

UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Modèles, algorithmes et logiciels pour l'harmonisation de mélodies

Nathan LECLERCQ

Master Informatique
Master mention Informatique



DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE
Faculté des Sciences et Technologies

novembre, 2024

Ce mémoire satisfait partiellement les pré-requis du module de Mémoire de Master, pour la 2^e année du Master mention Informatique.

Candidat: Nathan LECLERCQ, N° 11700804,
nathan.leclercq.etu@univ-lille.fr

Encadrant(e): Mathieu GIRAUD, mathieu.giraud@univ-lille.fr



DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE
Faculté des Sciences et Technologies
Campus Cité Scientifique, Bât. M3 extension, 59655 Villeneuve-d'Ascq

novembre, 2024

Résumé

Notre recherche vise à dresser un état de l'art récent sur l'harmonisation automatique de mélodies, avec un accent particulier sur les techniques ne nécessitant pas d'entraînement préalable. Comment les méthodes actuelles, notamment celles qui s'affranchissent de l'apprentissage profond et des modèles complexes, parviennent-elles à harmoniser efficacement une mélodie ? Cette question cherche à évaluer les progrès et les tendances du domaine et à en identifier les acteurs.

Pour notre question de recherche, nous allons effectuer une recherche bibliographique. Cela nous permettra de comprendre les avancées récentes dans le domaine de l'harmonisation mélodique, en particulier celles ne nécessitant pas d'apprentissage préalable, et d'identifier les tendances actuelles et futures.

Le protocole est le suivant : on commencera par identifier les sources primaires pour identifier les articles et travaux récents dans le domaine de l'harmonisation mélodique puis dans un second temps on analysera les méthodes ainsi décrites pour enfin les comparer et synthétiser tout cela en mettant l'accent sur les innovations, les améliorations de performance et les limitations.

Chapitre 1

Introduction

L'harmonisation automatique de mélodies est un défi complexe en informatique musicale. Elle combine les connaissances musicales et des approches algorithmiques pour créer des harmonisations qui respectent les règles musicales tout en proposant des solutions innovantes.

1.1 Problématique

Comment les méthodes actuelles, notamment celles ne nécessitant pas d'apprentissage profond, parviennent-elles à harmoniser efficacement une mélodie ? Quels sont les avantages et limites de ces approches ?

Le plan suit une progression logique allant des bases conceptuelles et théoriques aux méthodes pratiques et leur évaluation. Cette structure favorise une compréhension approfondie des enjeux, des méthodes, et des applications dans le domaine.

Chapitre 2

Fondements théoriques de l'harmonisation

Ce chapitre pose les bases théoriques nécessaires pour comprendre l'harmonisation d'un point de vue musical et informatique. Il explore les concepts fondamentaux de l'harmonie musicale ainsi que leur traduction en représentations manipulables par des algorithmes. Il a pour but de donner les clefs de compréhension du domaine en étant le plus accessible et imagé possible (pour les gens intéressés).

2.1 Concepts musicaux essentiels

On définira ici les notions fondamentales : accords, tonalité, fonctions harmoniques. Exposition des règles traditionnelles et des différents styles d'harmonisation (à quatre voix, accords simples).

On s'appuiera par exemple sur les bases de l'harmonisation traditionnelle dans le style de Bach, exposées dans la fiche 1 (Makris et al.), qui distingue les mélodies soprano des lignes de basse.

Cela permet l'introduction des concepts musicaux nécessaires à la compréhension des modèles algorithmiques présentés plus tard.

L'explication des concepts fondamentaux ouvre la voie à la manière dont ces éléments peuvent être représentés et manipulés dans un cadre informatique.

2.2 Représentation informatique de la musique

Ici on parlera des techniques pour encoder la musique : notations MIDI, formats de partitions (MusicXML), structures de données pour manipuler les notes et accords.

Par exemple, on pourra décrire les vecteurs de contexte pondérés pour représenter les notes (fiche 2, Van Kranenburg et Kearns).

Le passage de la théorie musicale à sa modélisation numérique, essentielle pour les approches algorithmiques.

Chapitre 3

Modélisation et algorithmes pour l’harmonisation automatique

Ce chapitre examine les principales approches algorithmiques utilisées pour générer des harmonisations automatiques. Il présente des méthodes allant des systèmes basés sur des règles jusqu’à des techniques avancées d’optimisation et de représentation hiérarchique.

3.1 Approches basées sur les règles

On parlera d’abord des systèmes « rule-based » tels que l’algorithme EMI. Description des limites, comme le manque de flexibilité face aux mélodies complexes.

