
Modélisation anticipative des systèmes musicaux

Reconnaissance, génération, synchronisation et programmation synchrone temps réel en informatique musicale

Arshia Cont

Ircam CNRS UMR STMS 9912 – UPMC – Inria
1 Place Igor Stravinsky, F-75004 Paris
arshia.cont@ircam.fr

RÉSUMÉ. Cet article étudie les apports de la modélisation de l'anticipation musicale à la conception d'application musicale temps réel. Nous proposons d'aborder le problème de l'anticipation sous l'angle de la notion d'attente et à partir de trois questions : quoi attendre ? comment attendre ? et quand attendre ? Ces questions sont formalisées à partir d'outils théoriques variés faisant appel respectivement à la géométrie de l'information, à l'apprentissage actif et automatique, et à la synchronisation de flux en temps réel. Notre objectif est d'intégrer ces modèles de l'attente comme des éléments de conception permettant de réduire les complexités structurelles et computationnelles souvent exhibées par les applications musicales.

ABSTRACT. This paper studies musical anticipation as a design element for realtime computer music applications. Anticipatory modeling is presented as a design principle for modeling artificial systems. We propose anticipatory models and applications concerning three main preoccupations of expectation : What to expect? How to expect? and When to expect? Each question is addressed within different literatures such as information geometry, active and online learning, and stream synchronisation in realtime and for music signals. The anticipatory design concept is common in all propositions with the premise of reducing the structural and computational complexity for complex problems in computer music.

MOTS-CLÉS : informatique musicale, modélisation anticipative, géométrie de l'information, apprentissage automatique, suivi de partition, programmation synchrone.

KEYWORDS: computer music, anticipatory modeling, information geometry, music information retrieval, online learning, score following, synchronous programming.

DOI:10.3166/TSI.v.1-25 © 2012 Lavoisier

1. Introduction

L'*attente musicale* joue un rôle important dans la perception et la cognition de la musique. De nombreux chercheurs dans différents domaines le soulignent depuis plus d'un siècle. Dès que nous commençons à écouter de la musique, dans une salle de concert, sur une chaîne stéréo ou en multicanal, les phénomènes d'attente entrent en jeu. Aujourd'hui, le rôle de l'*attente musicale* sous toutes ses formes est largement reconnu en psychologie auditive et en physiologie du système limbique (Huron, 2006). Beaucoup d'affects musicaux comme *la surprise, le frisson, la tension*, etc. sont liés au rapport qui se tisse entre la forme musicale et nos attentes qui dépendent notamment de nos connaissances. L'attente, dans ce sens, implique des représentations mentales, lesquelles sont constamment examinées et réactualisées par nos expériences musicales quotidiennes. Différents facteurs entrent en jeu dans la constitution de ces représentations mentales: le contexte culturel, le genre et schémas musicaux, la mémoire véridique ou consciente, et même des éléments extra-musicaux.

Le rôle de l'attente musicale n'est pas limité à celui de l'écoute (perception) mais joue un rôle central dans l'acte de création. Dans son livre *Emotion and Meaning in Music*, Meyer (1956) souligne cet aspect en argumentant que l'émotion suscitée par la musique se constitue au travers de la chorégraphie des attentes créée par le compositeur. Des cas explicites sont examinés et analysés dans le livre récent de David Huron (Huron, 2006).

Malgré son importance cognitive, l'attente musicale n'a pas été suffisamment prise en compte en informatique musicale (que ce soit dans l'analyse de données musicales ou pour d'autres types d'applications informatiques). Ainsi, la plupart des modèles computationnels des processus musicaux se structurent aujourd'hui à partir de la notion de *prédiction*. Cependant, du point de vue cognitif, la prédiction n'est pas l'unique résultat de l'attente musicale, mais juste un sous-produit de ce processus cognitif. Beaucoup d'effets d'attente musicale pourraient être unifiés dans un cadre global sous le terme de *comportement anticipatif*, défini comme un comportement qui non seulement dépend du passé et du présent, mais aussi d'une prédiction, d'une attente, ou d'une croyance sur le future (Butz *et al.*, 2003a).

Nous commençons cet article en section 2 par un survol des cadres cognitifs et computationnels de notre approche. Notre objectif est d'aboutir à une définition des *systèmes anticipatifs* et de leurs propriétés pouvant servir de cadre conceptuel pour le développement d'applications musicales. La section 3 propose de qualifier et quantifier l'information contenue dans un flux audio continu et temps réel à partir des outils mathématique de la géométrie de l'information. Ce cadre nous permettra de définir des entités informationnelles et d'utiliser leurs propriétés géométriques dans un espace riemannien pour gérer des séries temporelles et continues. En particulier, nous démontrons à travers deux exemples, la puissance de ce type d'abstraction pour résoudre des problèmes souvent considérés complexes dans le domaine de l'extraction de données musicales. La section 4 étudie la question de *comment* anticiper dans un système en interaction avec un environnement extérieur. Nous étudions cette question

dans le cadre de l'apprentissage interactif et en-ligne et nous exposons des résultats dans le cadre d'une application d'improvisation automatique. La section 5 aborde la question de la synchronisation de flux temps réel en utilisant une conception anticipative. En particulier, nous discutons comment l'accès à l'information temporelle pourrait permettre aux artistes et aux programmeurs d'écrire des processus temporels à l'instar de l'écriture musicale. Dans ce volet est illustré par *Antescofo*, un système de suivi de partition en temps réel couplé avec un langage synchrone pour la programmation de processus musicaux.

Cet article est une introduction aux travaux exposés dans la thèse (Cont, 2008b). Son objectif est d'introduire le concept de modélisation anticipative et de montrer leur efficacité dans la résolution de problèmes complexes qui se posent en informatique musicale. Le lecteur pourra se référer à cette thèse pour plus de détails. Les résultats de la section 3 sont également exposés dans (Cont *et al.*, 2011). Le travail décrit dans la section 4 est abordé suivant des angles différents dans (Cont *et al.*, 2010 ; 2007). Une version plus détaillée de la section 5 est publiée dans (Cont, 2010 ; 2008a).

2. De la modélisation de l'anticipation à la modélisation anticipative

L'*anticipation* en tant que processus, diffère de la *prédiction* et de l'*attente*. L'*attente* est une forme de connaissance mentale ou corporelle de l'arrivée vraisemblable d'un événement ou d'une classe d'événements (Huron, 2006). La *prédiction* est un processus qui estime le futur à partir du passé ou à partir d'une régularité environnementale dans le passé. Dans notre contexte, l'*anticipation* désigne un processus qui implique une prédiction sur lui-même et/ou l'utilisation d'une croyance sur son futur. Avant de spécifier notre approche de modélisation anticipative, nous présentons les différents cadres proposés en psychologie pour étudier le phénomène de l'attente musicale. Notre objectif est d'en retirer des concepts clés sur lesquels fonder une modélisation computationnelle.

2.1. Modélisation de l'anticipation musicale

La problématique de l'*attente musicale* dans le domaine de la perception musicale est large et touche plusieurs aspects et sous-domaines de recherche. L'idée est d'étudier ici la psychologie de l'attente à partir du point de vue spécifique de la modélisation en nous concentrant sur l'apprentissage auditif, la représentation mentale et la mémoire auditive. Il faut rappeler brièvement plusieurs faits:

- Le facteur déterminant pour l'apprentissage d'une régularité est sa *stabilité* environnementale ;
- les auditeurs sont sensibles à la statistique des événements dans leur environnement sonore, a qui met en évidence l'aspect statistique de l'apprentissage auditif (Saffran *et al.*, 1999 ; Loui *et al.*, 2006) ;
- l'exposition à un environnement stable donne lieu aux *attentes*, sous forme de *représentations mentales* ;

- les représentations mentales (ou attentes) ne sont pas exactes, ni infaillibles ;
- pour chaque phénomène sonore, il existe plusieurs représentations qui rivalisent et collaborent entre elles ;
- dans l’acte de perception, ces différentes représentations sont différenciellement favorisées en fonction de leurs succès *prédictifs* et de l’expérience individuelle de chaque individu. L’interaction avec l’environnement extérieur donne lieu à un renforcement et à une récompense.

