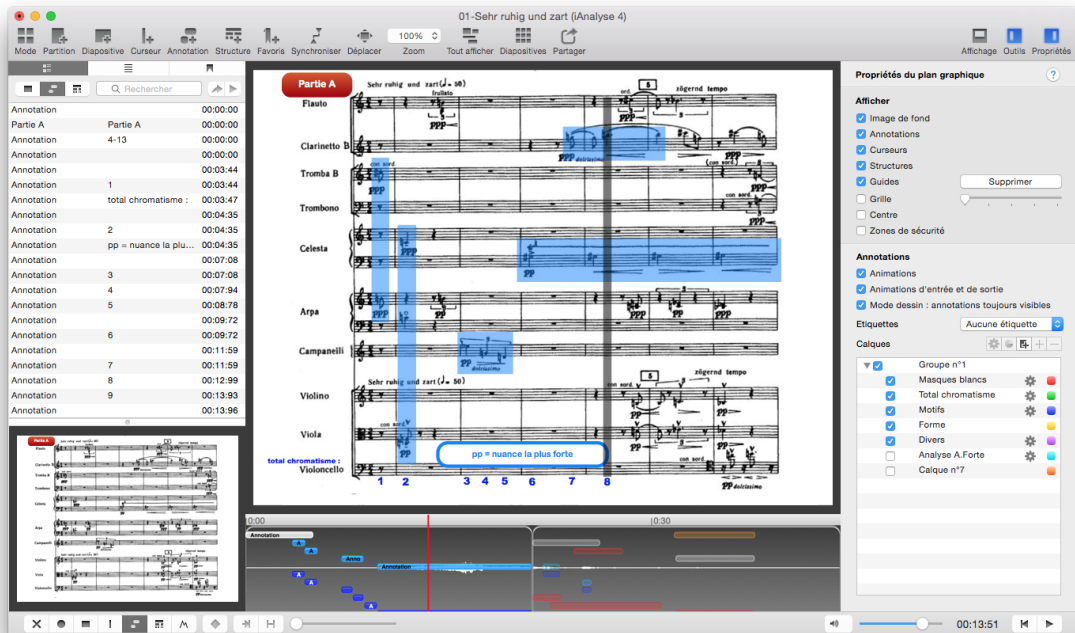


FIGURE B.6 – iAnalyze version 4, sortie en janvier 2013.

Annexe C

Les représentations spectrales produites par EAnalysis

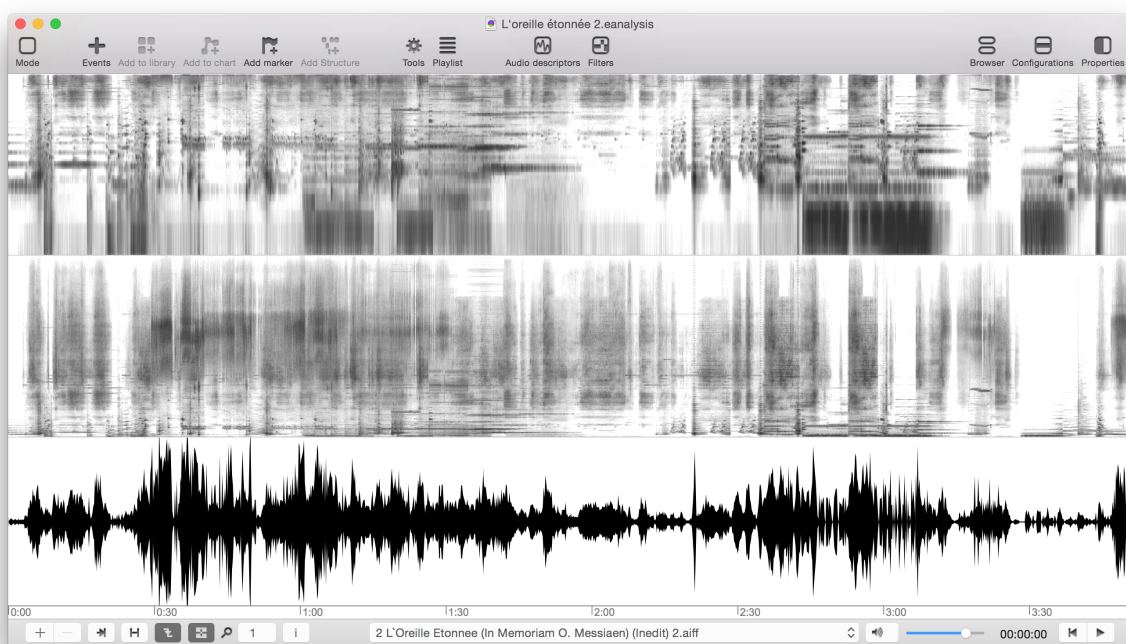


FIGURE C.1 – Exemple de représentations spectrales (de bas en haut) : forme d’onde, tracé du spectre linéaire, tracé du spectre logarithmique. Première partie (0’00 - 3’20) de *L’oreille étonnée* de François Bayle.

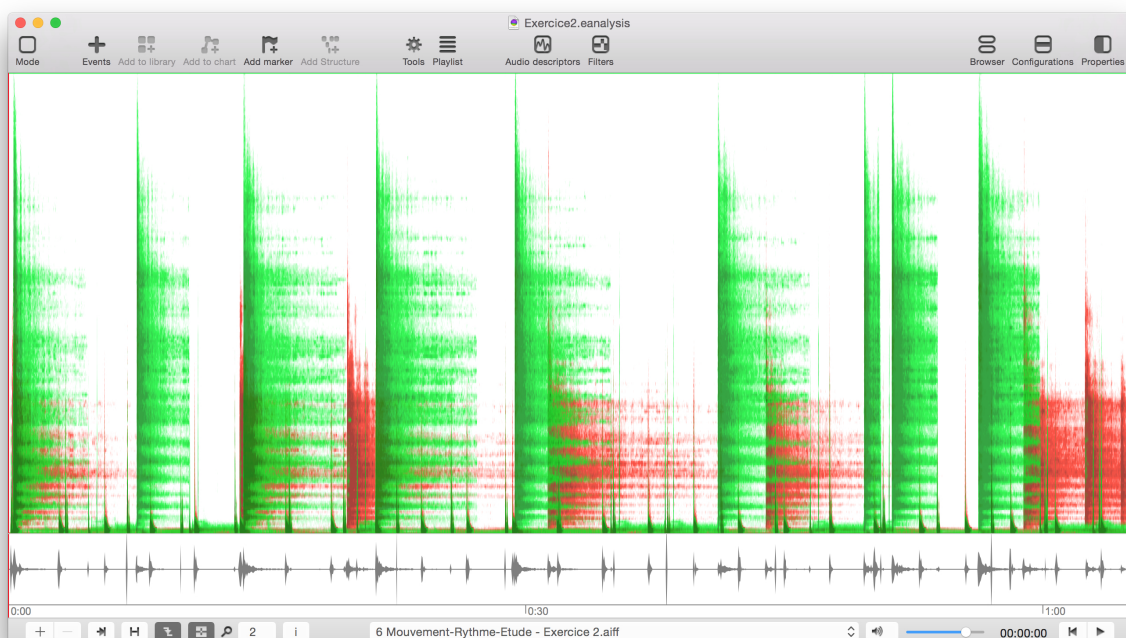


FIGURE C.2 – Exemple de superposition de spectres calculée à partir d’un fichier stéréophonique. « Exercice 2 » (0’00 - 1’15), extrait de *Mouvement-Rythme-Étude* de Pierre Henry.

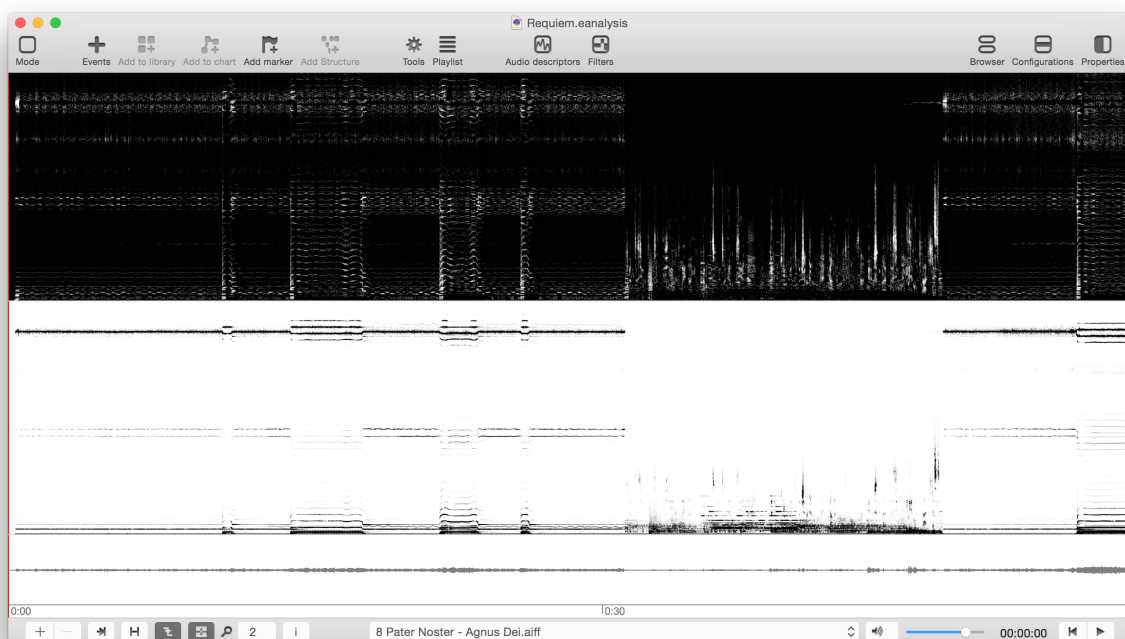


FIGURE C.3 – Exemple de sonagramme différentiel. « Pater Noster - Agnus Dei » (0'00 - 1'05), extrait du *Requiem* de Michel Chion.

