



HAL
open science

L'informatique musicale : informatique et musique en interdisciplinarité

Moreno Andreatta, Gérard Assayag, Myriam Desainte-Catherine, Jean-Louis
Giavitto, Mathieu Giraud, Yann Orlarey, Anne Sèdes

► **To cite this version:**

Moreno Andreatta, Gérard Assayag, Myriam Desainte-Catherine, Jean-Louis Giavitto, Mathieu Giraud, et al.. L'informatique musicale : informatique et musique en interdisciplinarité. Journées d'Informatique Musicale (JIM 2019), May 2019, Bayonne, France. hal-02348292

HAL Id: hal-02348292

<https://hal.science/hal-02348292v1>

Submitted on 5 Nov 2019

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.

L'INFORMATIQUE MUSICALE : INFORMATIQUE ET MUSIQUE EN INTERDISCIPLINARITÉ

Moreno Andreatta, Gérard Assayag, Myriam Desainte-Catherine
Jean-Louis Giavitto, Mathieu Giraud*, Yann Orlarey, Anne Sèdes

* mathieu.giraud@univ-lille.fr

RÉSUMÉ

L'informatique musicale, recherche en science et art du traitement automatisé d'informations musicales, rassemble une communauté vivante de chercheurs et d'enseignants-chercheurs, ingénieurs, artistes et pédagogues. Ce document partage quelques réflexions épistémologiques sur ce domaine par nature interdisciplinaire (parties 1 à 3) et propose des résultats préliminaires d'une cartographie de ces recherches en France (parties 4 et 5).

1. AUX SOURCES DE L'INFORMATIQUE MUSICALE

La science et la musique ont toujours eu des liens forts, tout d'abord sur des aspects de gammes et d'acoustique. Le Quadrivium fut défini par Boèce au VI^e siècle et regroupe les arts libéraux des « sciences des nombres », à savoir l'arithmétique, la musique, la géométrie et l'astronomie. L'harmonie des sphères, liant proportions célestes et musique, est une des théories pythagoriciennes étudiées par Boèce [4]. Mille ans plus tard, notamment à partir des ouvrages de Zarlino [27], les questions de tempérament, c'est-à-dire de distribution fréquentielle de la gamme, sont un sujet majeur de débat musical et scientifique du XVI^e au XIX^e siècle.

À côté des préoccupations acoustiques, le côté plus symbolique et calculatoire de la musique a aussi une longue histoire, notamment pour la génération musicale [1]. Certains *Würfelspiele* du XVIII^e siècle, jeux musicaux aléatoires, sont par exemple attribués à Mozart. L'émergence de la pensée informatique va de pair avec des réflexions sur la musique algorithmisée. En 1843, Ada Lovelace, percevant l'universalité de la machine proposée par Charles Babbage, imagine déjà que la musique puisse se formaliser au point que l'ordinateur devienne compositeur [11] :

It might act upon other things besides number, were objects found whose mutual fundamental relations could be expressed by those of the abstract science of operations, and which should be also susceptible of adaptations to the action of the operating notation and mechanism of the engine... Supposing, for instance, that the fundamental relations of pit-

ched sounds in the science of harmony and of musical composition were susceptible of such expression and adaptations, the engine might compose elaborate and scientific pieces of music of any degree of complexity or extent.

La pensée sérielle du début du XX^e siècle a aussi des aspects systématiques, parfois algorithmiques. Un siècle après Babbage et Lovelace, dans les années 1940, les premiers ordinateurs suscitent rapidement des questions musicales. Dès la fin des années 1940, Alan Turing décrit lui-même comment utiliser le haut-parleur du Mark II [6] :

When an instruction with function symbol /∇ is obeyed an impulse is applied to the diaphragm of a loudspeaker. By doing this repeatedly and rhythmically a steady note, rich in harmonics, can be produced. (...) All that is then required is to repeat a cycle of instructions including a hoot, e.g.

FS NS/V

CS FS/P

In this case every second instruction will put a pulse into the speaker. These pulses will occur at intervals of 8 beats i.e. 1.92 ms giving a frequency of 521 cycles (about middle C).