Les *modèles* proposés dans la littérature pour l’*attente musicale* proviennent de domaines différents et peuvent être regroupés sous trois catégories: *théorie musicale*, *apprentissage automatique* et *théorie de l’information*. Au sein du premier groupe, nous étudions les modèles concernant l’*attente mélodique* et notamment les modèles proposés par Narmour (1992) et Margulis (2005). Les approches computationnelles venant de la théorie musicale ont la plupart du temps comme but d’imposer un cadre computationnel souvent simple au déroulement des flux d’information musicaux afin de répliquer des phénomènes liés à l’attente musicale provenant d’une analyse de la partition musicale. Ces modèles sont souvent biaisés par les préférences théoriques de leurs auteurs, parfois liées à un style particulier de musique. Le deuxième groupe en revanche n’a aucun présupposé quant aux données musicales et essaye d’apprendre les relations qui donnent lieu à la représentation mentale de l’attente à l’aide de l’apprentissage automatique. La troisième approche a donné lieu à une littérature récente (Dubnov, 2008). Elle utilise la théorie de l’information, l’apprentissage automatique implicite ainsi que les faillibilités des modèles appris à l’aide de leurs succès *prédictifs*.

Étant donné nos observations précédentes nous favorisons, dans le cadre de ce projet, les deux dernières approches d’apprentissage automatique et théorie d’information pour étudier les comportements anticipatifs musicaux. Les études cognitives autour de l’attente musicale suggèrent une approche pluraliste de ce phénomène, qui aborde directement la complexité des comportements musicaux sans une intellectualisation excessive du phénomène lui-même.

2.2. *Modélisation anticipative*

La légitimité d’un modèle universel qui formalise l’anticipation « en général » est discutable. Nous croyons que l’anticipation, comme définie auparavant, est un phénomène cognitif qui peut être explicitement intégré dans le processus de modélisation computationnelle de la musique et du son et qui donne lieu à des comportements musicaux complexes. Pour cela, plutôt que modéliser l’anticipation, nous voulons développer une « modélisation anticipative » dont le but est de concevoir des *systèmes anticipatifs* musicaux. Un système anticipatif est défini comme un système qui contient un modèle *prédictif* de lui-même et/ou de son environnement, qui permet des changements instantanés de son état actuel en accord avec sa prédiction afférente à un moment dans le futur (Rosen, 1985). Au contraire de la modélisation de l’anticipation, la modélisation anticipative ne tente pas d’expliquer le phénomène universel de

l'anticipation, mais tente de fournir des cadres computationnels pour concevoir des modèles qui anticipent. Cette définition a donné naissance à toute une littérature sur le sujet en particulier avec des applications en robotique.

Une telle approche globale de modélisation nécessite des outils computationnels adaptés à nos objectifs. Le cadre général que nous adoptons pour la modélisation anticipative est celui de l'*apprentissage adaptatif* à partir d'interactions *en ligne* et en *temps réel* avec un environnement extérieur. Ces interactions ont pour effet de mettre à jour les *croyances* du système sur son environnement dans les *mémoires* du système (ou ses *représentations mentales*) et de guider ses décisions dans le futur. Suivant (Butz *et al.*, 2003b), nous distinguons quatre approches schématiques de modélisation anticipative basées sur la conception des processus de décision markoviens partiellement observables, comme illustrés à la figure 1 :

Anticipation implicite: ces systèmes contiennent une entrée sensorielle et une sortie décisionnelle pour laquelle une prédiction du système n'est pas explicitement considérée dans son élaboration. Dans la plupart de ces modèles, la prise de décision est fondée sur une prédiction implicite basée sur le passé et le présent du système (figure 1a).

Anticipation amortie : ("payoff anticipation") si la prédiction est considérée en tant qu'amortissement des actions possibles, sans une considération explicite des états qui en résultent, il s'agit d'un système d'anticipation amortie (figure 1b).

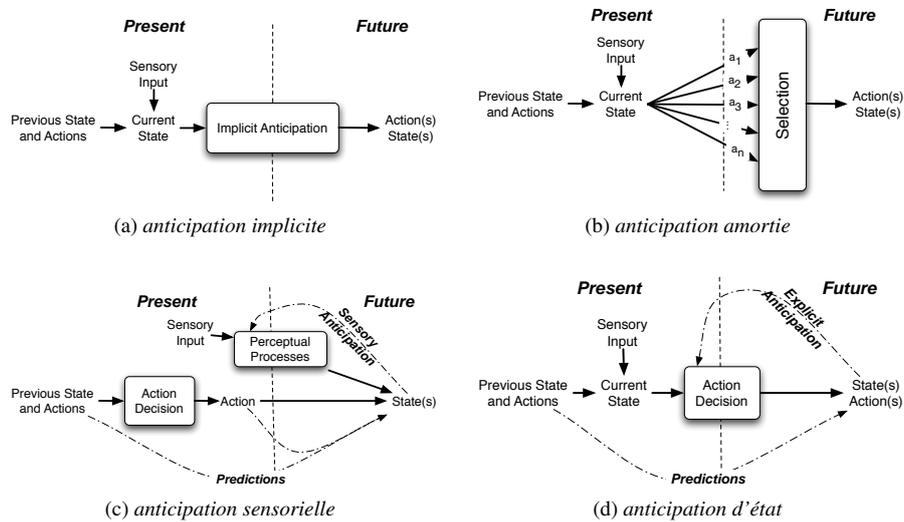
Anticipation sensorielle: la prédiction des états futurs du système peut influencer le traitement des entrées (ou module d'observation en termes computationnels). Cette conception computationnelle imite une fonction psychologique liée à l'*attention préparatoire* et correspond à un modèle prédictif explicite (figure 1c).

Anticipation d'état: quand le comportement (artificiel) d'un système est influencé par la prédiction d'état complet du système dans le futur, il s'agit de la forme la plus explicite de modélisation anticipative (figure 1d).

La modélisation anticipative a des implications spécifiques qui sont détaillées et considérées tout au long de cet article. En particulier, la modélisation anticipative repose sur :

1. **la disponibilité de l'information.** Le premier facteur dans un modèle anticipatif est l'*accès* rapide aux informations musicales *pertinentes* dans le contexte de l'interaction, de l'apprentissage et de la décision comportementale du système. Ce thème, abordé dans la section 3 de cette présentation, est développé dans la partie II de la thèse (Cont, 2008b) ;

2. **un apprentissage en ligne et interactif.** Si l'anticipation caractérise des systèmes dont les comportements laissent stables les représentations internes d'un environnement externe, alors la modélisation anticipative implique une forme d'apprentissage automatique qui est *interactif* et aussi *en ligne*. L'apprentissage dans ce contexte consiste à acquérir et à mettre à jour des représentations mentales (cf. section 3) et à acquérir des comportements anticipatifs issus des interactions et des échanges avec l'environnement. Ce point est étudié sous deux formes différentes dans les sections 4 et 5 et détaillé dans les parties III et IV de (Cont, 2008b) ;

FIGURE 1 – Modèles et schémas de conception anticipatifs d'après Butz *et al.* (2003b)

3. **une modélisation et une interaction multimodale.** Étant donné l'aspect concurrent des représentations mentales issues de l'attente, une modélisation anticipative est par nature *multimodale*. Les sections 4 et 5 présentent deux modèles différents destinés à deux applications musicales différentes.

3. Géométrie de l'information musicale

La première question qui se pose lors de l'élaboration d'un modèle anticipatif est celle de la représentation, du stockage et de l'accès à l'information dans un contexte interactif avec l'environnement. Cette thématique est classique dans la conception des systèmes d'extraction de données musicales¹ et plus généralement en informatique musicale. Une question qui se pose lors de chaque modélisation est : comment les informations sont présentées au système et quelle est leur pertinence. La littérature dans le domaine de l'extraction de données musicales (MIR) se concentre la plupart du temps sur une construction d'espaces métriques à partir de mesures de *similarité* entre les descripteurs audio. La *métrique* utilisée dans ce domaine varie beaucoup selon les chercheurs et les applications, souvent sans aucune considération explicite pour la validité mathématique des espaces construits. Parmi les approches existantes, la *temporalité* des signaux musicaux est prise en compte de manière très approximative en termes de modélisation. Par exemple, dans la plupart des modèles proposés dans la littérature MIR (à des fins de classification entre autres), une série temporelle de données

1. "Music Information Retrieval" (MIR).

musicales est considérée comme un « sac de descripteurs² » avant toute considération computationnelle, perdant la forte structure temporelle des structures musicales.

Par ailleurs, la théorie originale de l'information de Shannon (1948), qui estime l'*incertitude* des signaux, fournit peu de réponses à notre préoccupation de représentation et de fidélité des informations musicales. Pressing (1999) montre l'inconsistance des mesures élémentaires de la théorie de l'information pour exprimer la complexité des structures musicales. À cet égard, il est intéressant de remarquer que Warren Weaver dans son introduction à l'article phare de Shannon, constate que le travail de ce dernier n'aborde qu'une partie de la théorie du "traitement de l'information" qui exige que le problème soit étudié sur trois fronts: *technique*, *sémantique*, et *pragmatique*.