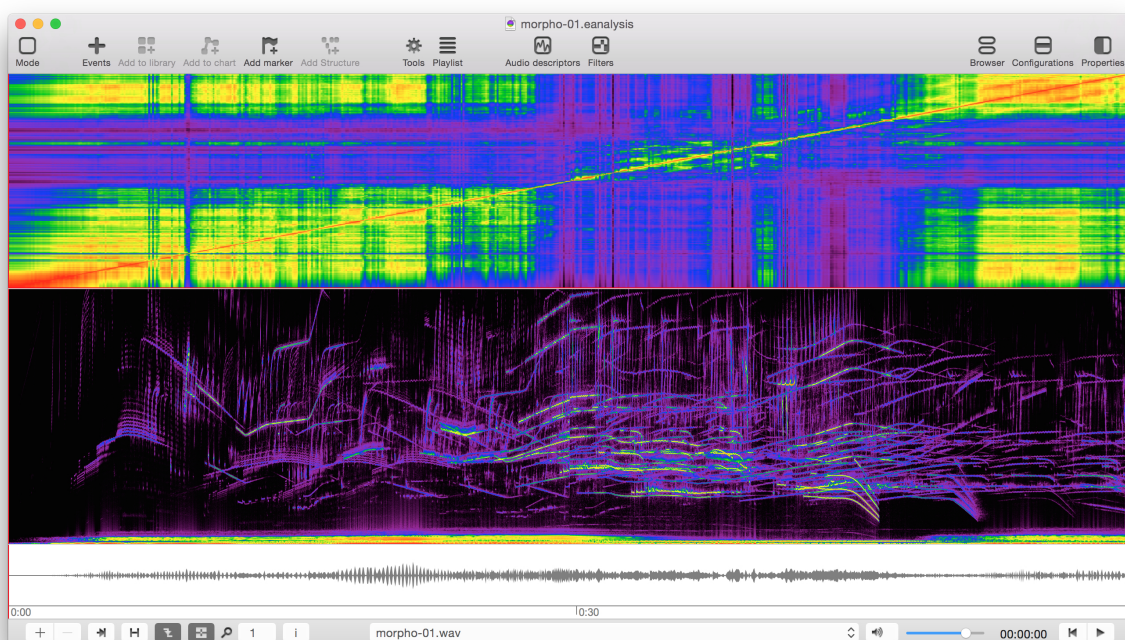


FIGURE C.4 – Exemple de matrice de similarité (en haut) calculée à partir de l'image sur tracé spectral linéaire. « Grandeur nature » (0'00 - 1'00), extrait de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle.

Annexe D

Les représentations de données produites par EAnalysis

Ces représentations ont été réalisées sur *Diamorphoses* de Iannis Xenakis (1957) à partir de descripteurs audio calculés depuis EAnalysis à l'aide du plugin LibXtract.

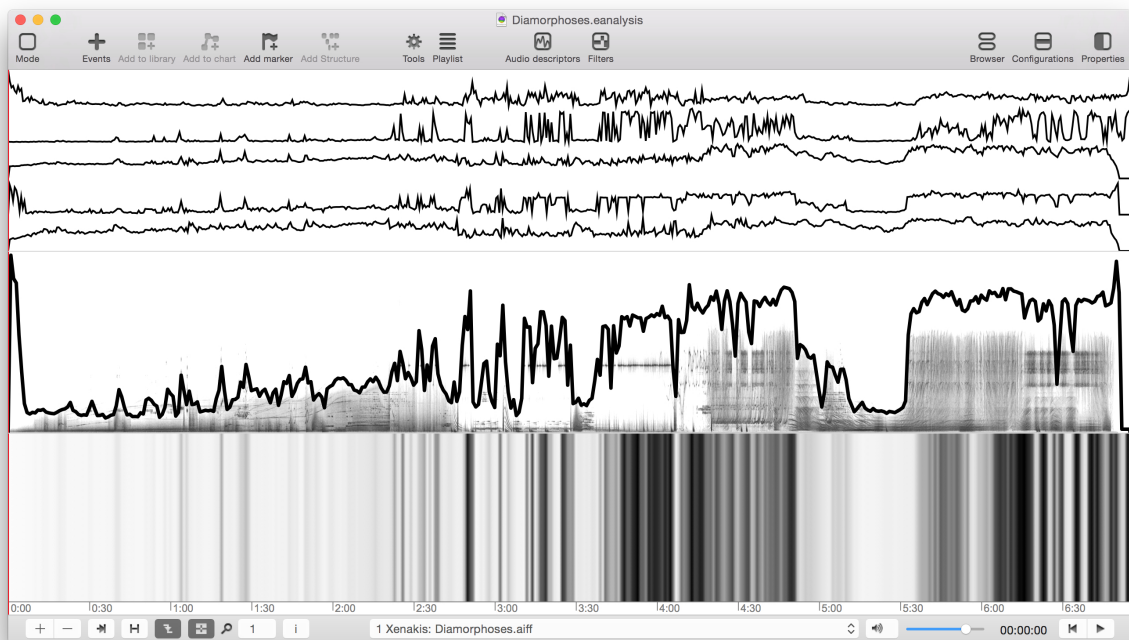


FIGURE D.1 – Exemple de représentations simples (de haut en bas) : cinq descripteurs (variance spectrale, inharmonicité, *spectral sharpness*, *spectral rolloff*, *loudness*), *spectral rolloff* sur sonagramme, inharmonicité en dégradés.

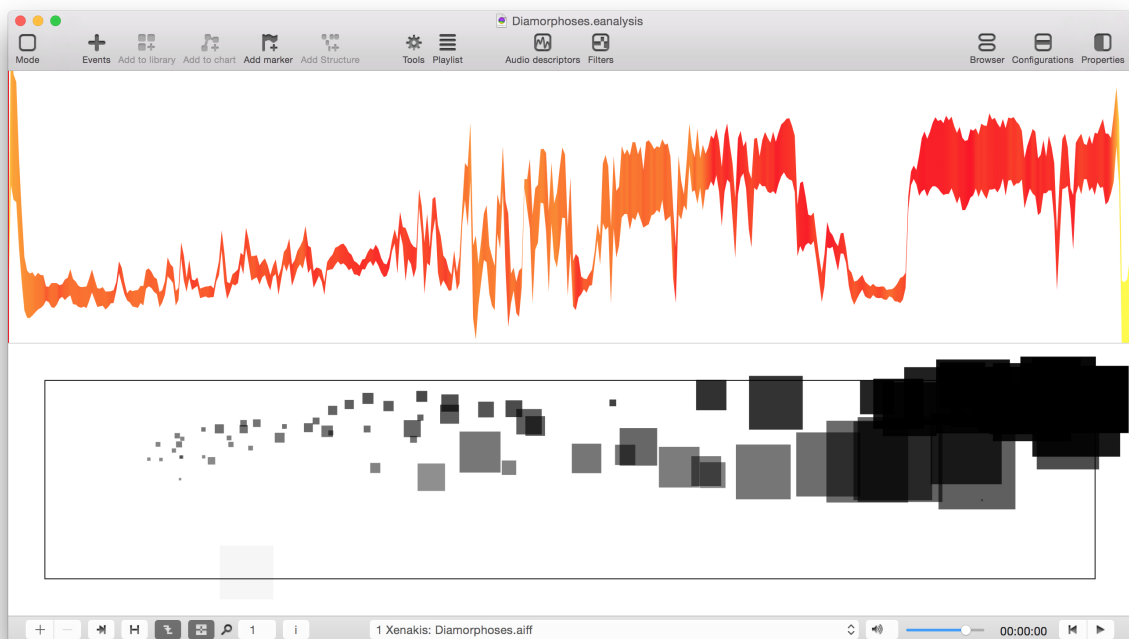


FIGURE D.2 – Exemple de représentations complexes (de haut en bas) : *Brightness Standard Deviation* (X : *spectral rolloff*, épaisseur de la ligne : variance spectrale, couleur : *loudness*) et graphique en nuage de points (X : *spectral rolloff*, Y : *loudness*, taille : inharmonicité, opacité : *spectral sharpness*).