Par exemple, les résultats obtenus par l’algorithme EMI et comparaisons avec des modèles probabilistes (fiche 1).

Cela permet l’introduction des concepts musicaux nécessaires à la compréhension des modèles algorithmiques présentés plus tard.

Les limites des systèmes basés sur les règles justifient l’exploration de techniques probabilistes capables de mieux s’adapter aux variations musicales. On peut adopter des modélisation différentes pour mieux représenter d’autres aspects d’une partition.

3.2 Approches probabilistes et interpolation

Comme le titre le précise, on décrira les Hidden Markov Models (HMM), interpolations de modèles probabilistes pour intégrer les tonalités et rythmes.

On s'appuiera par exemple sur "Modèle probabiliste interpolé de Raczynski et al. (fiche 3)", ayant montré des résultats supérieurs aux approches basées sur les règles.

Cela permet d'introduire des techniques avancées intégrant les probabilités, prélude aux méthodes plus complexes.

3.3 Représentations structurées et grammaires

Il d'agit de grammaires non contextuelles et parsing d'arbres syntaxiques pour capturer les relations harmoniques hiérarchiques.

La fiche de lecture 4 "Algorithme de parsing basé sur Metropolis-Hastings" illustre la structuration des accords en arbres hiérarchiques.

Chapitre 4

Évaluation des méthodes d'harmonisation

Ce chapitre propose une présentation des techniques d'évaluation des méthodes d'harmonisation en définissant des critères, des protocoles expérimentaux. On fera ensuite une analyse comparative des méthodes présentées plus tôt pour mesurer leur efficacité et leurs limites.

4.1 Critères d'évaluation

Il faudra définir des critères les notions de mesures objectives (précision, rappel), d'évaluations perceptives (note moyenne d'experts), et de respect des règles harmoniques.

Par exemple, la notation de la fiche 2 attribuée par des experts aux harmonisations générées avec les vecteurs de contexte (fiche 2).

Pour appliquer ces critères, des méthodologies robustes et des datasets de référence pertinents sont nécessaires.

4.2 Méthodologies

On décrira le protocole expérimental pour tester les algorithmes sur des datasets tels que des mélodies populaires annotées.

On pourra illustrer cela en évoquant la comparaison des modèles probabilistes interpolés avec les HMM sur des morceaux annotés (fiche 3).

4.3 Comparaison des approches

On Analyse les différentes modélisation et évaluation des modèles couverts précédemment par les chercheurs pour les comparer avec des critères similaires. On pourra dégager des avantages et des inconvénients.

Une observation type pourrait être "Les algorithmes génétiques permettent une exploration optimale de l'espace harmonique, comme démontré dans les résultats de la fiche 5".

Chapitre 5

Implémentations et applications

Ce chapitre explore les outils logiciels et applications pratiques qui mettent en œuvre les concepts étudiés, tout en évaluant leur impact dans des contextes réels tels que l'éducation musicale ou la création artistique.

5.1 Outils et frameworks

On commencera par présenter quelques logiciels, par exemple EMI et MTHarmonizer. Analyse comparative de leurs performances et facilité d'utilisation.

Certains outils récents intègrent des techniques avancées qui offrent des harmonisations plus variées et adaptées à différents contextes musicaux, tout en restant accessibles aux utilisateurs. Ils illustrent bien la manière dont les concepts théoriques étudiés dans les chapitres précédents peuvent se traduire en applications concrètes.

Ces outils trouvent des applications concrètes dans divers domaines, allant de l'enseignement à la composition musicale.

5.2 Applications pratiques

Il s'agit des exemples concrets de mise à disposition des techniques d'harmonisation. Comme les usages pédagogiques pour l'enseignement musical, outils pour compositeurs, et implications industrielles. Je pourrais ici évoquer notamment le logiciel développé par algomus.

Les implémentations montrent que la théorie peut être transformée en outils fonctionnels.

Chapitre 6

Conclusion

La conclusion récapitulera les méthodes explorées, leurs forces et faiblesses. On ouvrira en parlant des tendances actuelles, soit la croissance des méthodes hybrides combinant règles et apprentissage léger et de l'intégration d'algorithmes explicables et interactifs pour améliorer les applications pédagogiques et professionnelles et pourquoi pas ouvrir sur le développement de standards pour évaluer l'harmonisation automatique sur des bases musicales diversifiées.