Nous proposons ici un cadre mathématique et complet fondé sur la littérature récente de *la géométrie de l'information* (Amari, Nagaoka, 2000) et en particulier sur la géométrie de Bregman (Nielsen *et al.*, 2007). Cette approche unifie plusieurs problématiques souvent utilisées dans les domaines de MIR notamment le traitement des signaux musicaux, la théorie de l'information, l'apprentissage statistique et la géométrie différentielle. Après une introduction au cadre mathématique, nous reformulons des notions souvent utilisées dans la littérature de MIR et en particulier les notions de similarité, de divergence, de modèles, etc. Nous illustrons notre proposition avec la présentation de deux algorithmes basés sur les principes de la géométrie de l'information musicale : le premier permet d'extraire automatiquement les structures musicales d'un flux audio, et le second est un algorithme rapide qui permet d'effectuer une recherche musicale dans une base de données. Tous les algorithmes et les méthodes proposés dans cette section sont destinés à une utilisation en ligne et en temps réel, et sont en conséquence parfaitement adaptés à la modélisation anticipative.

3.1. Cadre théorique

Dans notre cadre théorique les données sont présentées comme des *points* dans une *variété riemannienne*. La variété utilisée est une géométrie des structures statistique exponentielle ayant comme norme la mesure de l'information de Fisher, donnant lieu à une forme canonique et duale de connexion géométrique (Amari, Nagaoka, 2000). Pour compléter la géométrie informationnelle, nous introduisons la notion de *divergence* entre les points et les modèles statistiques, notion basée sur la famille canonique des divergences de Bregman (1967). Les divergences de Bregman ont les propriétés suivantes :

1. Il existe une *bijection* entre la famille des probabilités exponentielles et les divergences de Bregman (Banerjee *et al.*, 2005).
2. La variété peut être définie directement par les divergences canoniques de Bregman donnant lieu à une variété plate et une forme de connexion affine (Zhang, 2004), et donc utilisable dans un cadre computationnel.

2. "bag of features"

3. Les divergences canoniques de Bregman engendrent des “distances” déjà introduites dans la littérature en reconnaissance des formes et de traitement du signal notamment Kullback-Leibler, Itakura-Saito, la norme euclidienne, etc.

Etant donné deux points \mathbf{p} et \mathbf{q} dans la variété $\mathcal{X} \in \mathbb{R}^d$, la divergence de Bregman $D_F(\cdot||\cdot) : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ associée à une fonction strictement convexe et différentiable F est définie comme suit :

$$D_F(\mathbf{p}||\mathbf{q}) = F(\mathbf{p}) - F(\mathbf{q}) - \langle \nabla F(\mathbf{q}), \mathbf{p} - \mathbf{q} \rangle \quad (1)$$

où $\nabla F = \left[\frac{\partial F}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_d} \right]$ et $\langle \mathbf{p}, \mathbf{q} \rangle$ est un produit scalaire.

Cette fonction sur une variété informationnelle génère des objets géométriques comme les *bulles de Bregman*, les *centroïdes de Bregman*, l'*information de Bregman*, une notion de *bissecteur* et de *géodésique*, le plus important étant une dualité structurelle avec l'espace des paramètres d'attente qui est naturelle à l'aide d'une transformation de Legendre (définitions détaillées dans (Cont *et al.*, 2011 ; Cont, 2008b)).

Dans notre construction d'une géométrie des signaux musicaux, nous faisons l'hypothèse que les signaux arrivent d'une manière incrémentale (en ligne, en temps réel) et sont soumis à une analyse fréquentielle sur les fenêtres d'analyse. Dans cette approche, chaque point sur la variété d'information correspond à une distribution fréquentielle qui peut être convertie sans perte de généralité à une forme de distribution multinomiale.

Suivant Dubnov (2008), nous faisons la distinction entre deux sources d'information musicale, l'une liée aux *données*, et l'autre liée aux *modèles* qui établissent la structure géométrique, décrite ci-après. Dans chaque approche, nous cherchons à établir des méthodes pour évaluer la pertinence de l'information provenant de chacune des deux sources.

3.1.1. Géométrie des données

L'ensemble des données (ou points dans notre géométrie) engendre une information structurelle continue si le processus à partir duquel les données sont générées peut être considéré comme stationnaire. Dubnov (2008) propose une mesure du *taux d'information* fondée sur l'information mutuelle partagée entre les données musicales du passé et du présent, et montre son équivalence avec la mesure de “Spectral Flatness” souvent utilisée dans le traitement du signal. Dubnov *et al.* (2006) montrent également que cette mesure correspond à l'expérience des auditeurs ainsi qu'aux structures des sons naturels. Nous montrons mathématiquement³ que la mesure de Dubnov est automatiquement déduite, dans le cadre de la géométrie de l'information, comme l'*Information de Bregman* correspondant à une divergence d'Itakura-Saito sur la puissance du spectre.

3. Théorème 4.3 dans (Cont, 2008b)

3.1.2. Géométrie des modèles

Pour atteindre la structure réaliste des informations musicales, nous abordons le problème de la stationnarité en introduisant le concept de *modèle*. Un modèle est défini comme une séquence audio qui exhibe une stationnarité (ou quasi-stationnarité) interne. En d'autres mots, un sous-ensemble des points $\mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_{i+k}$ constitue un modèle θ_j s'il peut être considéré stationnaire sous un modèle probabiliste $P(\mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_{i+k} | \theta_j)$. Plus précisément, un modèle θ_i dans une variété duale de Bregman est défini comme un sous-ensemble des points temporellement continus qui forment une *sphère de Bregman* $B(\mu_i, R_i)$ de centre $\mu \in \mathbb{R}^d$ et de rayon R_i , définie comme

$$B_r(\mu_k, R_k) = \{\mathbf{x} \in \mathcal{X} : D_F(\mathbf{x}, \mu_k) \leq R_k\}.$$

Nous avons proposé un cadre théorique dans lequel les modèles peuvent être automatiquement extraits des signaux en temps réel. Ceci nécessite en particulier l'existence d'un espace métrique pour comparer la pertinence de l'information entre les modèles et les signaux. Nous construisons cet espace à partir d'une définition de la *similarité* dans laquelle la quantité de similarité n'est pas obtenue par une analyse des contenus mais par la *différence* entre les modèles. La distance dans un espace métrique doit être symétrique et doit vérifier l'inégalité triangulaire. Malheureusement, la divergence de Bregman liée à la géométrie considérée (qui engendre la distance de Kullback-Leibler comme divergence associée à une variété multinomiale) n'est *a priori* pas symétrique. Suivant Nielsen et Nock (2007) nous proposons une symétrisation, définie comme un problème d'optimisation, pour former à la fois les sphères de Bregman et pour calculer la divergence. Afin de satisfaire l'inégalité triangulaire, nous montrons qu'une divergence de Bregman approche cette inégalité dans le cadre d'un problème de maximum de vraisemblance. Or nous sommes dans ce cas, la dualité structurelle des variétés rendant le problème d'optimisation des sphères symétriques équivalent à un problème de maximum de vraisemblance convexe, voir (Cont *et al.*, 2011) pour les détails.

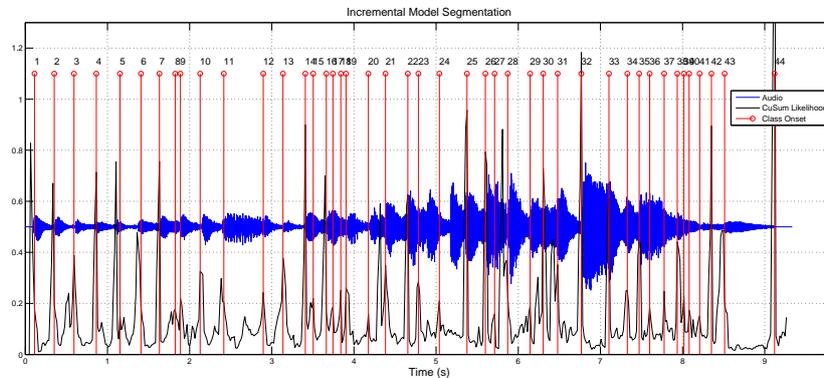
Suite à ces considérations, les *modèles* sur une variété continue peuvent être construits incrémentalement à l'aide d'un algorithme de détection de changement tel que *CUSUM* (Basseville, Nikiforov, 1993) avec un simple seuil d'information (défini comme *gain d'information*) pour ségmenter un flux audio en morceaux continus et quasi stationnaires. La figure 2 montre un exemple de segmentation non supervisée où les sept premiers modèles indexés coïncident avec les premières notes dans la partition musicale.