En 1951, Christopher Sachey programme ainsi la mélodie de *God Save The Queen*. En 1956/57, Max Mathews crée avec MUSIC une génération de formes d'onde triangulaire en contrôlant leur amplitude, leur fréquence et leur durée [14]. La famille de logiciels MUSIC-N aura de nombreux héritiers en synthèse sonore et plus généralement en traitement des données audio numériques. Au même moment, Lejaren Hiller et Leonard Isaacson implémentent les règles du contrepoint de Fux ainsi que d'autres techniques compositionnelles pour l'écriture d'un quatuor à cordes, l'*Illiac Suite*, en particulier avec les chaînes de Markov et l'algorithme de Montecarlo [8], ce qui ouvre la voie à un vaste champ d'analyse et de génération algorithmique.

Dès sa naissance, l'informatique musicale est ainsi multiforme, analysant et produisant des signaux audio numériques comme des données symboliques. Des années 1960 à nos jours, de nombreux travaux suivront par des musiciens compositeurs et scientifiques, tels qu'en France,

Pierre Barbaud, Iannis Xenakis, André Riotte et Jean-Clau-
de Risset. On se reportera à plusieurs articles retraçant ces
travaux de modélisation et de génération musicale [1, 2,
10, 13, 15, 16, 19, 20, 24] ou à des rapports plus institu-
tionnels [5, 12, 17].

Si plusieurs de ces articles et de ces rapports utilisent
le terme d'*informatique musicale*, terme autour duquel la
communauté francophone se retrouve (partie 4), ce terme
peut être lui aussi sujet à débat. Doit-on parler de science
de la musique sur ordinateur, d'informatique musicale, de
musique informatique, de musique numérique ? Cette am-
bigüité se trouve également dans d'autres langues (*compu-
ter music*, *music informatics* et *music computing*, ou bien
Computermusik et *Musikinformatik*), et pose des questions
épistémologiques et de traduction [13, 24]. Le *Computer
music tutorial* de Curtis Roads [18] est par exemple traduit
en français aux éditions Dunod par *L'audionumérique, in-
troduction à l'informatique musicale*.

Nous garderons ici ce terme d'informatique musicale
tout en détaillant la diversité de ses objets, de ses mé-
thodes tout comme la richesse de ses interactions discipli-
naires : l'informatique musicale émerge de la dynamique
des arts, des sciences et des technologies. Sans tenter une
définition précise, les prochaines parties positionnent l'in-
formatique musicale en dialogue entre science et art et la
situent par rapport à l'informatique tout comme aux autres
disciplines scientifiques.

2. L'INFORMATIQUE MUSICALE, SCIENCE ET ART, RECHERCHE EN CRÉATION

Dès la fin des années 1950, des centres liant création
musicale, informatique et nouvelles technologies voient
le jour en France comme le GRM (Groupe de recherches
musicales, Pierre Schaeffer, 1958), le GMAP (Groupe de
musique algorithmique de Paris, Pierre Barbaud, Janine
Charbonnier et Roger Blanchard, 1959), et EMAMu (Ian-
nis Xenakis, 1966). D'autres centres seront ensuite créés,
tels que l'ACROE (Claude Cadoz, Jean-Loup Florens, An-
nie Luciani, 1976), l'IRCAM (Pierre Boulez, 1977), le
GRAME (Pierre-Alain Jaffrennou, James Giroudon, 1982),
le CICM (Horacio Vaggione, 1992) et le SCRIME (My-
riam Desainte-Catherine, Christian Eloy, 2000).

Depuis plus d'un demi-siècle, les artistes et les scien-
tifiques conçoivent ainsi ensemble des problématiques de
recherche et des œuvres artistiques. Les possibilités tech-
niques sont saisies par les artistes, qui demandent de nou-
veaux outils aux chercheurs et ingénieurs. En retour, ceux-
ci inventent de nouveaux modèles et des questionnements
scientifiques. Ces fertilisations croisées font émerger de
nouvelles compétences, et même un nouveau métier, celui
de « Réalisateur en Informatique Musicale » [28].

Le cadre même de la naissance et de la pratique de
l'informatique musicale interroge : est-ce une science, un
art ? Scientifiques comme artistes ont un même moteur,
l'exploration de l'inconnu, mais des objectifs différents.

La scientifique comprend, construit, et recherche une co-
hérence de modèles généraux, susceptibles de prédire. L'ar-
tiste ressent, crée, et recherche la cohérence d'objets sin-
guliers susceptibles de charmer, d'engendrer l'émotion et
parfois la beauté. En informatique musicale, le composi-
teur crée du musical, du design sonore, de l'art du son,
avec des logiciels, des interfaces ou des éditeurs de code
tout comme à partir de méthodes plus traditionnelles.