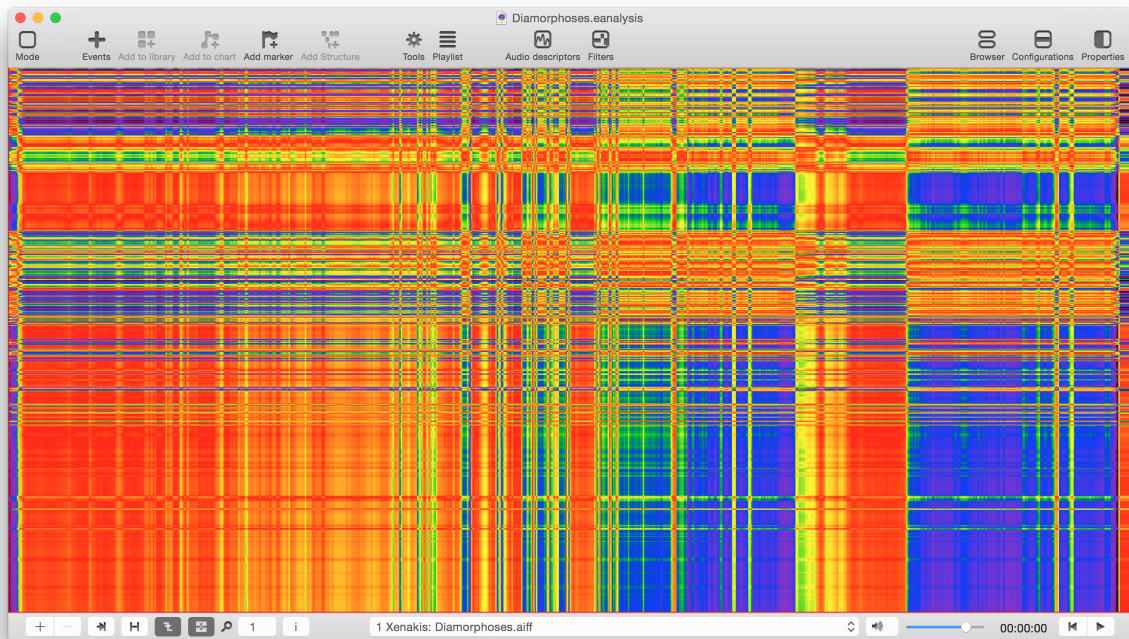


FIGURE D.3 – Exemple de matrice de similarité calculée à partir du *spectral rolloff* (X) et de l'inharmonicité (Y).



FIGURE D.4 – Exemple de matrice d'auto-similarité calculée à partir du *spectral rolloff*, de la variance spectrale et de l'inharmonicité.

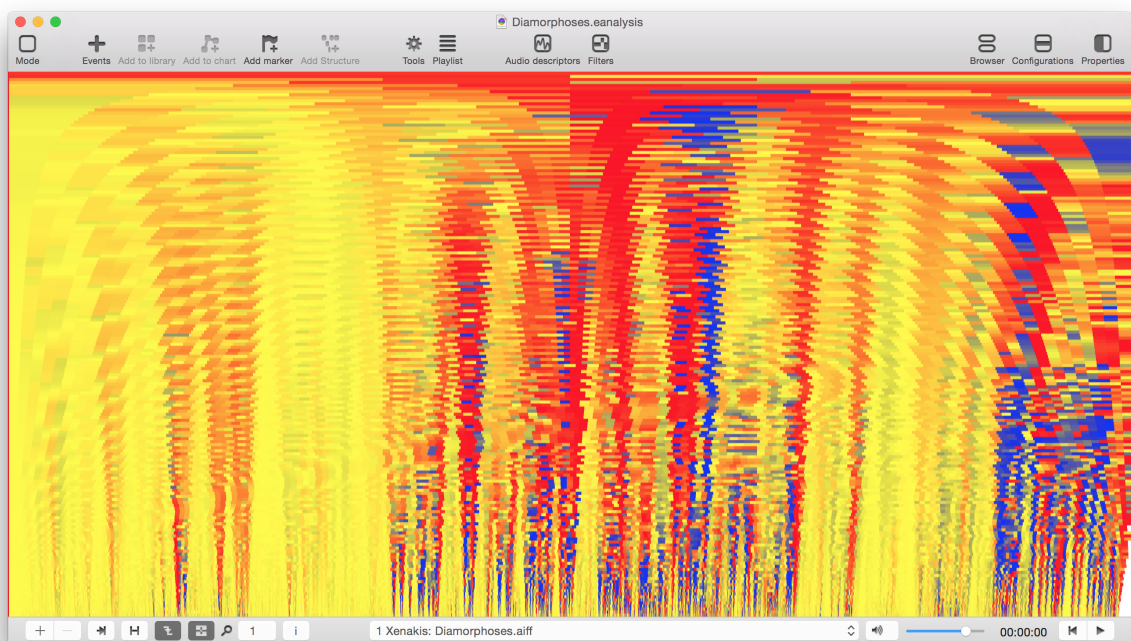


FIGURE D.5 – Exemple de graphique de corrélation hiérarchique calculée entre le *spectral rolloff* et l'inharmonicité (bleu = +1, jaune = 0, rouge = -1).

Annexe E

Les représentations de structures produites par EAnalysis

Ces graphiques de structures ont été réalisés à partir d'une segmentation automatique calculée dans Sonic Visualiser avec le plugin Vamp Segmenter développé par Mark Levy à l'Université Queen Mary de Londres. Les données ont ensuite été importées dans EAnalysis afin de créer les représentations. L'œuvre segmentée est *La 10^e symphonie de Beethoven* de Pierre Henry (1979).

Les paramètres suivants ont été utilisés avec le plugin Segmenter :

- *number of segment-types* : 12 ;
- *feature type* : *hybrid (constant-Q)* ;
- *minimum segment duration* : 10 secondes ;
- *channels* : *use mean of source channels* ;
- *audio frames per block* : 26460 ;
- *window increment* : 8820.

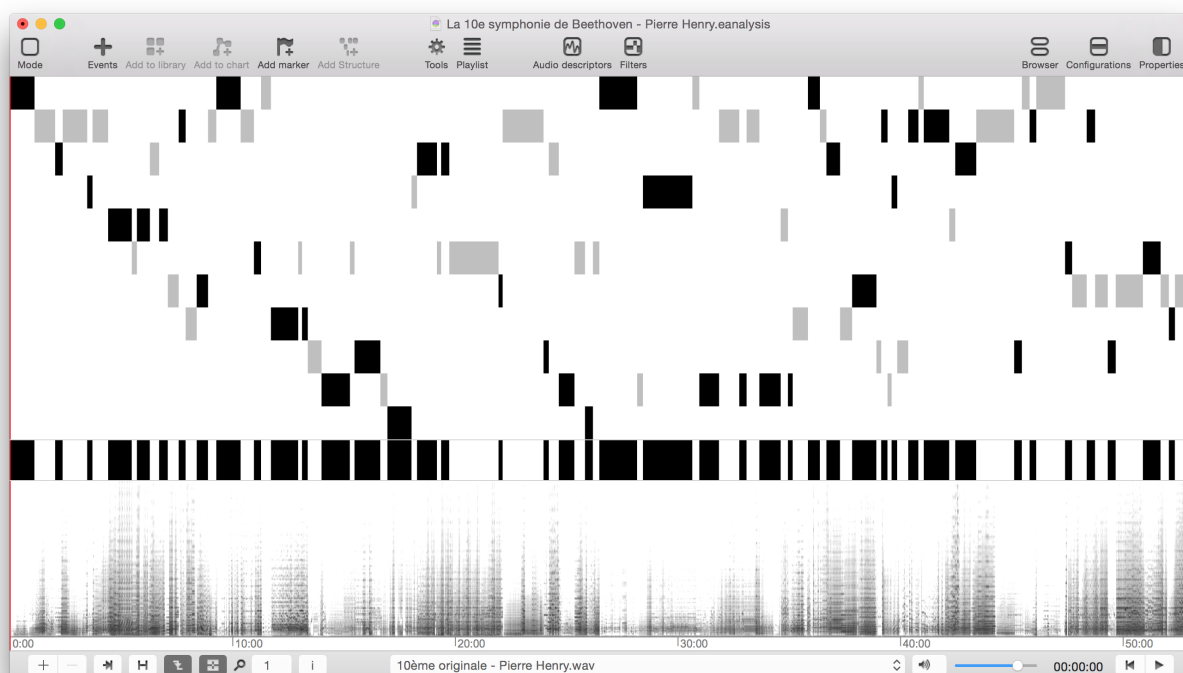


FIGURE E.1 – Exemple de représentation de la structure sous la forme d’un diagramme linéaire (milieu) et d’un diagramme formel (haut).