Chapitre 7

Fiche n°1

7.1 Description de l'article

Titre de l'article : Automatic Melodic Harmonization : An overview, challenges and future directions

Lien de l'article : [articles/Automatic Melodic Harmonization.pdf](#)

Liste des auteurs : Dimos Makris, Ioannis Karydis et Spyros Sioutas

Affiliation des auteurs : Department of Informatics, Ionian University, Greece

Nom de la conférence / revue : Trends in Music Information Seeking, Behavior, and Retrieval for Creativity

Classification de la conférence / revue : Ni une conférence, ni une revue (chapitre d'un livre)

Nombre de citations de l'article (quelle source ?) : 11 (Goggle Scholar), 9 (Semantic scholar), 10 (Igi global)

7.2 Synthèse de l'article

Problématique Il faudrait être capable, à partir d'une ligne mélodique, de générer la suite d'accords correspondante ou tout au moins les suites d'accords les plus probables. Il y a beaucoup de littérature sur le sujet et donc beaucoup de techniques différentes, il faudrait donc être capable de s'orienter dans cette littérature. L'article explore les fondements et évolutions des différentes méthodes pour réaliser cette tâche.

Pistes possibles (pointées par les auteurs) Deux angles d'approche y sont exposés : le premier est celui de créer un accompagnement harmonique pour une mélodie soprano tandis que le deuxième détaille l'approche de compléter les voix manquantes à partir d'une ligne de basse dans le cadre de l'harmonisation à quatre parties.

Question de recherche Quelles sont les techniques de référence, leurs fondements et leurs évolutions pour retrouver une harmonisation en partant d'une ligne mélodique soprano ou d'une ligne de basse ?

Démarche adoptée L'article fait une revue de l'état de l'art de ce domaine et parcourt les différentes approches conceptuelles de celui-ci. Il commence par présenter et placer le thème dans son champ de recherche puis il y présente les différentes approches en soulignant les différences méthodologiques et l'impact des nouvelles représentations de la musique dans ce champ de recherche. C'est un plan chronologique, découpé en "famille" de techniques d'harmonisation. Il y est notamment évoqué des techniques "rule-based" comme l'algorithme EMI, les HMM (couplés avec un ensemble de règles), les grammaires, les méthodes évolutionnaires, le parsing de structures de données (notamment des arbres).

Implémentation de la démarche Chaque méthode d'harmonisation est présentée simplement, parfois avec des schémas, et l'auteur redirige systématiquement vers les articles de référence et les chercheurs à l'origine de ces approches (ce qui fait de cet article un excellent point d'entrée dans le domaine). L'auteur y présente aussi des systèmes interactifs, des logiciels générant cette harmonisation en se basant sur les saisies de l'utilisateur, en décrivant à chaque fois brièvement les techniques utilisées pour les prédictions.

Les résultats La conclusion de cet article est que la recherche d'harmonisation du modèle traditionnel "four-part harmonization" continue d'évoluer (à la date d'écriture de l'article, 2016) avec l'apport par les chercheurs du domaine de nouvelles idées de représentations, de modélisation et de prédictions. Les articles connexes

confirmeront ces résultats et présenteront les approches les plus répandues et / ou les plus contemporaines pour harmoniser une mélodie.

Chapitre 8

Fiche n°2

8.1 Description de l'article

Titre de l'article : Algorithmic Harmonization of Tonal Melodies Using Weighted Pitch Context Vectors

Lien de l'article : [articles/Weighted Pitch Context Vectors.pdf](#)

Liste des auteurs : Peter Van Kranenburg et Eoin J Kearns

Affiliation des auteurs : Utrecht University, Meertens Institute

Nom de la conférence / revue : International Society for Music Information Retrieval Conference - ISMIR - 2023

Classification de la conférence / revue : A1 sur Conference Ranks

Nombre de citations de l'article (quelle source ?) : Article récent et encore non cité

8.2 Synthèse de l'article

Problématique En musique, derrière la mélodie, se cachent des accords s'harmonisant avec celle-ci. Le but est de déduire cet arrière-plan harmonique à partir de

la notation d'une mélodie. L'article se concentre sur l'harmonisation algorithmique des mélodies tonales, en utilisant des vecteurs de contexte de hauteur pondérée pour produire l'arrière-plan harmonique d'une mélodie à partir de sa notation.

Pistes possibles (pointées par les auteurs) L'approche de l'auteur ne nécessite pas d'apprentissage préalable et est basée sur la construction de vecteurs de contexte de hauteur pour chaque note, puis sur l'utilisation de ces vecteurs pour générer des accords candidats et enfin sur le choix du meilleur chemin à travers ces candidats.

Question de recherche Comment déduire l'arrière-plan harmonique d'une mélodie en utilisant des vecteurs de contexte de hauteur pondérée sans processus d'apprentissage préalable à partir de sa notation ?

Démarche adoptée La démarche ici est de calculer toutes les suites d'accords potentielles à partir des vecteurs de contexte de hauteur pour ne garder que celle qui correspond le mieux.