La science peut être une inspiration pour l'artiste, et
l'art un domaine d'étude pour la scientifique. Elle et lui
peuvent collaborer sur les concepts, les technologies, ou
sur leurs productions – dans un cas des œuvres artistiques,
dans l'autre des publications scientifiques. La réception
de ces travaux concerne l'interaction et la réception avec
le public d'une part, la communauté scientifique d'autre
part. Lieu de rencontre, l'informatique musicale est à la
fois recherche en science et en art, et se développe ainsi
dans une boucle vertueuse pour chacun de ces métiers.
Mais les postures se confondent : les acteurs de la commu-
nauté sont souvent, à des degrés divers, simultanément ar-
tistes, musiciens, compositeurs, informaticiens, ingénieurs
et chercheurs.

La dynamique de l'informatique musicale, incarnée par
sa communauté, est ainsi portée par les interactions entre
arts, sciences et technologies, que ce soit sur des ques-
tions sur le signal audio, sur du contenu symbolique ou sur
d'autres type d'informations. Cette dynamique d'interac-
tion demanderait à être étudiée et approfondie, ce qui ne
sera pas le cas ici. On pourra déjà se reporter à [1] et [16].

3. INFORMATIQUE ET MUSIQUE EN INTERDISCIPLINARITÉ

Riche de cette longue histoire de création comme ac-
tivité de recherche et d'expérimentation, dans une inter-
action entre arts, sciences et technologies, l'informatique
musicale pourrait être située dans le domaine des sciences
de la musique. Nous la positionnons dans ce texte au sein
de l'informatique, mais pour observer qu'elle est par na-
ture interdisciplinaire, en lien avec d'autres champs scien-
tifiques. Ce positionnement multiple, informatique et mu-
sique en lien avec d'autres disciplines, est confirmé par le
paysage de l'informatique musicale en France (parties 4
et 5).

En quoi l'informatique musicale est-elle informatique ?
Nous l'articulons avec les quatre concepts *algorithme*, *ma-
chine*, *langage*, et *information* proposés par Gilles Dowek
pour caractériser l'informatique [7] :

- *Information*. L'informatique musicale modélise, for-
malise et encode l'information musicale, qui peut
porter directement sur les *contenus musicaux*, de
trois niveaux, par abstraction croissante : données
audio (signal audionumérique, fréquentiel, spatial),
données liées à la performance et au contrôle (cap-
tation de geste, protocoles, MIDI, OSC), données
symboliques (partition, hauteurs et durées de notes

et autres symboles), mais aussi descripteurs dérivés de ces données. Elle porte également sur des *méta-contenus musicaux*, tels que les données de structure, d'analyse, d'interprétation, sur les instruments et l'acoustique, ou les méta-données sur les pièces ou les corpus.

- *Algorithme*. L'informatique musicale répond à des questions sur les informations musicales. Par des méthodes discrètes, continues, ou issues de l'IA, les algorithmes manipulent directement les contenus et méta-contenus musicaux (modélisation, analyse, *Music Information Retrieval* (MIR), génération de contenus musicaux, synthèse sonore et granulaire), sur l'ensemble des informations musicales ou sur des aspects concernant la mélodie, le rythme, l'harmonie, la structure ou le genre. Certains algorithmes considèrent également des structures informatiques pour assurer le transport et le partage de ces contenus et méta-contenus.
- *Langages*. La musique est elle-même un langage. Certains algorithmes traitant les informations musicales s'écrivent dans les langages habituels de l'informatique. L'informatique musicale stimule également la recherche en langages de programmation ou de spécification dédiés, que ce soit à destination d'informaticiens ou de musiciens. On peut citer par exemple les langages synchrones, les langages formels, les langages logiques à base de contraintes et les langages naturels pour décrire et manipuler de l'audio temps-réel, des structures symboliques de la partition ou d'autres concepts musicaux. Les recherches et développements en langages visuels, interfaces et éditeurs de code pour la conception de compositions ou de processus interactifs sont aussi une facette de la formalisation d'algorithmes ou de représentations sur des informations musicales.
- *Machine*. L'instrument traditionnel du musicien est une machine qui lui est extérieure et qu'il contrôle pour jouer de la musique. L'ordinateur, conventionnel, mobile, ou distribué, est lui un machine exécutant de manière autonome (ou semi-autonome) des algorithmes formalisés dans un langage. L'informatique musicale stimule des recherches et des développements en architecture des machines, processeurs spécialisés (tels que les DSP), informatique embarquée, système, réseau, temps-réel, voire en robotique et en systèmes cyber-physiques. Elle a une longue tradition d'utiliser l'ordinateur comme instrument et de produire des instruments embarquant des ordinateurs.