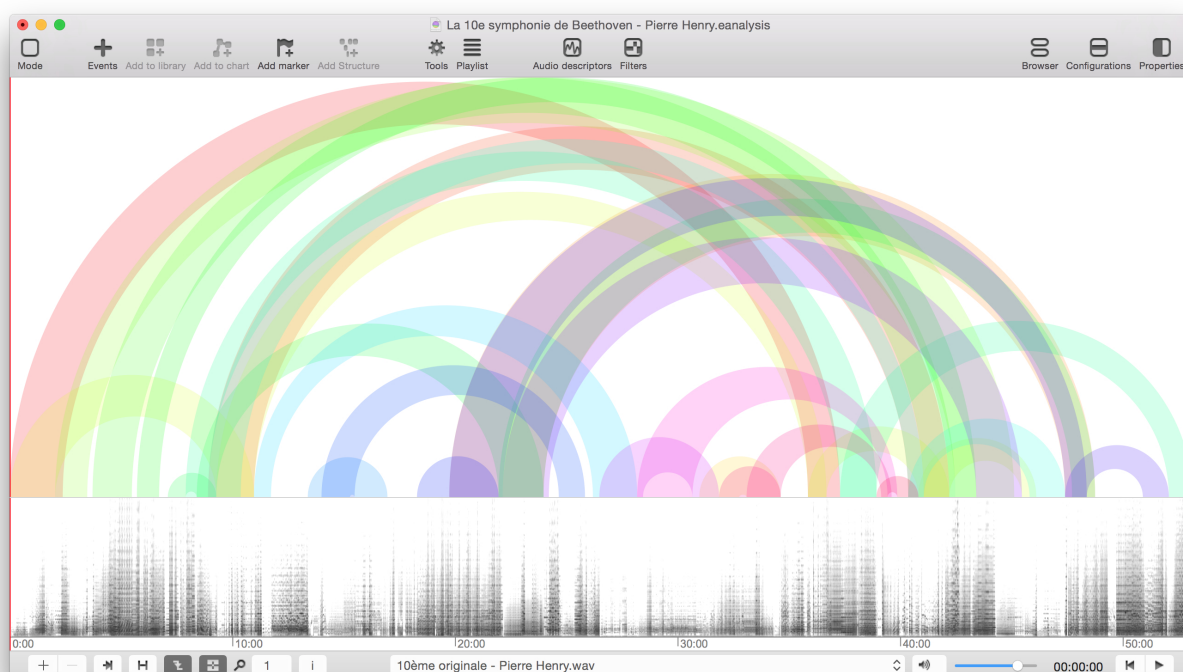


FIGURE E.2 – Exemple de représentation de la structure sous la forme d’un diagramme en arc.

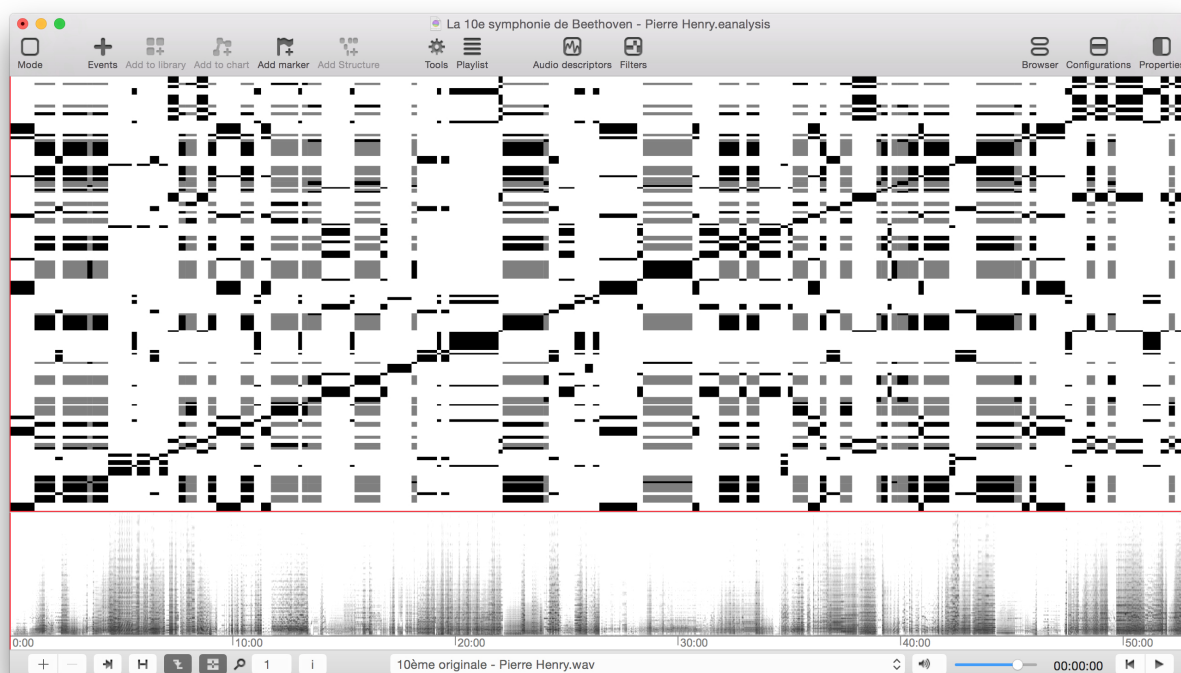


FIGURE E.3 – Exemple de représentation de la structure sous la forme d’une matrice de similarité.

Bibliographie

(Collectif), *Les unités sémiotiques temporelles*, Paris, Eska, 1996.

(Collectif), *La musique électroacoustique*, Paris, Hyptique/INA-GRM, 2000, cédérom.

(Collectif), *Hierarchical Correlation Plots*, Londres, King's College, 2009, <http://www.mazurka.org.uk/ana/timescape/>.

AROM, Simha, *La boîte à outils d'un ethnomusicologue*, Montréal, Presses de l'Université de Montréal, 2007.

BAGGI, Denis L., HAUS, Goffredo M., *Music Navigation with Symbols and Layers*, Hoboken, John Wiley, 2013.

BATTIER, Marc, « Sculpter la transparence. L'écriture, le geste, l'environnement », *Les cahiers de l'Ircam, Composition et environnements informatiques*, n° 1, 1992, p. 57-75.

BATTIER, Marc, COUPRIE, Pierre, « L'Acousmographe : un outil pour l'analyse informatique de documents sonores », *Les cahiers de l'OMF*, n° 4, 1999, p. 59-63.

BATTIER, Marc, « A Constructivist Approach to the Analysis of Electronic Music and Audio Art – Between Instruments and Faktura », *Organised Sound*, vol. 8, n° 3, 2003, p. 249-255.

BAUDOIN, Olivier, « La faktura, “outil conceptuel d'analyse” - Illustration avec *Stria*, de John Chowning », in *Journées d'informatique musicale*, Grenoble, ACROE, 2009, p. 77-83.

BAYLE, François, *Musique acousmatique propositions. . . . positions*, Paris, INA-GRM/Buchet Chastel, 1993.

BAYLE, François, « Où (en) sommes-nous ? », *Lien, L'espace du son III*, 2011, p. 133-142.

BAYLE, François, *50 ans d'acousmatique*, Paris, INA-GRM/Magison, 2012, INA G 6033/6047.

BERRY, Gérard, *Pourquoi et comment le monde devient numérique*, Paris, Collège de France/Fayard, 2008.

BERRY, Gérard, « Parler du temps, mais de façon formelle », in H. Vinet (éd.) *Produire le temps*, Paris, Hermann, 2014, p. 51-71.