Implémentation de la démarche L'article traite d'abord de la modélisation et de la représentation de la mélodie en utilisant des vecteurs contenant les informations pertinentes et nécessaires. On retrouve la force rythmique, la hauteur et un paramètre dépendant de l'emplacement de la note dans la mélodie. Dans un deuxième temps, on génère les suites d'accords candidates avec des techniques de programmation dynamique à partir de cette représentation. Avec un système de score, on évalue la suite d'accords qui correspond le mieux à la mélodie.

Les résultats Les résultats ont été évalués par des experts du domaine, qui ont noté les résultats de 50 mélodies et qui ont donné une note moyenne de 3.52, soit une harmonisation entre largement convenable et acceptable selon les critères de notation.

Chapitre 9

Fiche n°3

9.1 Description de l'article

Titre de l'article : Melody Harmonization With Interpolated Probabilistic Models

Lien de l'article : [articles/Probabilistic Models.pdf](#)

Liste des auteurs : Stanislaw A. Raczynskia, Satoru Fukayamab et Emmanuel Vincent

Affiliation des auteurs : Gdansk University of Technology - Poland, The University of Tokyo - Japan et INRIA - France

Nom de la conférence / revue : Journal of New Music Research - 2012

Classification de la conférence / revue : H-index 40 sur SJR

Nombre de citations de l'article (quelle source ?) : 37 (Research Gate), 65 (Hal-Inria)

9.2 Synthèse de l'article

Problématique Cet article explore également l'harmonisation mélodique automatique en utilisant des modèles probabilistes interpolés, le but étant de trouver une suite d'accords à partir d'une mélodie donnée tout en tenant compte de la tonalité, de la structure rythmique et du style musical.

Pistes possibles (pointées par les auteurs) Pour prédire cela, les auteurs de l'article proposent une combinaison de plusieurs modèles probabilistes, en se basant sur leurs "entropies croisées" et leurs scores pour les assembler. Ils désignent cela comme une interpolation de modèles.

Question de recherche La question posée est donc : comment les différents modèles probabilistes peuvent-ils être combinés efficacement pour harmoniser une mélodie et quelle est leur efficacité une fois combinés pour prédire les accords à partir d'une mélodie ?

Démarche adoptée Les auteurs ont donc développé ce modèle basé sur l'interpolation de plusieurs sous-modèles s'occupant chacun d'aspects distincts de l'harmonisation (notamment les progressions d'accords, la relation avec la tonalité, la mélodie).

Implémentation de la démarche Ils ont entraîné chaque sous-modèle sur environ 2000 partitions de chansons populaires (les mélodies annotées par les accords) et les ont converties en séquences représentant la tonalité, la mélodie et les accords.

Les résultats Le modèle généré a montré une précision de prédiction accrue par rapport à un harmonisateur basé sur des règles. L'amélioration atteint jusqu'à 5 pourcents et montre l'efficacité de cette approche.

Chapitre 10

Fiche n°4

10.1 Description de l'article

Titre de l'article : Function- and rhythm-aware melody harmonization based on tree-structured parsing and split-merge sampling of chord sequences

Lien de l'article : [article/Tree Structured Parsing.pdf](#)

Liste des auteurs : Hiroaki Tsushima, Eita Nakamura, Katsutoshi Itoyama et Kazuyoshi Yoshii

Affiliation des auteurs : Graduate School of Informatics, Kyoto University, Japan

Nom de la conférence / revue : International Society for Music Information Retrieval Conference - ISMIR - 2017

Classification de la conférence / revue : A1 sur Conference Ranks

Nombre de citations de l'article (quelle source?) : 21 (Semantic Scholar)

10.2 Synthèse de l'article

Problématique Les techniques d'harmonisation basées sur les HMM harmonisent efficacement mais ne décrivent pas explicitement les rythmes, les fonctions harmoniques (les degrés de la gamme) ni la structure hiérarchique des accords, éléments clés dans les théories traditionnelles de l'harmonie.

Pistes possibles (pointées par les auteurs) Il est nécessaire de trouver une modélisation pour prédire l'harmonisation qui capture la structure rythmique, les fonctions harmoniques et la structure des accords.

Question de recherche Comment déduire l'arrière-plan harmonique d'une mélodie en se basant sur une structure d'arbre hiérarchique, utilisant une grammaire non contextuelle, tout en capturant les rythmes des accords ?

Démarche adoptée Les auteurs proposent une structure d'arbre hiérarchisée utilisant une grammaire non contextuelle. L'avantage évoqué est que les règles et la structure de l'arbre peuvent être approchées de manière non supervisée.