Ces quatre concepts existaient déjà au cours de l'histoire, mais la pensée informatique naît de leur rencontre [7]. Ainsi les *Würfelspiele* sont des algorithmes traitant d'informations musicales, mais non décrits formellement dans un langage pour être exécutés par une machine. Les boîtes à musiques et automates musicaux, apparus au cours du

XVIII^e siècle, sont des machines traitant de l'information musicale, mais sans réel algorithme encodé dans un langage formel. C'est en ce sens que la vision d'Ada Lovelace (voir en première page) rassemble pour la première fois les quatre concepts donnant naissance à l'informatique musicale.

D'après ces quatre concepts, on pourrait voir l'informatique musicale comme un *traitement automatisé des informations musicales*. La recherche en informatique musicale a un spectre large, du fondamental à l'appliqué, faisant dialoguer concepteurs et utilisateurs. Ce traitement des informations musicales, qu'elles soient audionumériques, symboliques ou de méta-contenus, ne devient musical que lorsqu'il est manipulé par les musiciens, à partir de leur environnement de travail, mais s'inscrit dans la dynamique art / science / technologie évoquée précédemment.

Interactions et bordures. Limitons-nous pour le moment à évoquer les interactions et bordures qui caractérisent l'informatique musicale. L'informatique musicale, ancree dans l'informatique, n'a de sens que par les interactions qu'elle mène avec d'autres champs disciplinaires [3, 25, 26] :

- *acoustique*, organologie, étude des voix chantées,
- *création musicale* comme recherche et expérimentation, composition, performance, enregistrement,
- *électronique*, capteurs, interfaces,
- *mathématiques*, modélisation, structures, statistiques,
- *musicologie systématique ou empirique*, analyse musicale, ethnomusicologie, musicologie historique,
- *neurosciences*, musicologie cognitive, processus cérébraux, psychoacoustique, psychologie expérimentale,
- *sciences sociales*, sociologie, anthropologie, histoire, épistémologie,
- *traitement de signal*, audionumérique, sciences de l'ingénieur.

Ces bordures sont essentielles à l'informatique musicale. Quasiment tout travail en informatique musicale est en lien avec un ou plusieurs de ces champs. On pourrait même faire l'éloge de l'*indisciplinarité* [22] ! Interdisciplinarité et indisciplinarité posent des défis en termes de formation [16] et de collaborations nécessaires entre acteurs du domaine.

4. COMMUNAUTÉS ACADÉMIQUES ET ÉCONOMIQUES

Structuration académique. La recherche en informatique musicale regroupe des chercheurs et enseignants-chercheurs, ingénieurs, artistes et pédagogues de compétences différentes. Au niveau national, la nature interdisciplinaire du domaine se retrouve dans les sections de rattachement des universitaires : 16 (psychologie), 18 (arts,

musique), 22 (histoire), 26 (mathématiques appliquées), 27 (informatique), 60 (a-coustique), 61 (traitement du signal) et 72 (épistémologie).

Dès 1984, une structure nationale regroupe cette communauté, le collectif pour la recherche en informatique musicale (CPRIM). La communauté se rassemble aujourd'hui dans l'association francophone d'informatique musicale (AFIM), co-présidée par Myriam Desainte-Catherine (LaBRI, Université de Bordeaux et SCRIME) et Anne Sèdes (CICM/Musidance, Paris VIII).

Fondée en 2002 par le regroupement de deux associations et sociétés précurseuses, l'ADERIM et la SFIM, l'AFIM pilote les *Journées d'informatique musicale* (JIM), organisées par plus d'une vingtaine d'équipes et laboratoires différents depuis leur création en 1994 (Figure 1), et édite depuis 2011 la *Revue francophone informatique et musique* (RFIM). L'AFIM a également participé au lancement et au pilotage de sociétés savantes et de conférences internationales établies (SMC, *Sound and Music Computing*, depuis 2004, et TENOR, depuis 2015), tout comme à celui du *Journal of Mathematics and Music* qui publie son volume 12 en 2018. Des équipes françaises ont également accueilli à Paris la conférence internationale ISMIR, référence en recherche d'informations musicales, en 2002 puis 2018.