- BESSON, Dominique, *Les musicographies*, Paris, INA-GRM/38^{es} Rugissants/Mois du graphisme d'Échirolles, 1995, cédérom.
- BEVILACQUA, Frédéric, ZAMBORLIN, Bruno, SYPNIEWSKI, Anthony, SCHNELL, Norbert, GUÉDY, Fabrice, RASAMIMANANA, Nicolas, « Continuous Realtime Gesture Following and Recognition », in S. Kopp, I. Wachsmuth (éd.) *Gesture in Embodied Communication and Human-Computer Interaction*, Berlin, Springer Verlag, 2009, p. 73-84.
- BLACKBURN, Manuella, « The Visual Sound-Shapes of Spectromorphology: An Illustrative Guide to Composition », *Organised Sound*, vol. 16, n° 1, 2011, p. 5-13.
- BOURGINE, Paul, LESNE, Annick, « Introduction », in *Morphogenèse. L'origine des formes*, Paris, Belin, 2006, p. 13-26.
- CHION, Michel, REIBEL, Guy, *Les musiques électroacoustiques*, Paris, Édisud/INA-GRM, 1976.
- CHION, Michel, *Guide des objets sonores*, Paris, Buchet-Chastel/INA-GRM, 1983.
- CHION, Michel, *Guide To Sound Objects. Pierre Schaeffer and Musical Research*, Traduction en anglais par John Dack et Christine North, 2/2009, <http://www.ears.dmu.ac.uk>.
- CHION, Michel, « Les deux espaces de la musique concrète », *L'espace du son*, vol. 1, 1998, p. 31-33.
- CHOUVEL, Jean-Marc, « Polyphonie/polysémie. Comment aborder la multidimensionnalité du temps musical ? », in J.-M. Chouvel, F. Lévy (éd.) *Peut-on parler d'art avec les outils de la science ?*, Paris, L'Harmattan/Ircam, 2002, p. 287-309.
- CHOUVEL, Jean-Marc, *Analyse musicale. Sémiologie et cognition des formes temporelles*, Paris, L'Harmattan, 2006.
- CHOUVEL, Jean-Marc, BRESSON, Jean, AGON, Carlos, « L'analyse musicale différentielle : principes, représentation et application à l'analyse de l'interprétation », in *Electroacoustic Music Studies Network*, Leicester, De Montfort University, 2007, <http://www.ems-network.org/IMG/JMChouvelEMS07/index.html>.
- CLARKE, Michael, *Extending Interactive Aural Analysis: Acousmatic Music*, 2009, <http://eprints.hud.ac.uk/16403/1/clarke.pdf>.
- CLARKE, Michael, « Wind Chimes: An Interactive Aural Analysis », in *Portrait polychrome Denis Smalley*, Paris, INA-GRM, 2010, p. 35-57.
- CLARKE, Michael, *Analysing Electroacoustic Music: An Interactive Aural Approach, Music Analysis*, n° 31, 2012, p. 347-380.
- COGAN, Robert, *New Images of Musical Sound*, Cambridge, Harvard University Press, 1984.
- COOK, Nicholas, CLARKE Eric, « Introduction: What is Empirical Musicology? », in N. Cook, E. Clarke (éd.) *Empirical musicology Aims, methods, prospects*, Oxford, Oxford University Press, 2004, p. 3-14.

- COOK, Nicholas, *Beyond the Score Music as Performance*, Oxford, Oxford University Press, 2014.
- COOPER, Matthew L., FOOTE, Jonathan, « Media Segmentation using Self-Similarity Decomposition », in *Electronic Imaging*, Bellingham, SPIE Press, 2003, p. 167-175.
- COUPRIE, Pierre, *La terminologie du genre électroacoustique*, Mémoire de DEA sous la direction de Jean-Yves Bosseur, Paris, Université Paris-Sorbonne, 1998.
- COUPRIE, Pierre, « Trois modèles d'analyse de "L'Oiseau moqueur", un des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle », *Les cahiers de l'OMF*, n° 3, 1998, p. 50-70.
- COUPRIE, Pierre, « Comment c'est fait ? Analyse graphique d'un extrait de *De Natura Sonorum* de Bernard Parmegiani », in *La musique électroacoustique*, Paris, INA-GRM/Hyptique, 2000, cédérom.
- COUPRIE, Pierre, « Transformation/transmutation. Analyse d'un extrait de *Don Quichotte Corporation* d'Alain Savouret », in *La musique électroacoustique*, Paris, INA-GRM/Hyptique, 2000, cédérom.
- COUPRIE, Pierre, ZANÉSI, Christian, « Mixage. Analyse d'un extrait de *M.É.* de Philippe Leroux », in *La musique électroacoustique*, Paris, INA-GRM/Hyptique, 2000, cédérom.
- COUPRIE, Pierre, « La musique électroacoustique en concert : histoire et perspectives », in H. Ravet (éd.) *L'observation des pratiques musicales : méthodes et enjeux*, Paris, OMF, Université Paris-Sorbonne, 2001, p. 43-52.
- COUPRIE, Pierre, « Une typologie des séquences libres dans *Lumina* », in *Portrait polychrome Ivo Malec*, Paris, INA-GRM, 2001, <http://www.inagrm.com/categories/ivo-malec>.
- COUPRIE, Pierre, TOSI, Michèle, « *Vox vocis, f* », in *Portrait polychrome Ivo Malec*, Paris, INA-GRM, 2001, <http://www.inagrm.com/categories/ivo-malec>.
- COUPRIE, Pierre, TERUGGI, Daniel, « *Hétérozygote et les Presque rien* », in *Portrait polychrome Luc Ferrari*, Paris, INA-GRM, 2001, <http://www.inagrm.com/categories/luc-ferrari>.
- COUPRIE, Pierre, « Donner un élan pour l'écoute de l'œuvre. Introduction à la représentation de *Sud* de Jean-Claude Risset », in *Portrait polychrome Jean-Claude Risset*, Paris, INA-GRM, 2001, p. 79-82.
- COUPRIE, Pierre, « L'Acousmographe », in *Peut-on parler d'art avec les outils de la science ?*, Poster, Paris, 2001, inédit.
- COUPRIE, Pierre, « Un modèle d'analyse pour les musiques électroacoustiques », in *Journées d'informatique musicale*, Bourges, IMEB-ENSI, 2001, p. 195-205.
- COUPRIE, Pierre, « Le vocabulaire de l'objet sonore », in S. Dallet, A. Veitl (éd.) *Du sonore au musical. Cinquante années de recherches concrètes (1948-1998)*, Paris, L'Harmattan, Univers musical, 2001, p. 203-225.

COUPRIE, Pierre, *La musique électroacoustique : analyse morphologique et représentation analytique*, Thèse de doctorat sous la direction de Marc Battier, Paris, Université Paris-Sorbonne, 2003, http://www.pierrecouprie.fr/?page_id=764.

COUPRIE, Pierre, « Analyse comparée des *Trois rêves d'oiseau* de François Bayle », *Demeter*, 2003, <http://demeter.revue.univ-lille3.fr/analyse/couprie.pdf>.

COUPRIE, Pierre, « La place de l'informatique et du multimédia dans l'analyse des musiques électroacoustiques », in R. Barbanti, E. Lynch, C. Pardo, M. Solomos (éd.) *Musique, arts, technologies, pour une approche critique*, Paris, L'Harmattan, 2004, p. 361-374.

COUPRIE, Pierre, « Graphical Representation: An Analytical and Publication Tool for Electroacoustic Music », *Organised Sound*, vol. 9, n° 1, 2004, p. 109-113.

COUPRIE, Pierre, « Des outils pour l'analyse de la musique électroacoustique », in M. Battier, D. Pistone (éd.) *Analyse et contextualisation*, Paris, OMF, 2004, p. 63-73.

COUPRIE, Pierre, « Analyse de *Jukurpa - Quatre rêves* », *Musimédiane*, n° 1, 2005, <http://www.musimediane.com/spip.php?article3>.

COUPRIE, Pierre, « L'écoute et les technologies numériques », in F. Madurell (éd.) *Les pratiques d'écoute individuelles*, Paris, OMF, Université Paris-Sorbonne, 2005, p. 51-62.

COUPRIE, Pierre, « (Re)Presenting Electroacoustic Music », *Organised Sound*, vol. 11, n° 2, 2006, p. 119-124.

COUPRIE, Pierre, « Dessin en 3D et systèmes immersif pour la représentation de la musique électroacoustique », in *Electroacoustic Music Studies Network : The Language of Electroacoustic Music*, Leicester, De Montfort University, 2007, http://www.ems-network.org/IMG/pdf_CouprieEMS07.pdf.

COUPRIE, Pierre, « Une analyse détaillée de *Bohor* (1962) », in M. Solomos, A. Georgaki, G. Zervos (éd.) *Definitive Proceedings of the International Symposium Iannis Xenakis*, Athènes, 2007, p. 113-120.

COUPRIE, Pierre, « iAnalyse : un logiciel d'aide à l'analyse musicale », in *Journées d'Informatique Musicale*, GMEA, Albi, 2008, p. 115-121.

COUPRIE, Pierre, « Analyser la musique électroacoustique avec le logiciel iAnalyse », *Electronic Music Studies Network*, Paris, Université Paris-Sorbonne, 2008, <http://www.ems-network.org/ems08/papers/couprie.pdf>.

COUPRIE, Pierre, « La représentation graphique : un outil d'analyse et de publication de la musique électroacoustique », *Doce Notas*, n° 19-20, Madrid, 2009, p. 349-356.

COUPRIE, Pierre, « Représenter l'espace ? », *L'espace du son*, n° 3, 2010, p. 21-28.

COUPRIE, Pierre, « Utilisations avancées du logiciel iAnalyse pour l'analyse musicale », in *Journées d'Informatique Musicale*, Rennes, Université de Rennes 2, 2010, p. 113-118.

COUPRIE, Pierre, « Improvisation électroacoustique : analyse musicale, étude génétique et perspectives numériques », *Revue de Musicologie*, vol. 98, n° 1, 2012, p. 149-170.

COUPRIE, Pierre, « EAnalysis : aide à l'analyse de la musique électroacoustique », in *Journées d'Informatique Musicale*, Mons, Numediart, 2012, p. 183-189.

COUPRIE, Pierre, « Quelques pistes pour analyser la structure de *La fleur future* de François Bayle », in M. Erbe, C. von Blumröder (éd.) *Die Klangwelt des François Bayle*, Vienne, Verlag Der Apfel, 2012, p. 205-209.