3.2. Audio Oracle: découverte automatique des structures musicales

Pour beaucoup d'applications, il est souhaitable et nécessaire d'avoir accès aux structures temporelles des flux musicaux en termes de régularité, répétitions, et recombinaisons d'éléments précédents. Dans notre cadre de géométrie de l'information, nous avons proposé un algorithme nommé *Audio Oracle* pour l'extraction automatique et en ligne de la structure temporelle à grande échelle. *Audio Oracle* apprend



(a) La partition d'extrait audio

(b) Résultats de segmentation avec $R = 0.15$ FIGURE 2 – Segmentation vers les *modèles* du premier thème de la Sonate N.1 de Beethoven, extrait d'un enregistrement de Friedrich Gulda (1950-58)

une structure de graphe dont chaque sommet correspond à *une donnée* (point) ou à *un modèle* (donc deux cadres d'utilisation) dans leur ordre temporel d'arrivée, et les arêtes correspondent aux liaisons structurelles. La figure 3 montre des diagrammes schématiques d'un *Audio Oracle* imaginaire dont chaque boîte correspond à un segment sonore avec des arêtes spécifiant la régularité structurelle du flux. En particulier, la figure 3b montre les relations de répétition de la figure 3a dans une visualisation étendue en formant un arbre temporel explicitant les préfixes et les suffixes de chaque segment dans la séquence.

Audio Oracle est l'extension d'un algorithme combinatoire nommé l'*oracle des facteurs* (Allauzen *et al.*, 1999) destiné à l'analyse de texte et des séquences ADN. La particularité d'*Audio Oracle* est son apprentissage incrémental ainsi que sa complexité linéaire dans le temps et l'espace. De plus, les arêtes structurelles (appries et construites en ligne) correspondent au suffixe ou au préfixe *le plus long* observé dans le passé.

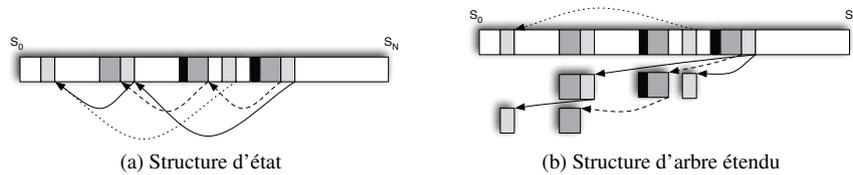
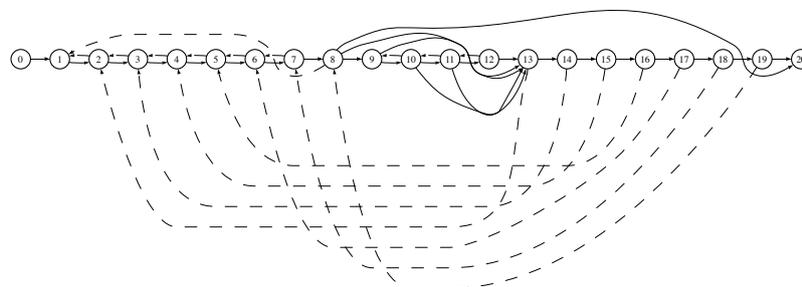
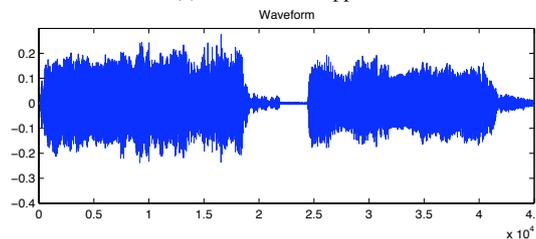


FIGURE 3 – Structure schématique d’un *Audio Oracle*.

La définition d’*Audio Oracle* dans le cadre de la variété informationnelle décrite auparavant permet d’accéder aux structures temporelles (répétitions) dans un espace métrique basé sur la similarité. Ces structures peuvent être apprises à partir des *des données* ou bien *des modèles* : les premières adressent les microstructures dans un flux sonore (comme les sons naturels), alors que les secondes correspondent à des structures à long terme (comme dans les morceaux de musique). La figure 4 montre un *Audio Oracle* appris sur un son naturel d’oiseau produit deux fois par l’animal et appris sur une analyse de coefficients fréquentielle de Mel (MFCC). Chaque sommet correspond à une trame d’analyse et les arêtes révèlent la régularité structurelle à une échelle fine.



(a) *Audio Oracle* appris



(b) Forme d’onde – deux énoncés naturels d’oiseau

FIGURE 4 – Exemple d’*Audio Oracle* basé sur les *données*.

La figure ?? montre un exemple d'*Audio Oracle* sur un morceau entier de musique (le 3^e mouvement de la 1^{re} sonate pour Piano de Beethoven⁴), basé sur *des modèles*. Dans cet exemple, une analyse structurale venant de la partition (de forme A, B, ...) est superposée aux résultats. Le diagramme du milieu montre le rapport temporel des arêtes (référence à un segment passé) et la figure en bas montre la taille maximum du rappel associé à un segment.

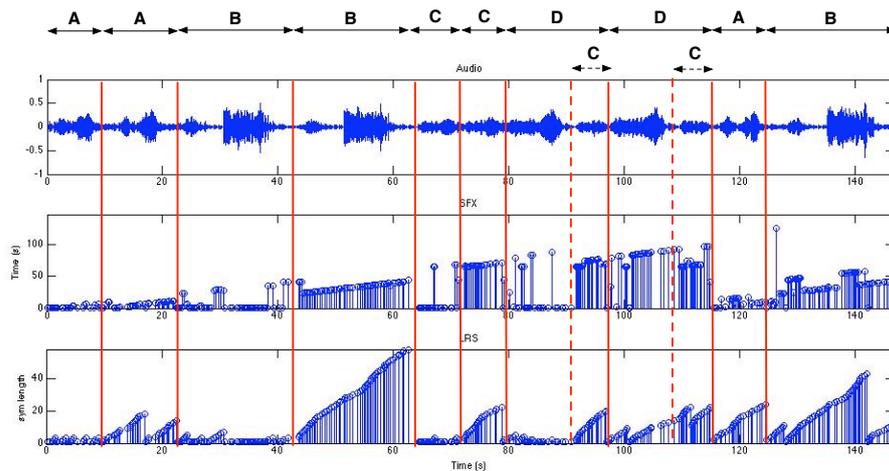
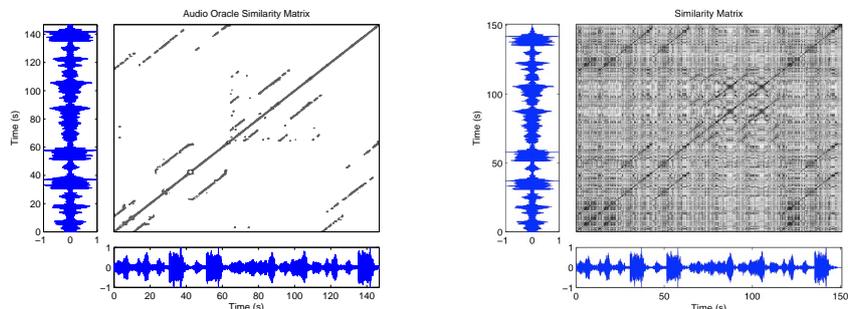


FIGURE 5 – Structure d'*Audio Oracle*: forme d'onde avec analyse structurale venant de la partition musicale (en haut), rappels temporels des arêtes (au milieu), et taille des rappels (en bas)

La structure d'état d'*Audio Oracle* de la figure 5 contient 440 états appris sur un flux audio de 9 500 trames et révèle la structure répétitive du morceau en question. Elle peut également être visualisée comme une matrice de similarité montrant le lien direct entre les trames comme illustrée à la figure 6a. Les entrées de cette matrice correspondent aux 440 états et les valeurs correspondent à la mesure de similarité entre les modèles sélectionnés. Pour comparaison, la figure 6b montre une matrice de similarité classique d'après (Foote, Cooper, 2003) (la référence en matière de calcul de similarité multimédia) entre les 9 500 trames d'audio et en utilisant une distance euclidienne sur une représentation MFCC des trames. ζ noter que la matrice de similarité de la figure 6b est calculée à partir de données très exhaustives ($9\,500 \times 9\,500$ trames) et son calcul n'est possible qu'en temps différé. Alors que la matrice de la figure 6a est obtenue en temps réel, d'une manière incrémentale et contient une matrice parcimonieuse de 440×440 .