À l'international, l'informatique est également un enjeu de recherche dans de nombreux pays, avec des laboratoires dédiés tels que le CCRMA (Stanford) ou le C4DM (QMU, Londres). La communauté française est d'ailleurs très connectée à cette communauté internationale vivante et importante ¹.

Impact économique. Le revenu de l'industrie musicale enregistrée est estimé mondialement à 19 G\$ en 2018, dont environ 1,0 G€ en France, cinquième marché mondial [9, 21]. Après des années de baisse suite au recul des ventes physiques, ces revenus sont environ 30% supérieurs à ceux de 2014. Cette croissance est en grande partie due au passage à l'ère numérique : l'informatique est centrale tout au long de la chaîne de composition et de production musicale et jusqu'à la distribution – plus de la moitié des revenus de musique enregistrée concerne désormais le *streaming* ou le téléchargement. Le revenu du spectacle vivant est encore plus élevé. Enfin, les *logiciels musicaux* génèrent à eux seuls un revenu de plusieurs milliards par an, qui est estimé à dépasser les 6 G\$ en 2022 [23]. Enfin, l'informatique musicale apparaît de plus en plus dans d'autres secteurs que la musique « pour elle-même », comme la réalité virtuelle, les jeux et divertissements informatiques, la robotique et la domotique.

En France, au milieu d'un tissu d'entreprises proposant des logiciels et matériels informatiques pour les musiciens ou le grand public, plusieurs entreprises ont été fondées sur des sujets d'informatique musicale issus de la recherche, comme par exemple Antescofo, Arturia ou

1. Voir la présence française sur la liste internationale de ressources <http://www.smcnetwork.org/#resources>

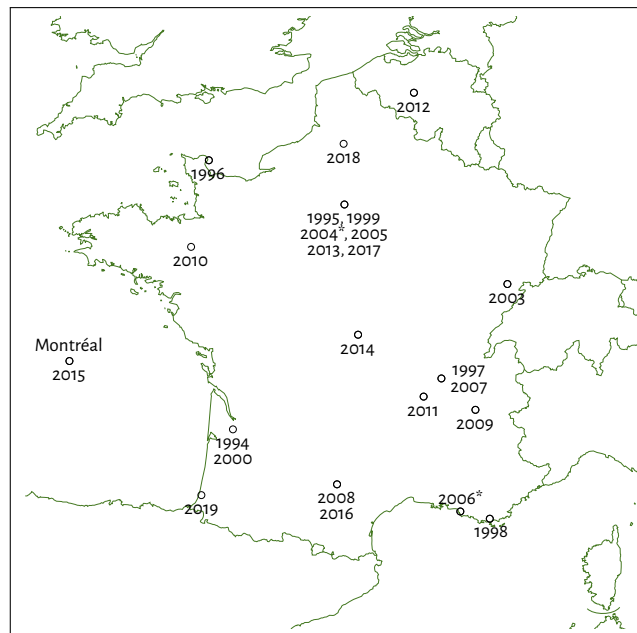


Figure 1. Les Journées d'informatique musicale (JIM) se réunissent chaque année depuis 1994. En 2004 et 2006, les JIM se sont tenues avec la conférence internationale SMC.

Simbals. Les acteurs économiques stimulent la recherche : des entreprises telles que Google, Facebook, Sony et Spotify investissent par elles-mêmes ou par des collaborations dans des sujets de recherche en informatique musicale, le plus souvent liant IA et musique, avec des équipes en France pour certaines d'entre elles.

5. QUARANTE ANNÉES DE THÈSES EN INFORMATIQUE MUSICALE EN FRANCE

L'AFIM réalise une cartographie des recherches en informatique musicale en France pour mieux aider la communauté à se connaître et à se structurer. Nous avons débuté par un recensement des thèses en informatique musicale sous la forme d'une collection HAL ². Contenant 128 thèses en avril 2019, cet inventaire constitue seulement une borne inférieure pour au moins deux raisons :