COUPRIE, Pierre, « Cartes et tableaux interactifs : nouveaux enjeux pour l'analyse des musiques électroacoustiques », in *Journées d'informatique musicale*, Paris, Université Paris 8, 2013, p. 97-102, http://www.mshparisnord.fr/JIM2013/actes/jim2013_12.pdf.

COUPRIE, Pierre, « Prolegomènes à la représentation analytique des musiques électroacoustiques », *Circuit*, vol. 25, n° 1, 2015, p. 41-57.

COUPRIE, Pierre, « Représentations analytiques avancées avec EAnalysis », in *Journées d'informatique musicale*, Montréal, Université de Montréal, 2015, http://jim2015.oicrm.org/actes/JIM15_Couprrie_P.pdf.

COUPRIE, Pierre, « Voyage dans "Grandeur nature", première partie de *Son Vitesse-Lumière* de François Bayle », in F. Bayle (éd.) *Son Vitesse-Lumière*, Paris, Delatour, en préparation.

COUPRIE, Pierre, « 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, en préparation.

COUPRIE, Pierre, « Le développement d'un outil d'aide à l'analyse musicale : bilan et perspectives musicologiques », in N. Marty (éd.) *Musique électroacoustique : analyse-écoute*, Paris, Delatour, en préparation.

COUPRIE, Pierre, « Les paysages sonores dans *Elephant* de Gus Van Sant », in L. Stransky, H. Zenouda (éd.) *The Medium is the Message*, Université de Toulon/Ville de Plaisir, en préparation.

COUPRIE, Pierre, « Analyser l'imaginaire dans la musique électroacoustique de Jean-Claude Risset », in M. Grabócz (éd.) *Modèles naturels et scénarios imaginaires dans les œuvres de Péter Eötvös, François-Bernard Mâche et Jean-Claude Risset*, Université de Strasbourg/CDMC, en préparation.

COUPRIE, Pierre, SOUSA DIAS, António de, « *Vertiges de l'espace* : analyse d'une performance électroacoustique improvisée », in *Comment analyser l'improvisation ?*, Paris, Delatour, en préparation.

COUPRIE, Pierre, « L'objet sonore est-il encore un concept utile pour l'analyse de la musique électroacoustique ? », in *Corpus et méthodes : traductions théoriques de l'hétérogénéité musicale*, Paris, Delatour, en préparation.

COUPRIE, Pierre, « Analyser la musique mixte : vers une redéfinition des *workflows* en musicologie », in M. Battier (éd.) *Regards sur la musique mixte*, Paris, en préparation.

COUPRIE, Pierre, « Analyse de la musique mixte : logiciels, procédures, *workflows* », in B. Bossis, A. Bonardi, P. Couprie, V. Tiffon (éd.) *Analyse de la musique mixte*, Paris, Delatour, en préparation.

DACK, John, « Excentric Sounds/Balanced Sounds and the “Sublime” » in *Electroacoustic Music Studies Network*, Paris, Université Paris-Sorbonne/INA-GRM, 2008, <http://www.ems-network.org/ems08/papers/dack.pdf>.

DALMEDICO, Amy Dahan, « Variations sur les modèles en sciences », in J.-M. Chouvel, F. Lévy (éd.) *Peut-on parler d’art avec les outils de la science ?*, Paris, L’Harmattan/Ircam, 2002, p. 111-119.

DAOUST, Yves, « Pensée concrète, démarche abstraite », *Circuit*, vol. 11, n° 1, 2000, p. 34-42

DARBON, Nicolas, *Les musiques du chaos*, Paris, L’Harmattan, 2006.

DELALANDE, François, « Pratiques et objectifs des transcriptions des musiques électroacoustiques », in R. Campos, N. Donin (éd.) *L’analyse musicale, une pratique et son histoire*, Genève, Droz/HEM, 2009, p. 131-153.

DELALANDE, François, *Transcription de repérage de « Sommeil », de Pierre Henry*, Paris, INA, 2013, <http://www.institut-national-audiovisuel.fr/sites/ina/medias/upload/grm/mini-sites/acousmographies/co/sommeil.html>.

DELALANDE, François, *Analyser la musique, pourquoi, comment ?*, Paris, INA, 2013.

DESAINTE-CATHERINE, Myriam, DI SANTO, Jean-Louis, « L’Acousmoscribe, un éditeur de partitions acousmatiques », in *Electroacoustic Music Studies Network*, Buenos Aires, UNTREF, 2009, <http://www.ems-network.org/ems09/papers/disanto.pdf>.

DI SANTO, Jean-Louis, « Harmonic Profile: Typology and Notation », in *Electroacoustic Music Studies Network*, New York, 2011, http://www.ems-network.org/IMG/pdf/EMS11_di_santo.pdf.

DONIN, Nicolas, « Vers une musicologie des processus créateurs », *Revue de Musicologie*, vol. 98, n° 1, 2012, p. 5-14.

DONIN, Nicolas, FENEYROU, Laurent, « Introduction », in N. Donin, L. Feneyrou (éd.) *Théories de la composition musicale au XX^e siècle*, vol. 1, Paris, Symétrie, 2013, p. 5-20.

DUFOUR, Denis, « Analyse et transcription de l’*Étude aux objets* », in *Portrait polychrome Pierre Schaeffer*, Paris, INA-GRM, 2008, <http://www.inagrm.com/categories/pierre-schaeffer>.

DUFOURT, Hugues, *Musique, pouvoir, écriture*, Paris, Christian Bourgois, 1991.

EMMERSON, Simon, « The Relation of Language to Materials », in S. Emmerson (éd.) *The Language of Electroacoustic Music*, Basingstoke, Palgrave Macmillan, 1986., p. 17-39

- FAVREAU, Emmanuel, GESLIN, Yann, LEFÈVRE, Adrien, « L'Acousmographe 3 », in *Journées d'informatique musicale*, Rennes, Université de Rennes, 2011, p. 105-111.
- FÉRON, François-Xavier, BOUTARD, Guillaume, « Construction d'une enquête sur l'interprétation des musiques acousmatiques », in *Journées d'informatique musicale*, Montréal, Université de Montréal, 2015, http://jim2015.oicrm.org/actes/JIM15_Feron_F-X_et_al.pdf.
- FISCHMAN, Rajmil, *Score of Point-virgule*, Montréal, 1999, <http://cec.sonus.ca/econtact/SAN/Fischman.htm>.
- FOBER, Dominique, ORLAREY, Yann, LETZ, Stéphane, « INScore – An Environment for the Design of Live Music Scores », in *Proceedings of the Linux Audio Conference*, Stanford, CCRMA, 2012, p. 47-54.
- FOBER, Dominique, BRESSON, Jean, COUPRIE, Pierre, GESLIN, Yann, « Les nouveaux espaces de la notation musicale », in *Journées d'informatique musicale*, Montréal, Université de Montréal, 2015, http://jim2015.oicrm.org/actes/JIM15_Fober_D_et_al.pdf.
- FRANCK Robert J, « Temporal Elements: A Cognitive System of Analysis for Electro-Acoustic Music », *Journal SEAMUS*, vol. 15, n° 2, 2001, p. 194-197.
- GESLIN, Yann, « Le studio 123 », in *Portrait polychrome Jean-Claude Risset*, Paris, INA-GRM/CDMC, 2001, <http://www.inagram.com/accueil/collections/portraits-polychromes?page=3>.
- GESLIN, Yann, SPRENGER-OHANA, Noémie, « Abstraction et symbolisation dans la représentation des musiques électroacoustiques : un exemple de transcription à niveaux multiples de *L'oiseau moqueur* réalisé à l'aide de l'Acousmographe », in *Electroacoustic Music Studies Network*, Paris, Université Paris-Sorbonne/INA-GRM, 2008, <http://www.ems-network.org/ems08/papers/geslin-sprenger-ohana.pdf>.
- GIOMI, Francesco, LIGABUE, Marco, « Understanding Electroacoustic Music: Analysis of Narrative Strategies in Six Early Compositions », *Organised Sound*, vol. 3, n° 1, 1998, p. 45-49.
- GREIMAS, Algirdas Julien, COURTÉS, Joseph, *Sémiotique. Dictionnaire raisonné de la théorie du langage*, Paris, Hachette, 1993.
- GULLUNI, Sébastien, *Un système interactif pour l'analyse des musiques électroacoustiques*, Thèse de doctorat sous la direction de Gaël Richard, Paris, Télécom ParisTech, 2011, <https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00676691/document>.
- GULLUNI, Sébastien, BUISSON, Olivier, ESSID, Slim, RICHARD, Gaël, « An Interactive System for Electro-Acoustic Music Analysis », in *ISMIR*, Miami, Université de Miami, 2011, p. 145-150.
- HIRST, David, « Developing an Interactive Study Score for the Analysis of Electro-Acoustic Music » in *Proceedings of Australasian computer music conference*, Brisbane, ACMA, 2005, p. 85-88.
- HIRST, David, « From Sound Shapes to Space-Form: Investigating the Relationships Between Smalley's Writings and Works » *Organised sound*, vol. 16, n° 1, 2011, p. 42-53.