Outre l'utilité d'*Audio Oracle* pour la découverte automatique des structures audio, les structures apprises donnent un accès rapide aux sous-parties audio à partir de leur

4. Interprété par Friedrich Gulda, Sony DECCA, date d'enregistrement 1950–1958.



(a) Matrice de similarité basée sur l'oracle de la figure 5 (b) Matrice de similarité audio d'après (Foote, Cooper, 2003)

FIGURE 6 – Comparaison des matrices de similarités sur l'exemple de la figure 5, produit par *Audio Oracle* (à gauche) et par un calcul de similarité traditionnel.

intersimilarité. Cette caractéristique est particulièrement utile dans les applications d'extraction et de recherche audio, ainsi qu'en apprentissage automatique.

3.3. *Guidage: recherche rapide et assemblage des données*

Ayant un accès rapide aux structures audio, il est tout à fait légitime de demander *comment* récupérer l'information pertinente dans un flux audio ou même dans une base de donnée musicale par une requête externe. Pour aborder cette question, nous avons développé *Guidage*, un algorithme de recherche dans les bases de données audio fondé sur des requêtes symboliques et qui est capable de rassembler les bouts de chaque fichier audio en les concaténant pour reconstruire un nouveau flux audio qui ressemble à la requête en question. *Guidage* repose sur un schéma classique de programmation dynamique et est destiné à une utilisation en temps réel. La particularité de *Guidage* dans son usage est qu'il est capable de rassembler des segments audio dont la combinaison n'existe pas dans la base de donnée pour répondre à une requête donnée. Dans cette perspective, *Guidage* aborde le problème de la sélection d'unité qui est au cœur de beaucoup des systèmes, comme par exemple en synthèse concaténative ou en extraction des données. Sur le plan algorithmique, la particularité de *Guidage* est son non-usage des trames audio et son exploitation en navigation directe sur les structures temporelles des données en utilisant des *Audio Oracles*. Dans ce sens, *Guidage* utilise des structures *Audio Oracles* comme métadonnée audio. Nous avons aussi montré que *Guidage* passe à l'échelle en termes de calcul et stockage des données.

A partir d'une requête audio et d'une cible, *Guidage* cherche des formes continues dans un *Audio Oracle* de la cible contenant des parties plus longues de requête. Le résultat de *Guidage* est un ensemble d'arbres de sommets, dont chaque sommet correspond à un état d'oracle sur la cible utilisée pendant l'assemblage et la synthèse

sonore. Comme avant, *Guidage* peut tourner sur les *modèles* ainsi que sur les *données*. La figure 7 montre un arbre résultant du *Guidage* tourné sur le premier thème de la première sonate de Beethoven (figure 2) comme requête et la sonate entière comme cible. Cet arbre montre plusieurs chemins de reconstructions possibles dont le chemin original (en gris) ainsi que les réapparitions du thème à deux reprises au cours de la pièce. Parmi tous ces chemins, l'un correspond à une reconstruction avec une similarité maximum à la séquence temporelle de la requête, reconstruction qui peut être resynthétisée en une séquence audio. La figure 8 montre des résultats sonores obtenus lors d'une séance de *Guidage* sur les *données* d'une base de donnée de boucles percussives, dont la figure 8b montre la forme d'onde de la requête, la figure 8a la forme d'onde de la cible avec des sous-parties utilisées pendant la concaténation (en gris), et la figure 8c le résultat de la synthèse concaténative aligné sur la requête⁵.

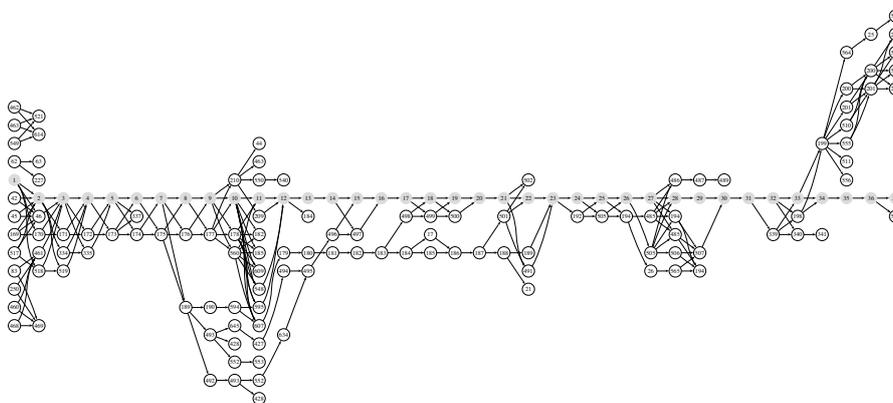
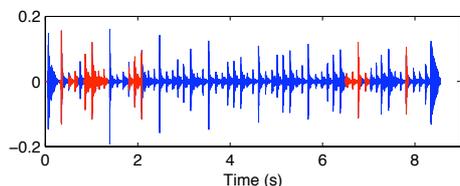


FIGURE 7 – Exemple d'arbre résultant de *Guidage* sur les *Audio Oracle* basés sur les *modèles* – la requête étant le premier thème de la première sonate pour piano de Beethoven (Figure 2), et la cible l'enregistrement entier de la Sonate. L'arbre présente les concaténations possibles de segments audio dans la cible qui s'approchent le plus de la requête. Le chemin grisé est le chemin de reconstruction optimale.

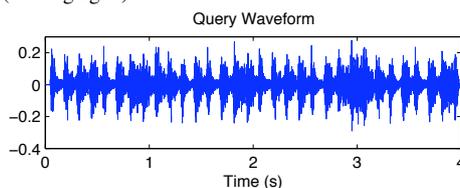
4. Apprentissage actif des comportements anticipatifs

Ayant accès aux structures d'information musicale, nous nous concentrons à présent sur l'apprentissage automatique des comportements anticipatifs vu comme un problème d'apprentissage d'une stratégie de planification de prises de décision. Pour aboutir à des comportements réactifs et proactifs décisionnels, l'apprentissage doit être interactif et adaptatif. Dans la recherche en informatique musicale, les domaines qui ont abordé cette problématique sont ceux de la modélisation stochastique de la musique, et de l'improvisation automatique et de l'imitation du style. Parmi les approches

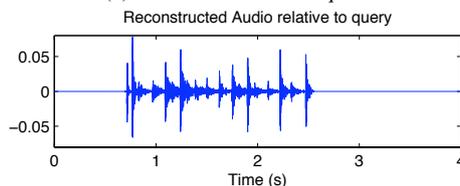
5. Pour voir et entendre plus de résultats : <http://cosmal.ucsd.edu/arshia/index.php?n=Main.Guidage>



(a) Forme d'onde de la cible et sous-facteurs trouvés (en rouge/gris)



(b) Forme d'onde de la requête



(c) Résultat de synthèse par concaténation

FIGURE 8 – Exemple d'extraction de donnée avec la synthèse de *Guidage* sur les données

développées, nous sommes particulièrement intéressés par les approches *agnostiques* dans lesquelles aucune connaissance musicologique n'est demandée ni *a priori* intégrée : le système apprend et accumule toute sa connaissance par une interaction implicite ou explicite avec un environnement extérieur. Les systèmes développés ont pour objectifs de générer automatiquement de la musique et diffèrent en grande partie par les modèles de *la mémoire* musicale du système et par les différentes approches de planification. Que ce soit en modélisation stochastique ou en improvisation automatique, l'apprentissage automatique est utilisé soit pour découvrir les structures existantes dans une base de donnée afin de les réutiliser pendant la génération, soit pour décider *des meilleures actions* pendant l'improvisation automatique. Ces deux problèmes sont parfois adressés implicitement dans la conception des systèmes. L'approche dominante aujourd'hui pour les modèles de mémoire est l'utilisation des variantes des chaînes de Markov. Le problème de planification en revanche est souvent indirectement abordé, soit en utilisant *une marche aléatoire* sur les modèles appris contrôlés par un musicien ou un utilisateur (Dubnov *et al.*, 1998 ; Pachet, 2002), soit par un échantillonnage des formes (Pearce *et al.*, 2004). Un problème souvent rencontré dans les systèmes existants est la difficulté de gérer les données multidimensionnelles (caractéristique fondamentale des signaux musicaux!), et d'atteindre, à partir de la génération automatique, la complexité sur le long terme observée dans une pièce de musique.