Implémentation de la démarche L'algorithme proposé est basé sur une version sophistiquée de "Metropolis-Hastings" pour découper et fusionner la mélodie, ce qui a pour rôle de structurer l'arbre et les symboles d'accords, en effectuant une recherche stochastique et une évaluation à plusieurs niveaux de profondeur de la suite d'accords la plus probable.

Les résultats Les résultats ont été comparés à ceux obtenus par un HMM. On remarque que la précision de l'harmonisation est bien au-delà de celle obtenue par HMM (environ 22 pourcents contre 16.6 pourcents pour le HMM).

Chapitre 11

Fiche n°5

11.1 Description de l'article

Titre de l'article : Automatic Melody Harmonization with Triad Chords : A Comparative Study

Lien de l'article : [article/Triad Chords.pdf](#)

Liste des auteurs : Yin-Cheng Yeh, Wen-Yi Hsiao, Satoru Fukayama, Tetsuro Kitahara, Benjamin Genchel, Hao-Min Liu, Hao-Wen Dong, Yian Chen, Terence Leong, Yi-Hsuan Yang

Affiliation des auteurs : Yeh, Hsiao, Liu, Dong and Yang are with Academia Sinica - Taiwan, Fukayama is with National Institute of Advanced Industrial Science and Technology - Japan, Kitahara is with Nihon University - Japan, Genchel is with Georgia Institute of Technology - USA, Chen and Leong are with KKBOX Inc. - Taiwan

Nom de la conférence / revue : Journal of New Music Research - 2021

Classification de la conférence / revue : H-index 40 sur SJR

Nombre de citations de l'article (quelle source ?) : 44 (arXiv, ResearchGate)

11.2 Synthèse de l'article

Problématique Évaluer et comparer différentes méthodes d'harmonisation mélodique automatique, en se concentrant sur la génération d'une séquence d'accords pour accompagner une mélodie.

Pistes possibles (pointées par les auteurs) Comparer des modèles avec diverses approches, y compris le matching de templates, des modèles HMM, des algorithmes génétiques, et des modèles d'apprentissage profond.

Question de recherche La question est très générale : quelle méthode d'harmonisation mélodique automatique est la plus efficace pour générer des accompagnements harmoniques appropriés pour des mélodies données ?

Démarche adoptée Cinq modèles avec des approches différentes ont été sélectionnés et comparés rigoureusement en les évaluant sur un nouveau dataset.

Implémentation de la démarche Les auteurs utilisent diverses méthodes, comme par exemple des modèles basés sur l'apprentissage profond, d'autres basés sur les algorithmes génétiques, d'autres encore basés sur les HMM, et enfin certains basés sur le template matching.

Les résultats Les modèles d'apprentissage profond se sont révélés plus performants, offrant une meilleure harmonisation que les autres méthodes. Un modèle multitâche (MTHarmonizer) a particulièrement bien performé, générant des progressions d'accords plus diversifiées et intéressantes.

Annexe A

Grille d'analyse

| | Approche | Méthodologie | Question traitée | Entrée | Sortie | Représentation Musique |
|-------------------|---|--|---|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Makris [2016] | Etat de l'art | Revue de l'état de l'art présentant les auteurs, les représentations musicales et les technique de prédictions | Présenter les techniques d'harmonisation "four-part" | - | - | - |
| Kranenburg [2023] | Technique d'harmonisation avec vecteurs de contexte | Programmation dynamique | Prédire l'harmonisation d'une mélodie tonale | Mélodie tonale | Accords harmonisés | Vecteurs de contexte de hauteur |
| Tsushima [2017] | Technique d'harmonisation avec structure d'arbre | Utilisation d'une modélisation hiérarchique et de grammaire non contextuelle, Algorithme "Metropolis Hasting" | Prédire une harmonisation en se basant sur les rythmes, les fonctions harmoniques | Mélodie, informations rythmiques | Séquences d'accords structurées | Arbre avec structure rythmique, fonctions harmoniques |
| Raczyński [2013] | Technique d'harmonisation avec modèles interpolés | Combinaison de modèles probabilistes | Prédire une harmonisation en tenant compte des tonalités, et des rythmes | Mélodie, contexte tonal et rythmique | Séquences d'accords, tonalité ajustée | Séquences représentant tonalité, mélodie |
| Yeh [2021] | Comparaison de méthodes d'harmonisation | Étude comparative des techniques de prédictions des suites d'accords | Comparer les résultats de divers techniques d'harmonisation | - | - | - |

FIGURE A.1 – Analyse comparative des techniques d'harmonisation mélodique.