- KLIEN, Volkmar, GRILL, Thomas, FLEXER, Arthur, « On Automated Annotation of Acousmatic Music », *Journal of New Music Research*, vol. 41, n° 2, 2012, p. 153-173.
- LALITTE, Philippe, « Towards a Semiotic Model of Mixed Music Analysis », *Organised Sound*, vol. 11, n° 2, 2006, p. 99-106.
- LALITTE, Philippe, « Du son au sens : vers une approche subsymbolique de l'analyse musicale assistée par ordinateur », *Musurgia*, vol. 18, n° 1-2, 2011, p. 99-116.
- LANDY, Leigh, « The “Something to Hold on to Factor” in Timbral Composition », *Contemporary Music Review*, vol. 10, n° 2, 1994, p. 49-60.
- LANDY, Leigh, *Understanding the Art of Sound Organization*, Cambridge, MIT Press, 2007.
- LARTILLOT, Olivier, CEREGHETTI, Donato, ELIARD, Kim, GRANDJEAN, Didier, « A Simple, High-Yield Method for Assessing Structural Novelty », in *International Conference on Music Emotion*, Finlande, Université de Jyväskylä, 2013, p. 1-9.
- LEPHAY, Pierre-Emmanuel, « La prise de son et le mixage, élément de l'interprétation : les exemples de Herbert von Karajan et Glenn Gould », in P.-H. Frangne, H. Lacombe (éd.) *Musique et enregistrement*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 2014, p. 113-122.
- MÂCHE, François-Bernard, *Musique au singulier*, Paris, Odile Jacob, 2001.
- MAGNUSSON, Thor, HURTADO, Enrike, « The Phenomenology of Musical Instruments: A Survey », *eContact!* vol. 10, n° 4, 2008, http://cec.sonus.ca/econtact/10_4/magnusson_hurtado_survey.html.
- MALT, Mikhail, JOURDAN, Emmanuel, « Real-Time Uses of Low Level Sound Descriptors as Event Detection Functions Using the Max/MSP Zsa.Descriptors Library », in M. Pimenta, D. Keller, R. Faria, M. Queiroz, G. Ramalho, G. Cabral (éd.) *12th Brazilian Symposium on Computer Music (SBCM)*, Recife, NUCOM/SBC, 2009, p. 45-56.
- MALT, Mikhail, JOURDAN, Emmanuel, « Le “BStD” – une représentation graphique de la brillance et de l'écart type spectral, comme possible représentation de l'évolution du timbre sonore », in X. Hascher, M. Ayari, J.-M. Bardez (éd.), *L'analyse musicale aujourd'hui*, Paris, Delatour, 2015, p. 111-128.
- MAYS, Tom, FABER, Francis, « A Notation System for the Karlix Controller », in B. Caramiaux, K. Tahiroğlu, R. Fiebrink, A. Tanaka (éd.) *New Interfaces for Musical Expression*, Londres, Université de Goldsmiths, 2014, p. 553-556.
- MCGREGOR, Iain, TURNER, Phil, BENYON, David, « Using Participatory Visualisation of Soundscapes to Compare Designers' and Listeners' Experiences of Sound Designs », *Journal of Sonic Studies*, vol. 6, 2014, <http://journal.sonicstudies.org/vol06/nr01/a08>.
- MION, Philippe, NATTIEZ, Jean-Jacques, THOMAS, Jean-Christophe, *L'envers d'une œuvre. De Natura Sonorum de Bernard Parmegiani*, Paris, INA-GRM/Buchet Chastel, 1982.

MOLINO, Jean, « La musique et l'objet », in *Ouïr, entendre, écouter, comprendre après Schaeffer*, Paris, INA-GRM/Buchet-Chastel, 1999, p. 119-136.

MORIN, Edgar, *Introduction à la pensée complexe*, Paris, Seuil, 2005.

MORIN, Edgar, *La méthode I*, Paris, Seuil, 2/2008.

MORRISON, Landon, « Graphical Music Representations: A Comparative Study Based on the Aural Analysis of Philippe Leroux's *M.É.* », in *Electroacoustic Music Studies Network*, Berlin, Universität der Künste, 2014, http://www.ems-network.org/IMG/pdf_EMS14_morrison.pdf.

MURAIL, Tristan, « La révolution des sons complexes », in P. Michel (éd.) *Modèles et artifices*, Strasbourg, Presses universitaires de Strasbourg, 2004, p. 11-29.

NATTIEZ, Jean-Jacques, *Musicologie générale et sémiologie*, Paris, Christian Bourgois, 1987.

NORMANDEAU, Robert, « Spectromorphology of Denis Smalley », in *Portrait polychrome Denis Smalley*, Paris, INA-GRM, 2010, p. 79-88.

PATTON, Kevin, « Morphological Notation for Interactive Electroacoustic Music », *Organised Sound*, vol. 12, n° 2, 2007, p. 123-128.

PEIRCE, Charles S., *Écrits sur le signe*, Paris, Seuil, 1978.

PLANEL, Hélène, MERLIER, Bertrand, BAYLE, François, DONATO, François, FAVRE, Marc, DUFOUR, Denis, « L'interprétation des œuvres acousmatiques », *Ars Sonora*, n° 4, 1996, <http://www.ars-sonora.org/html/numeros/numero04/04e.htm>.

RÉGNAULT, Cécile, « Correspondances entre graphisme et son : les représentations visuelles de "l'objet sonore" », in S. Dallet, A. Veitl (éd.) *Du sonore au musical. Cinquante années de recherches concrètes (1948-1998)*, Paris, L'Harmattan, 2001, p. 307-337.

RISSET, Jean-Claude, « Problèmes posés par l'analyse d'œuvres musicales dont la réalisation fait appel à l'informatique », in *Analyse et création musicales*, Paris, L'Harmattan, 2001, p. 131-160.

RISSET, Jean-Claude, « Pierre Schaeffer et l'ordinateur », in *Portrait polychrome Pierre Schaeffer*, Paris, INA-GRM, 2008, p. 45-56.

ROY, Stéphane, *L'analyse des musiques électroacoustiques : modèles et propositions*, Paris, L'Harmattan, 2003.

SCHAEFFER, Pierre, *À la recherche d'une musique concrète*, Paris, Seuil, 1952.

SCHAEFFER, Pierre, *Traité des objets musicaux*, Paris, Seuil, 1966.

SCHAEFFER, Pierre, REIBEL, Guy, FERREYRA, Beatriz, *Solfejo do objecto sonoro*, Traduction portugaise par António De Sousa Dias, 3/2007, <http://www.ears.dmu.ac.uk>.

SCHAEFFER, Pierre, *La musique concrète*, Paris, PUF, Que sais-je ?, 1967.

- SCHAEFFER, Pierre, REIBEL, Guy, FERREYRA, Beatriz, *Solfège de l'objet sonore*, Paris, INA-GRM, 2/1998.
- SCHAEFFER, Pierre, *De la musique concrète à la musique même*, Québec, Mémoire du livre, 2/2002.
- SCHAFER, R. Murray, *Le paysage sonore*, Paris, Wildproject, 3/2010.
- SCHWARZ, Diemo, BELLER, Grégory, VERBRUGGHE, Bruno, BRITTON, Sam, « Real-Time Corpus-Based Concatenative Synthesis with CataRT », in *9th Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06)*, Montréal, DAFx, 2006, p. 279-282.
- SCHWARZ, Diemo, « Interacting with a Corpus of Sounds », *eContact !*, n° 16, 2014, http://cec.sonus.ca/econtact/16_2/schwarz_corpus.html.
- SEEGER, Charles, « Prescriptive and Descriptive Music-Writing », *The Musical Quarterly*, vol. 44, n° 2, p. 184-195.
- SIMONDON, Gilbert, *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, 2/2012.
- SMALLEY, Denis, « Spectro-Morphology and Structuring Processes », in S. Emmerson (éd.) *The Language of Electroacoustic Music*, Londres, The Macmillan Press, 1986, p. 61-93.
- SMALLEY, Denis, « Spectromorphology in 2010 », in *Portrait polychrome Denis Smalley*, Paris, INA-GRM, 2010, p. 89-101.
- SPEVAK, Christian, POLFREMAN, Richard, « Sound Spotting – An Approach to Content-Based Sound Retrieval », in *Music Without Walls ? Music Without Instruments ?*, Leicester, De Montfort University, 2001, <http://www.dmu.ac.uk/documents/technology-documents/research/mtirc/nowalls/mww-spevak.pdf>.
- SPRENGER-OHANA, Noémie, « *Trois Rêves d'oiseau, moqueur* », in F. Bayle (éd.) *L'Expérience acoustique*, Paris, Magison, 2013, cédérom.
- TEN HOOPEN, Christian, « Polarised Listening Strategies for Electroacoustic Music », in R. Dalmonte, M. Baroni (éd.) *Secondo convegno europeo di analisi musicale*, Trento, Université de Trento, 1992, p. 463-470.
- TERUGGI, Daniel, « Vision synoptique », in *La musique électroacoustique*, Paris, INA-GRM/Hyptique, 2000, cédérom.
- THOM, René, « Pour une théorie de la morphogenèse », in E. Noël (éd.) *Les sciences de la forme aujourd'hui*, Paris, Seuil, 1994, p. 177-188.
- THORESEN, Lasse, « Spectromorphological Analysis of Sound Objects: An Adaptation of Pierre Schaeffer's Typomorphology », *Organised Sound*, vol. 12, n° 2, 2007, p. 129-141.
- THORESEN, Lasse, « Form-Building Patterns and Metaphorical Meaning », *Organised Sound*, vol. 15, n° 2, 2010, p. 82-95.