Nous avons développé un cadre d'apprentissage automatique qui adresse explicitement les deux problèmes décrits ci-avant ainsi qu'une partie de la complexité des données musicales. Notre approche est fondée sur un *apprentissage par renforcement* et sur un *apprentissage actif*.

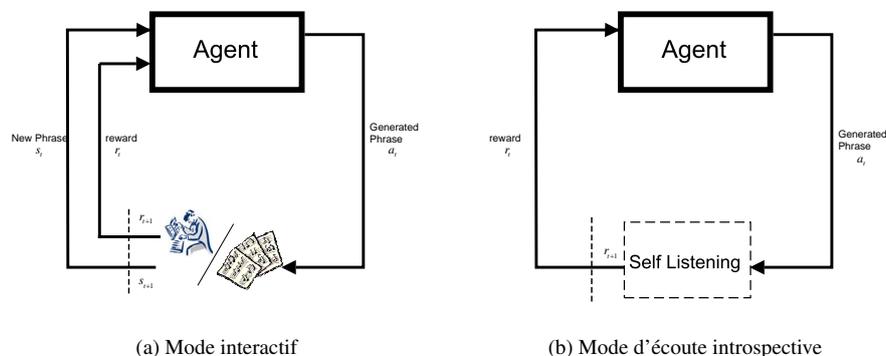
L'apprentissage par renforcement est une manière direct d'aborder le problème de l'apprentissage pour atteindre des comportements spécifiques à un environnement. L'apprenti, appelé *agent*, interagit avec *l'environnement*. L'agent et l'environnement interagissent continuellement, l'agent entreprend des actions et l'environnement répond à ces actions en représentant des situations nouvelles à l'agent. L'environnement donne aussi lieu à des *récompenses*, des signaux numériques que l'agent essaie de maximiser à chaque interaction. En ce sens, l'agent est interactif et adapte son comportement aux situations de chaque cycle d'interaction. Un problème d'apprentissage par renforcement peut être formalisé avec trois signaux en aller-retour entre le système et son environnement : un signal pour représenter les *actions* prises par l'agent, un autre pour représenter les *états* courants du système, et un troisième pour spécifier les cibles comportementales du système (à travers les *récompenses*) (Sutton, Barto, 1998). L'apprentissage est fait en simulant des épisodes d'actions et en mettant à jour, au travers d'expériences itérées, un comportement décisionnel appelé *stratégie*. Ce cadre d'apprentissage aborde le problème de l'apprentissage automatique dans un environnement changeant, mais n'aide pas l'agent à *explorer activement* son environnement et exige souvent un temps suffisamment long pour atteindre des états *pertinents* dans chaque interaction. Ce problème est traité dans l'apprentissage actif où l'agent, à l'aide d'un *oracle*, choisit lui-même les états pertinents pour une mise à jour automatique. Dans ce cadre, les récompenses sont remplacées par des *guides* qui non seulement fournissent au système des signaux de récompenses mais aussi dirigent l'apprentissage dans la construction d'une mémoire pertinente des états du système.

Le système d'apprentissage que nous avons développé repose sur deux modes de comportements interactifs, illustrés en figure 9. Dans le premier, le système est en interaction avec un environnement extérieur qui peut être un musicien, une partition musicale observée en séquences, etc. Dans le deuxième, le système est en interaction avec lui-même et donc en écoute introspective. Ce deuxième mode est utilisé pendant les phases de génération.

L'architecture du système ressemble à celle du système *dyna* (Sutton, 1991), augmenté par une architecture multi-agent collaborative et compétitive. Chaque agent dans cette conception contient un aspect spécifique de représentation mentale de l'environnement, un apprenti, et un preneur de décision. L'architecture globale articule trois composants principaux :

1. *Les modèles de mémoire* constituent des représentations par état de la connaissance ainsi que des actions passées. Nous utilisons les *Audio Oracle* présentés précédemment comme des modèles de mémoire du système.

2. *La sélection active* contrôle les transactions entre l'environnement et les agents génératifs, et réalise le *guidage* des apprentis vers les états pertinents. Naturellement, nous avons adopté l'algorithme *Guidage* avec quelques modifications pour ce compo-

FIGURE 9 – Les modes d'opérations d'*apprentissage actif*

sant du système.

3. *L'apprenti anticipatif* est responsable de l'apprentissage des *stratégies* de chacun des agents. Cet apprentissage est anticipatif car nous sommes intéressés à apprendre des valeurs anticipatoires associées à chaque pair état/action dans les modèles et non uniquement leur valeur instantanée prédictive.

Dans chaque cycle d'interaction il y a deux types d'apprentissage : un pour apprendre et mettre à jour des modèles de mémoires (*Audio Oracles* de chaque agent), et un autre pour apprendre les valeurs stratégiques d'espace des paires état/action. Ce deuxième est similaire à un algorithme simple de *Q-Learning* (Sutton, Barto, 1998), avec une extension vers un apprentissage multi-agent compétitif et collaboratif, basé sur la mémoire, et guidé par une *sélection active*. ζ chaque instant de l'apprentissage (ou génération) le comportement d'ensemble du système est le résultat de la collaboration entre les agents (dont chacun est responsable d'un aspect d'information environnementale) en suivant *un agent de comportement* choisi au début de chaque épisode à partir d'un processus de sélection compétitive entre agents. La compétition entre agents est gérée par une distribution de Boltzmann sur les valeurs apprises précédemment, et la collaboration influence les autres agents par l'agent de comportement à l'aide d'une méthode d'*Importance Sampling*.

L'objectif d'une telle architecture est de montrer qu'un apprentissage anticipatif et interactif est capable de capturer le comportement anticipatif long terme et aussi de générer des structures complexes en présence de peu de données d'apprentissage.

La figure 10 montre la partition résultante du système dans un environnement multi-agent destiné à l'improvisation automatique et l'imitation du style musical. L'apprentissage a eu lieu sur les données extraites de la partition de l'*Invention à deux voix n. 3* de J. S. Bach, en mode interactif (figure 9a), et la génération en mode d'écoute introspective (figure 9b). Un œil averti peut identifier sur la partition produite des

formes musicales et temporelles long terme (élémentaires) implicitement apprises à partir du morceau de J. S. Bach ⁶.

Improvisation Session after learning on Invention No.3 by J.S.Bach

The image shows a musical score for piano, titled 'Improvisation Session after learning on Invention No.3 by J.S.Bach'. The score is written in G major (one sharp) and 3/4 time. It consists of five systems of two staves each. The notation includes various rhythmic patterns, accidentals, and dynamic markings such as 'a' and 'p'. The score is a transcription of an improvisation session following the learning of Invention No. 3 by J.S. Bach.

FIGURE 10 – Résultat d’une session d’imitation de style après une session d’apprentissage actif sur la troisième *Invention à deux voix* de J. S. Bach

5. Synchronisation anticipative

Un des sujets importants pour lequel la notion d’anticipation vient au secours de la modélisation est la gestion de *la temporalité* vue comme dans un problème de synchronisation temps réel. La synchronisation temps réel est un des soucis principaux des systèmes interactifs de la musique informatique (et même, plus généralement, de l’art numérique). Dans un contexte de musique mixte (où un ordinateur joue aux côtés d’un musicien humain), le problème de la synchronisation peut se résumer à trouver en temps réel la position dans la partition de ce que joue le musicien, afin que l’ordinateur puisse se comporter comme un deuxième musicien muni de sa propre partition numérique.

Les systèmes abordant cette problématique sont classiquement appelés des *sui-veurs de partition*. Le suivi de partition se trouve au cœur de la musique électronique temps réel à la fois lors de l’écriture de la pièce et lors de son interprétation. La partition constitue en effet l’outil principal permettant *l’écriture du temps et de l’interaction* dans la musique informatique en temps réel.