- L'inventaire ne concerne que des thèses dont au moins la notice est disponible sur HAL. Les mécanismes institutionnels actuels font que les thèses récentes sont bien référencées (81 thèses depuis 2010). Ce n'est certainement pas le cas pour les thèses plus anciennes (37 thèses entre 2000 et 2009, et uniquement 10 thèses entre 1974 et 1999).
- L'inventaire, fait collectivement à partir des résumés et des mots-clés, et auquel chacun peut signaler des manquements, comporte probablement une part d'arbitraire, particulièrement pour les travaux

2. <https://hal.archives-ouvertes.fr/INFORMATIQUE-MUSICALE>

97	info	Informatique
	27 info.info-sd	Informatique / Son
	23 info.info-ts	Informatique / Traitement du signal et de l'image
	21 info.info-mo	Informatique / Modélisation et simulation
	17 info.info-hc	Informatique / Interface homme-machine
	19 info.info-oh	Informatique / Autres
	6 info.info-mm	Informatique / Multimédia
	6 info.info-ai	Informatique / Intelligence artificielle
32	spi	Sciences de l'ingénieur
	21 spi.signal	Sciences de l'ingénieur / Traitement du signal et de l'image
	8 spi.acou	Sciences de l'ingénieur / Acoustique
24	shs	Sciences de l'Homme et Société
	20 shs.musiq	Sciences de l'Homme et Société / Musique, musicologie et arts de la scène
10	math	Mathématiques
8	phys	Physique
	8 phys.meca.acou	Physique / Mécanique / Acoustique
5	stat	Statistiques

Table 1. Domaines et sous-domaines du référentiel HAL avec au moins 5 thèses parmi les 128 thèses répertoriées avec une composante d'informatique musicale. Les sommes partielles comme globales peuvent être supérieures aux totaux, chaque thèse pouvant être inscrite dans plusieurs (sous-)domaines. Par exemple, 13 thèses sont à la fois inscrites en `info.info-ts` et en `spi.signal`.

en « bordures » mentionnés dans les paragraphes précédents.

Tout en ayant conscience de ces biais, l'inventaire permet toutefois de dresser un premier paysage de l'informatique musicale en France, au moins sur les quinze dernières années.

Laboratoires. Les co-encadrements et la complexité des affiliations, parfois changeantes, rendent difficile la consolidation de données précises. On peut néanmoins estimer qu'environ 60% de ces thèses sont effectuées avec au moins un laboratoire en région parisienne, et 50% de ces thèses avec au moins un laboratoire en province.

Certains laboratoires et centres de recherche historiquement moteurs en informatique musicale et en traitement du signal sont naturellement bien représentés : à Paris, STMS/IRCAM (une quarantaine de thèses sous HAL inventoriées « informatique musicale ») et le LTIC/Telecom (une vingtaine), à Grenoble l'ACROE et à Bordeaux le LaBRI (une dizaine chacun)³. Cependant, une quarantaine de laboratoires ou d'équipes différentes ont eu au moins une thèse avec une composante d'informatique musicale. Cette vitalité sur l'ensemble du territoire est confirmée par l'organisation des JIM (voir page précédente).

Domaines de recherche. Le tableau 1 montre les domaines et sous-domaines du référentiel HAL les plus représentés parmi ces thèses. Bien que ces données aient des biais supplémentaires (ontologie propre de HAL, choix des contributeurs à HAL), elles soulignent les différentes

3. Tout comme pour l'ensemble des 128 thèses, ces décomptes par laboratoire sont des bornes inférieures et concernent les thèses dont la notice est sur HAL et qui sont actuellement inventoriées.

facettes de l'informatique musicale. Une grande majorité de ces thèses se déclarent en « Informatique », mais beaucoup de thèses se déclarent aussi en « Sciences de l'ingénieur » et en « Musique, musicologie et arts de la scène ».

Avec l'aide de ces domaines, mais en considérant aussi les thèses non étiquetées, nous estimons qu'environ la moitié des thèses concerne principalement du traitement de contenu musical audionumérique (traitement du signal et acoustique) et un quart du traitement de contenu musical symbolique (partitions). Enfin, un quart des thèses porte sur le traitement du contenu musical de performance ou de contrôle ou de méta-contenu musical sur d'autres aspects (interaction, temps-réel, métadonnées, langages, aspects sociaux). D'autres analyses plus fines pourraient se faire à partir de ce corpus.

Remerciements. Les auteurs remercient les relecteurs anonymes, Gilles Doweck et Florent Jacquemard pour leurs remarques, ainsi que les membres de la communauté pour leur réponse à notre enquête.