TIFFON, Vincent, « La représentation sonographique est-elle une aide pour l'analyse perceptive de la musique électroacoustique ? », *Lien*, 2006, p. 3–15.

TISSOT, Gaël, « La musique électroacoustique au GRM : un art plastique ? », *Filigrane*, n° 16, 2013, <http://revues.mshparisnord.org/filigrane/index.php?id=543>.

VANDE GORNE, Annette, « L'interprétation spatiale. Essai de formalisation méthodologique », *Demeter*, 2002, <http://demeter.revue.univ-lille3.fr/interpretation/vandegorne.pdf>.

VIDAL, Jacques, DELALANDE, François, *Partition animée*, Paris, INA, 1970, <http://www.ina.fr/video/CPF03008561>.

WARE, Colin, *Information Visualization Perception for Design*, Oxford, Morgan Kaufmann, 2013.

WATTENBERG, Martin, « Arc Diagrams: Visualizing Structure in Strings », in *IEEE Symposium on Information Visualization (INFOVIS)*, Boston, IEEE, 2002, p. 110-116.

WEALE, Rob, « Discovering How Accessible Electroacoustic Music Can Be: the Intention/Reception project », *Organised Sound*, vol. 11, n° 2, 2006, p. 189-200.

WISHART, Trevor, *On Sonic Art*, New York, Routledge, 2/1996.

ZATTRIA, Laura, ORIO, Nicola, « ACAME - Analyse Comparative Automatique de la musique électroacoustique », *Musimédiane*, n° 4, 2006, <http://www.musimediane.com/numero4/LZattra/index.html>.

Table des figures

1.1	Tableau récapitulatif des principaux outils théoriques utilisés dans l'analyse de la musique électroacoustique, réalisé lors de la préparation du développement du logiciel EAnalysis.	11
1.2	Les relations entre le sonore et le visuel utilisées dans nos transcriptions.	29
2.1	Le modèle de la transcription.	46
2.2	Tableau récapitulatif de notre sélection de descripteurs audio pour l'analyse de la musique acousmatique.	53
2.3	Exemple de représentation analytique réalisée avec EAnalysis et réunissant une transcription et des représentations du signal (forme d'onde, sonagramme, descripteurs audio) à partir d'« Ondes croisées » (<i>De Natura Sonorum</i>) de Bernard Parmegiani (1975).	54
2.4	Le modèle de la représentation analytique.	55
2.5	Développement des différentes versions d'iAnalyse et d'EAnalysis.	58
2.6	Les principales fonctions des différentes versions d'iAnalyse.	60
2.7	Les principales nouvelles fonctions des différentes mises à jour publiques d'EAnalysis.	62
2.8	L'interface de l'outil permettant d'expérimenter les gammes de couleurs sur le spectre et les matrices de similarité.	63
2.9	Utilisation de la transcription en analyse musicale.	65
2.10	Fonctionnement de la désynchronisation de la lecture des vues.	65
2.11	Utilisation de logiciels intégrés ou externes.	67
2.12	Architecture générale du logiciel (les ressources et logiciels externes apparaissent sur un fond gris).	69
2.13	Exemple des classes mises en œuvre lors du dessin d'une annotation de type rectangle sur un sonagramme.	70
2.14	Les différentes couches de la première catégorie de vues.	71
2.15	Les différentes couches de la seconde catégorie de vues.	72
2.16	Fonctionnement des annotations et leurs dessins à l'aide de la feuille de style.	73
2.17	Le principe du calcul de la matrice de similarité à partir de l'image du tracé spectral.	77
2.18	Les sept types de représentations de données d'EAnalysis.	78
2.19	Principe de réalisation de la représentation hiérarchique de la corrélation.	79
2.20	Principe de réalisation d'une matrice de similarité entre deux listes différentes.	80
2.21	Les statistiques de téléchargement d'iAnalyse et EAnalysis. L'axe Y est logarithmique afin de permettre une bonne visualisation de toutes les valeurs.	82
3.1	Évolution de notre instrument augmenté pour l'improvisation musicale.	88
3.2	Notre dispositif de jeu pour l'improvisation électroacoustique.	89

3.3	Notre proposition d'articulation entre l'analyse musicale, la création et l'interprétation.	90
3.4	Modélisation du projet de recherche.	91

Table des matières

1	Introduction et contexte : l'analyse musicale et la transcription	5
1.1	Outils théoriques, méthodes et technologies	6
1.1.1	La dissolution du concept d'objet sonore	8
1.1.2	Les théories	10
1.1.3	Les méthodes	13
1.1.4	Les outils numériques	16
1.1.4.1	L'édition audiovisuelle, le filtrage et l'analyse-synthèse	17
1.1.4.2	L'extraction et la représentation des descripteurs audio	18
1.1.4.3	La représentation et l'annotation	18
1.1.4.4	L'aide à l'analyse musicale	19
1.1.5	La terminologie	19
1.2	De l'analyse musicale à la transcription morphologique	21
1.2.1	De l'écoute acousmatique à l'écoute instrumentée	21
1.2.2	Pourquoi transcrire ?	22
1.2.3	La conception graphique d'une transcription morphologique	24
1.2.3.1	L'espace de la transcription	25
1.2.3.2	Couleurs du sonagramme et de la forme d'onde	26
1.2.3.3	Le graphisme des annotations	27
1.3	Constats théoriques : les limites de la transcription morphologique	31
1.3.1	Un corpus limité	31
1.3.2	Les méthodes d'analyse et les flux de travaux	32
1.3.3	La transcription morphologique	34
1.3.4	Ambivalence, approximation et difficultés de transcription	35
1.3.5	Un cas particulier : la transcription de l'espace	36
1.3.6	La linéarité du temps	38
1.4	Constats technologiques : les limites des outils numériques de transcription	39
1.4.1	Une typologie des outils d'aide à l'analyse	39
1.4.2	Les flux de travaux	41
1.4.3	Les limites des outils informatiques	42
1.5	Conclusion	44
2	Objectif de la recherche : la représentation analytique	45
2.1	De la transcription à la représentation analytique	45
2.1.1	Le modèle de transcription morphologique	45
2.1.2	Les représentations acoustiques	49
2.1.2.1	Le tracé spectral	49

2.1.2.2	Les descripteurs audio	50
2.1.3	La représentation analytique comme modèle	52
2.1.4	La composition de représentations	56
2.2	Le développement d'un outil d'aide à l'analyse : EAnalysis	57
2.2.1	Historique du développement	57
2.2.1.1	Les origines : iAnalyse	57
2.2.1.2	EAnalysis	59
2.2.2	Les concepts à la base d'EAnalysis	63
2.2.2.1	Concevoir un outil pour l'analyse musicale	64
2.2.2.2	Déconnecter l'étape d'analyse de l'étape de représentation	65
2.2.2.3	L'usage de technologies externes	66
2.2.2.4	La gestion de fichiers différents	67
2.2.3	L'architecture du logiciel	68
2.2.3.1	Des processus d'analyse musicale à l'architecture du logiciel	68
2.2.3.2	Les différentes catégories de vues	70
2.2.3.3	Les annotations	72
2.2.3.4	La représentation des structures	74
2.2.3.5	Les représentations spectrales	75
2.2.3.6	Les représentations à partir de données	76
2.2.4	Bilan et perspectives	80
2.3	Conclusion	83
3	Projet de recherche	85
3.1	Prélude	86
3.1.1	Entre recherche scientifique et création musicale	86
3.1.2	Le développement d'un instrument augmenté	87
3.2	Définition du champ de recherche	89
3.2.1	Interprétation musicale et captation numérique	91
3.2.2	Méthodes	93
3.2.2.1	La semi-automatisation de certaines tâches analytiques	94
3.2.2.2	Les technologies en temps réel	94
3.2.2.3	L'analyse musicale de corpus de matériaux ou d'œuvres	95
3.2.3	Représentations : le retour visuel	95
3.3	Le futur d'iAnalyse et d'EAnalysis	96
3.4	Conclusion	97
A	Liste des transcriptions morphologiques et des représentations analytiques	99
B	Interfaces des différentes versions d'iAnalyse	101
C	Les représentations spectrales produites par EAnalysis	105
D	Les représentations de données produites par EAnalysis	109
E	Les représentations de structures produites par EAnalysis	113
	Bibliographie	117