6. Pour entendre des résultats: <http://cosmal.ucsd.edu/arshia/index.php?n=Main.Improvisation>

Lors d'une session de concert ou de répétition entre deux musiciens humains, un élément clé de synchronisation est l'anticipation par chaque musicien de son propre comportement ainsi que du comportement futur de son collègue. Pour une synchronisation automatique entre une machine et environnement extérieur (musiciens), nous proposons un modèle anticipatif multi-agent capable d'imiter l'anticipation temporelle réalisée par les humains. Le modèle proposé est basé sur des chaînes hybrides Markov/Semi-Markov cachées. Les chaînes hybrides sont construites à partir d'une partition musicale et contiennent plusieurs sémantiques temporelles souvent utilisées dans l'écriture musicale. La synchronisation se résume à trouver l'état le plus probable dans la chaîne à partir d'une observation audio en temps réel. Ce problème est un problème classique d'inférence. La particularité de notre approche réside dans une conception fondée sur deux agents audio et tempo qui travaillent en parallèle et qui sont *couplés*. L'agent tempo existe sur l'échelle des *événements* (par exemple la production d'une note) et est basé sur le modèle cognitif des structures métriques musicales de Large et Jones (1999). Nous avons étendu ce modèle pour fournir les paramètres de tempo prédictif et les fonctions probabilistes de survie en temps réel à l'algorithme d'inférence. L'agent audio, lui, vit sur une échelle continue (correspondant au flux audio). Ce schéma est un modèle anticipatif sensoriel car les probabilités de vraisemblance sont influencées dynamiquement par le tempo prédit, et en retour l'agent tempo est directement affecté par la décision obtenue par l'agent audio. La figure 11 montre l'architecture globale du système.

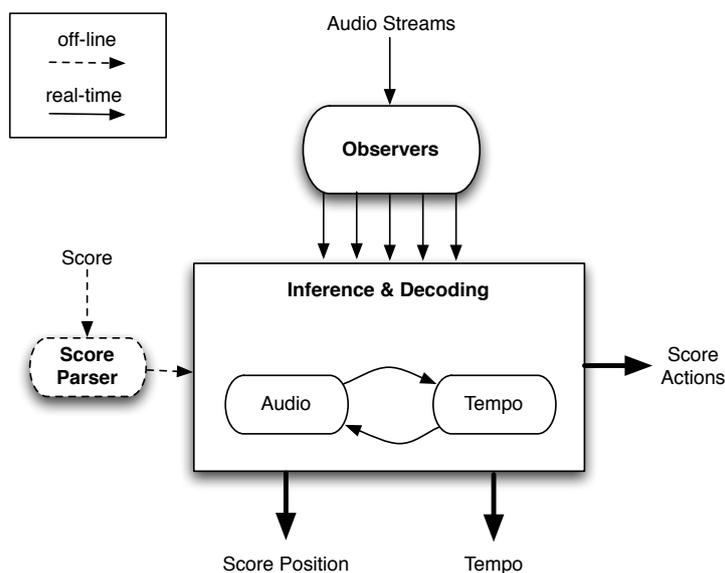
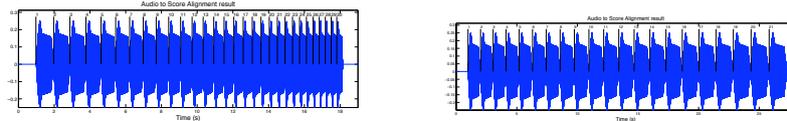


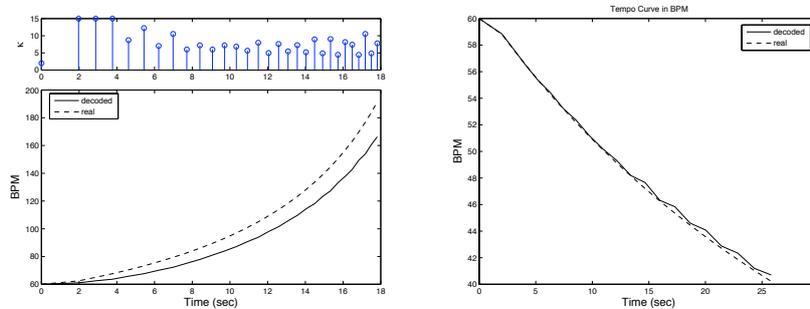
FIGURE 11 – Architecture générale de synchronisation anticipative

L'agent tempo correspond à un modèle adaptatif de filtre de Kalman étendu. Dans cette approche, les filtres sont la version circulaire des gaussiennes (ou distribution de *von Mises*) et leurs paramètres de variance (κ) sont adaptés à l'erreur de prédiction

à chaque instant d'activation. Le résultat de cet agent à chaque activation est donc le tempo prédit et une estimation de survie des événements futurs utilisés directement dans la formulation de l'inférence. La figure 12 montre deux exemples sonores de la même partition rythmiquement homogène ("noire" pour toutes les notes) mais accéléré pour l'un et ralenti pour l'autre, et les résultats du décodage de tempo (en BPM) pour les deux.



(a) Forme d'onde d'audio synthétique à partir d'une partition homogène accélérée (gauche) et ralentie (droit)



(b) Tempo estimé et tempo réel pour l'accélération et le ralentissement

FIGURE 12 – Exemple du décodage de tempo pour le changement continu du tempo

Le système proposé est entièrement polyphonique et testé sur des bases de donnée de morceaux de musique pré-alignés pour évaluer la précision de la synchronisation temps réel. Les résultats d'évaluation donnent une précision totale de 91.49% sur un ensemble de plus de 30 minutes de musique variée en style et en instrumentation.

Vers une langage synchrone temps réel pour la composition musicale

L'application d'un tel système de synchronisation entre un musicien et une partition musicale en temps réel, va de l'*accompagnement automatique* (où le musicien joue la partie solo et l'ordinateur la partie orchestre) jusqu'à la *composition musicale mixte* avec des dispositifs informatiques temps réel (comme des effets et synthèses sonores et spatiales). Dans son utilisation dans un contexte de création tel que la composition musicale, les éléments d'accompagnement électronique ne sont pas statiques et peuvent engendrer des programmes dynamique à la fois en termes de résultats finaux, mais aussi en termes de temporalité à l'image d'une écriture musicale classique. Ces éléments sont aussi par nature parallèles, à l'image de la polyphonie musicale.

L'idée d'une écriture musicale en informatique lors de la phase de composition, et son interprétation en temps réel lors de la performance musicale, est d'une manière

étonnante, proche du paradigme de programmation réactif et synchrone (Halbwachs, 1993). Une partition musicale peut être vue comme un programme déterministe, évalué en temps réel (performance) malgré toutes les variabilités temporelles et événementielles d'une interprétation musicale. Ce qui compte est la synchronisation des événements comme indiquée dans la partition et leur ordonnancement temporel.

L'accès au temps anticipatif décrit dans notre système de synchronisation rend possible l'ordonnancement des programmes électroniques relativement à une horloge musicale (le *tempo*) afin de coupler l'évaluation temps réel avec le musicien. L'intégration du système de synchronisation et reconnaissance décrit ci-dessus avec un langage synchrone pour la composition musicale est implémentée dans le système Antescofo⁷. La figure 13 montre une partition Antescofo simple, avec la partie instrumentale (destinée à être jouée par un instrumentiste) couplée à des programmes synchrones et concurrents (représentés sous forme de boîtes). Chaque bloc de programme est constitué d'une série de message cadencé sur le temps musical (celui de l'instrumentiste), qui réalise les processus de musique électronique en temps réel. La longueur de chaque bloc est relative au tempo de la partie instrumentale et l'ordonnancement d'Antescofo prend en charge la synchronisation du contenu avec le musicien en temps réel.



FIGURE 13 – Une partition d'Antescofo montrant la partie instrumentale et l'accompagnement (partie électronique temps réel) comme boîtes de programmes concurrents.

Antescofo s'insère dans l'environnement de programmation graphique *MaxMSP* (Cycling74, 2011) et *PureData* (Puckette, 1997). Il a été utilisé dans plusieurs concerts de musique contemporaine, pour jouer la partie électronique des œuvres, notamment avec l'orchestre Philharmonique de Los Angeles, l'Orchestre Écossais de la BBC, l'Ensemble Intercontemporain, l'Orchestre de Radio France, et l'Opéra La Scala, parmi d'autres exemples. Antescofo est aujourd'hui le système de base du suivi de partition et d'écriture synchrone temps réel à l'IRCAM pour plusieurs pièces comme

7. <http://repmus.ircam.fr/antescfo>

celles de Macro Stroppa, Pierre Boulez, et Philippe Manoury, avec de nombreux projets de productions à venir⁸.

6. Conclusion

Percevoir est un processus temps réel par nature qui fait appel constamment à notre capacité d'anticipation. Le travail présenté dans cet article a pour objectif de développer des modèles de l'anticipation afin de prendre en compte explicitement ce phénomène cognitif dans la boucle de la conception informatique. Nous distinguons entre prédiction, attente et anticipation et nous avons introduit quelques méthodologies de modélisation en section 2. Les sections 3 à 5 ont présenté plusieurs problèmes complexes en traitement du signal et apprentissage automatique sous l'angle des systèmes anticipatifs.