6. REFERENCES

- [1] Moreno Andreatta. *Musique algorithmique. Théorie de la composition musicale au XX^e siècle*. Symétrie, 2013.
- [2] Marc Battier. *Entre l'idée et l'œuvre : parcours de l'informatique musicale*. *Ars Sorora*, 1, 1995.
- [3] Nicola Bernardini et Giovanni de Poli. *The sound and music computing field : Present and future*. *Journal of New Music Research*, 36(3) :143–148, 2007.

- [4] Boèce. *De institutione musica*. VI^e siècle.
- [5] Hélène Charnasse. Musique et informatique. *Bulletin de l'EPI (Enseignement Public et Informatique)*, (50) :142–154, 1988.
- [6] B. Jack Copeland et Jason Long. Turing and the history of computer music. *Philosophical Explorations of the Legacy of Alan Turing : Turing 100*, pages 189–218. 2017.
- [7] Gilles Dowek. Les quatre concepts de l'informatique. *Sciences et technologies de l'information et de la communication en milieu éducatif : Analyse de pratiques et enjeux didactiques*, pages 21–29. Athènes : New Technologies Editions, 2011.
- [8] Lejaren Arthur Hiller et Leonard Maxwell Isaacson. *Experimental music : composition with an electronic computer*. McGraw-Hill, 1959.
- [9] IFPI, *Global music report 2019*, <http://www.ifpi.org>, 2019.
- [10] Serge Lemouton. Une petite histoire de l'informatique musicale, note de cours. <http://serge.lemouton.free.fr/paris8/histoire.html>, 2006.
- [11] Ada Lovelace. A sketch of the analytical engine, with notes by the translator. *Scientific Memoirs*, 3 :666–731, 1843.
- [12] Annie Luciani. Musique électronique et informatique musicale : historique, faits marquants et situation actuelle. Rapport de la mission d'étude Art-Science-Technologie (AST), 1998.
- [13] Mikhail Malt. *La représentation dans le cadre de la composition et de la musicologie assistées par ordinateur – Parcours de recherche et création*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Strasbourg, 2015.
- [14] Max Mathews. *The Technology of Computer Music*. MIT Press, 1969.
- [15] Marcel Mesnage et André Riotte. *Formalismes et modèles musicaux (volumes 1 et 2)*. Musique/Sciences, Ircam/Delatour, 2006.
- [16] Larent Pottier. Quel intérêt pour des musiciens d'apprendre la programmation informatique ? *Revue Francophone d'Informatique et Musique*, 6, 2018.
- [17] Jean-Claude Risset. Un survol de l'informatique musicale. Rapport de la mission d'étude Art-Science-Technologie (AST), 1998.
- [18] Curtis Roads. *The Computer Music Tutorial*. MIT Press, 1996.
- [19] Curtis Roads et Max Mathews. Interview with Max Mathews. *Computer Music Journal*, 4(4) :15–22, 1980.
- [20] Luc Rondeleux. Une histoire de l'informatique musicale entre macroforme et microcomposition. *Journées d'Informatique Musicale (JIM 1999)*, 1999.
- [21] SACEM, *Rapport d'activité 2017*, <http://societe.sacem.fr>, 2018.
- [22] Anne Sèdes, Gérard Assayag et Myriam Desainte-Catherine. Informatique et musique : éloge de l'indisciplinarité. *Les sciences de la musique, de nouveaux défis dans une société en mutation, symposium SFM-SFE-SFAM-AFIM*, 2019.
- [23] Technavio, *Global Music Production Software Market 2018-2022*, <http://technavio.com>, 2018.
- [24] Anne Veitl. Musique sérieuse et informatique : la formation du domaine de « l'informatique musicale » en France – repères chronologiques : XIX^e siècle → 1983. Observatoire Tscimuse, 2008.
- [25] Stéphanie Weisser. L'ethnomusicologie et l'informatique musicale : une rencontre nécessaire. *Journées d'Informatique Musicale (JIM 2012)*, 2012.
- [26] Frans Wiering et Emmanouil Benetos. Digital musicology and MIR : Papers, projects and challenges. *International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2013)*, 2013. Late-breaking session.
- [27] Zarlino. *Istitutioni harmoniche*. 1558.
- [28] Laura Zattra. Les origines du nom de RIM (Réalisateur en Informatique Musicale). *Journées d'Informatique Musicale (JIM 2013)*, 2013.