Le cadre de la géométrie de l'information introduit en section 3 permet de s'attaquer à des problèmes complexes tels que la représentation de l'information continue et en temps réel à des fins de recherche ou pour la reconnaissance automatique des structures régulières. La géométrie de l'information musicale est aujourd'hui un champ de recherche à part entière qui pourrait résoudre le divorce actuel entre le niveau signal et le niveau symbole dans l'information musicale.

La section 4 propose un cadre d'apprentissage actif en interaction avec un environnement extérieur pour apprendre des représentations "mentales" qui constituent la croyance anticipative d'un système numérique. Les systèmes similaires à celui décrit reposent en générale sur un corpus énorme d'information pour apprendre des modèles et sont biaisés par la notion de prédiction. Nous montrons comment en introduisant le concept d'anticipation dans la conception, le temps et l'espace des interactions nécessaires à l'apprentissage peuvent être réduits.

Le système *Antescofo* introduit en section 5 constitue aujourd'hui une référence pour la synchronisation temps réel et la programmation synchrone des pièces mixtes pour électronique et instruments de musique. Le succès d'*Antescofo* dans sa communauté est lié à une modélisation anticipative, proche des pratiques humaines, qui permet non seulement d'ordonner des tâches en temps réel, mais aussi d'écrire le temps (lors de la composition).

Les travaux exposés dans cet article, issus de (Cont, 2008b), ne constituent qu'un premier pas dans la modélisation des systèmes temps réel pour la musique. Les applications qui ont été développées, si elles fournissent des réponses à des problèmes importants dans leur domaine respectif, ne représentent toutefois qu'une validation de principe et une étude de faisabilité des apports de la modélisation anticipative. Nous voulons continuer à développer cette voie, et nous espérons également pouvoir montrer que la musique constitue un domaine pertinent et suffisant pour étudier la complexité et la cognition temporelles.

8. Pour suivre les événements musicaux liés à *Antescofo* : <http://repmus.ircam.fr/Antescofo/events>

Bibliographie

- Allauzen C., Crochemore M., Raffinot M. (1999). Factor oracle: A new structure for pattern matching. In *Conference on current trends in theory and practice of informatics*, p. 295-310. citeseer.ist.psu.edu/allauzen99factor.html
- Amari S., Nagaoka H. (2000). *Methods of information geometry* (vol. 191). Oxford University Press. (Translations of mathematical monographs)
- Banerjee A., Merugu S., Dhillon I. S., Ghosh J. (2005). Clustering with bregman divergences. *Journal of Machine Learning Research*, vol. 6, p. 1705–1749.
- Basseville M., Nikiforov I. V. (1993). *Detection of abrupt changes: theory and application*. NJ, USA, Prentice-Hall, Inc.
- Bregman L. M. (1967). The relaxation method of finding the common point of convex sets and its application to the solution of problems in convex programming. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 7, p. 200–217.
- Butz M., Sigaud O., Gérard P. (2003a). Anticipatory behavior: Exploiting knowledge about the future to improve current behavior. In *Anticipatory behavior in adaptive learning systems*, p. 1-10. Springer-Verlag.
- Butz M., Sigaud O., Gérard P. (2003b). Internal models and anticipations in adaptive learning systems: Foundations, theories, and systems. In M. Butz, O. Sigaud, P. Gérard (Eds.), *Anticipatory behavior in adaptive learning systems: Foundations, theories, and systems*, p. 86-109. Springer-Verlag.
- Cont A. (2008a, August). Antescofo: Anticipatory synchronization and control of interactive parameters in computer music. In *Proceedings of international computer music conference (icmc)*. Belfast.
- Cont A. (2008b). *Modeling musical anticipation: From the time of music to the music of time*. Thèse de doctorat non publiée, University of Paris 6 and University of California in San Diego.
- Cont A. (2010). A coupled duration-focused architecture for realtime music to score alignment. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, n° 6, p. 974-987. <http://articles.ircam.fr/textes/Cont09a/>
- Cont A., Assayag G., Dubnov S., Bloch G. (2010, August). The structure of style. In S. D. Kevin Burns Shlomo Argamon (Ed.), p. 219-246. Springer Verlag.
- Cont A., Dubnov S., Assayag G. (2007). Anticipatory model of musical style imitation using collaborative and competitive reinforcement learning. In B. M.V., S. O., P. G., B. G. (Eds.), *Anticipatory behavior in adaptive learning systems*, vol. 4520, p. 285-306. Berlin, Springer Verlag. <http://www.springerlink.com/content/978-3-540-74261-6/>
- Cont A., Dubnov S., Assayag G. (2011, May). On the information geometry of audio streams with applications to similarity computing. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, vol. 19, n° 4. <http://articles.ircam.fr/textes/Cont10b/index.pdf>
- Cycling74. (2011). *Max/msp realtime graphical programming environment*. <http://www.cycling74.com/>

- Dubnov S. (2008). Unified view of prediction and repetition structure in audio signals with application to interest point detection. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 16, n° 2, p. 327-337.
- Dubnov S., Assayag G., El-Yaniv R. (1998). Universal classification applied to musical sequences. In *Proc. of icmc*, p. 322-340. Michigan.
- Dubnov S., McAdams S., Reynolds R. (2006). Structural and affective aspects of music from statistical audio signal analysis. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 57, n° 11, p. 1526–1536. (Special Topic Section on Computational Analysis of Style)
- Foote J., Cooper M. (2003). Media segmentation using selfsimilarity decomposition. In *Proceedings of spie storage and retrieval for multimedia databases*, vol. 5021, p. 167-175.
- Halbwachs N. (1993). *Synchronous programming of reactive systems*. Kluwer Academics.
- Huron D. (2006). *Sweet anticipation: Music and the psychology of expectation*. MIT Press.
- Large E. W., Jones M. R. (1999). Dynamics of attending: How people track time-varying events. *Psychological Review*, vol. 106, n° 1, p. 119-159.
- Loui P., Wessel D., Kam C. H. (2006). Acquiring new musical grammars: a statistical learning approach. In *28th annual conference of the cognitive science society*, p. 1711-1716. Vancouver, Canada, Cognitive Science Society. <http://ist-socrates.berkeley.edu/~psyche/Research/CogSci2006.pdf>
- Margulis E. (2005). A model of melodic expectation. *Music Perception*, vol. 22, n° 4, p. 663-714. <http://caliber.ucpress.net/doi/abs/10.1525/mp.2005.22.4.663>
- Meyer L. B. (1956). *Emotion and meaning in music*. Univ. of Chicago Press.
- Narmour E. (1992). *The analysis and cognition of melodic complexity: The implication-realization model*. The University of Chicago Press.
- Nielsen F., Boissonnat J.-D., Nock R. (2007). On bregman voronoi diagrams. In *Proc. 18th acm-siam sympos. discrete algorithms*. <http://cgall.inria.fr/Publications/2007/NBN07>
- Nielsen F., Nock R. (2007). On the centroids of symmetrized bregman divergences. *Arxiv.org*. <http://arxiv.org/abs/0711.3242>
- Pachet F. (2002, September). The continuator: Musical interaction with style. In *Proc. of international computer music conference*. Gotheborg, Sweden.
- Pearce M., Conklin D., Wiggins G. (2004). Methods for combining statistical models of music. In U. K. Wiil (Ed.), *Computer music modelling and retrieval*, p. 295–312.
- Pressing J. (1999). Cognitive complexity and the structure of musical patterns. In *Proceedings of the 4th conference of the australasian cognitive science society*. Newcastle.
- Puckette M. (1997, September). Pure data. In *Proc. int. computer music conf.*, p. 224–227. Thessaloniki, Greece. <http://www.crca.ucsd.edu/~msp>
- Rosen R. (1985). *Anticipatory systems* (vol. 1). Oxford, Pergamon Press.
- Saffran J. R., Johnson E. K., Aslin R. N., Newport E. L. (1999). Statistical learning of tonal sequences by human infants and adults. *Cognition*, vol. 70, p. 27-52.

- Shannon C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System technical journal*, vol. 27, p. 379-423.
- Sutton R. S. (1991). DYNA, an Integrated Architecture for Learning, Planning and Reacting. In *Working notes of the AAAI spring symposium on integrated intelligent architectures*. citeseer.ist.psu.edu/sutton91dyna.html
- Sutton R. S., Barto A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction*. MIT Press. <http://www.cs.ualberta.ca/~sutton/book/ebook/the-book.html>
- Zhang J. (2004). Divergence function, duality, and convex analysis. *Neural Comput.*, vol. 16, n° 1, p. 159–195. <http://neco.mitpress.org/cgi/content/full/16/1/159>