

# Etude de la relation entre la complexité rythmique et l'effort mental

Corentin Brasseur

Rapport de Stage

Master Informatique – eSanté – 2<sup>e</sup> année

Enseignant: Mme. Laure BRISOUX DEVENDEVILLE

Tuteurs : Mme. Levé Florence

M. Bonnin Geoffray

Janvier 2024 - Août 2024

# Table des matières

<b>I. Introduction.....</b>	<b>3</b>
A. Cadre du stage.....	3
B. Origine du projet.....	3
C. Objectif du projet.....	4
<b>II. Méthodologie.....</b>	<b>4</b>
A. Elaboration Protocole.....	4
1. Préparation des Séquences.....	4
2. Validation.....	5
B. Traitement des données.....	5
C. Analyse des résultats.....	6
<b>III. Organisation.....</b>	<b>7</b>
A. Gestion de projet.....	7
B. Outil et matériel.....	8
1. Langages de programmation.....	8
2. Matériels.....	8
3. Logiciels.....	8
<b>IV. Conclusion.....</b>	<b>9</b>
A. Synthèse et perspectives.....	9
B. Connaissances et compétences.....	9
1. Notions utilisées.....	9
2. Notions développées.....	10
3. Expériences acquises.....	10
C. Problèmes rencontrés.....	11
1. Fichier audio.....	11
2. Validation du protocole.....	11
<b>V. Remerciement.....</b>	<b>11</b>
<b>VI. Référence.....</b>	<b>12</b>
A. Bibliographie.....	12
B. Sitographie.....	12
<b>VII. Annexe.....</b>	<b>13</b>
A. Mesure de complexité.....	13
1. ClockBeat d'Essens.....	13
2. Métrique de Toussaint.....	14
3. Structure de Pressing.....	15
B. Corrélation entre les mesures de complexité.....	16

## I. Introduction

### A. Cadre du stage

Ce stage en alternance est réalisé dans le cadre d'un master informatique option e-santé au sein de l'Université Picardie Jules Verne [a] (UPJV). Il a pour but de préparer les étudiants au monde de l'emploi, permettant d'une part de se familiariser avec le travail, mais également de construire un réseau. Lors de ce stage, je suis supervisé par Florence Levé, Professeure au MIS [b], Geoffray Bonnin, Maître de conférences au LORIA [c]. Ce stage s'est déroulé sur vingt semaines, du 15 janvier au 17 août au Laboratoire MIS (Modélisation, Information & Systèmes).

Le laboratoire fédère des enseignants-chercheurs de l'UPJV en Informatique, Automatique, Robotique et Vision par ordinateur. Les objectifs scientifiques du laboratoire s'inscrivent dans les thématiques des Sciences et techniques de l'information et de la communication (STIC). Les travaux de recherche qui y sont développés trouvent de nombreuses applications : Véhicule, Cybersécurité, Énergie, Robotique, Musique, Patrimoine, Santé...

L'animation scientifique s'effectue au niveau des 4 équipes de recherche intégrées à l'unité. Pour atteindre sa mission scientifique, le MIS s'appuie sur un effectif de 80 personnes dont 40 enseignants-chercheurs, 35 doctorants et 4 personnels administratifs et techniques, mais aussi sur un précieux réseau de partenaires industriels et académiques.

Ce stage a été réalisé dans l'équipe SDMA (Systèmes Distribués, Mots et Applications) qui est articulée sur deux axes principaux : Etudes des modèles algorithmiques et réseaux. Cette équipe effectue un travail de recherche pour diverses applications telles que les réseaux de capteur, les cohortes de robots, ou encore l'analyse musicale.

Ce stage s'inscrit en outre dans les travaux de recherche menés en collaboration entre le laboratoire MIS à Amiens, et le laboratoire LORIA (Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications) en Lorraine. Ce projet est financé par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) Pre-music.

### B. Origine du projet

Les recherches précédentes ont montré que le bracelet Empatica [1][d] peut être employé pour évaluer la concentration des individus dans diverses situations. Par exemple, une étude a révélé que les individus étaient plus concentrés pendant un cours magistral qu'en regardant la télévision. Ces résultats mettent en lumière le potentiel de l'EDA comme indicateur de l'état mental et de la concentration en fonction du contexte. Partant de ces observations, nous avons voulu explorer plus en profondeur l'utilisation de l'EDA pour mesurer l'effort mental, mais cette fois-ci en fonction de la complexité d'une tâche musicale. Nous nous sommes posé la question suivante : Peut-on mesurer la différence d'effort mental en fonction de la complexité d'une séquence rythmique ? Ce projet permettrait d'avancer dans plusieurs objectifs clés :

- a. **Développer un système de mesure plus précis** : En ajoutant une dimension subjective basée sur le ressenti de la personne à la mesure théorique, nous espérons créer un système plus nuancé pour évaluer l'effort mental.

- b. **Améliorer l'accompagnement en formation musicale** : Une meilleure compréhension de l'effort mental en fonction de la complexité rythmique pourrait permettre d'adapter les programmes d'enseignement musical, en offrant un meilleur accompagnement aux élèves suivant leurs niveaux.
- c. **Valider l'EDA comme mesure de l'effort mental** : En confirmant la validité de l'EDA pour mesurer l'effort mental dans le contexte musical, cette recherche pourrait ouvrir la voie à de nouvelles applications de cette technologie, notamment dans les domaines de l'éducation et de la neuropsychologie.

### C. Objectif du projet

L'hypothèse principale est qu'il existe un lien entre l'effort mental, mesuré grâce à des données physiologiques (rythme cardiaque, température et conductance cutanée) récoltées lors de l'exécution de tâches rythmiques simples et la complexité rythmique (musicale). Si cela est vérifié, une hypothèse secondaire est qu'il est possible de sélectionner des mesures quantitatives de la complexité d'une séquence rythmique représentative de cet effort mental lors d'études sur la perception musicale.

L'objectif de l'étude est d'étudier l'effort mental nécessaire au participant pour analyser une séquence rythmique. Cette analyse se fera sur la perception et sur la qualité de reproduction de séquences rythmiques. Les résultats seront corrélés à des mesures quantitatives de complexité rythmique de la littérature et pourront permettre de mieux paramétrer la difficulté rythmique lors du développement de stimuli auditifs pour des études ultérieures.

## II. Méthodologie

### A. Elaboration Protocole

La première étape de mon stage a consisté à rechercher des articles scientifiques sur les concepts clés liés à mon projet. Cette phase est essentielle pour établir une base de connaissances solide et situer notre étude dans le contexte plus large des recherches existantes.

Un axe important de notre recherche porte sur la complexité rythmique. Pour cela, je me suis penché sur des travaux de séquences rythmiques [2], notamment ceux d'Essens, Povel et Rosenfeld, ainsi que sur des travaux de complexité rythmique théorique [3][4], comme ceux de Pressing et Toussaint. Leurs études portent sur la création de séquences rythmiques et l'évaluation de leur complexité en fonction de la précision et de la perception.

En parallèle, une autre dimension de notre étude porte sur l'analyse de l'activité électrodermale (EDA) en tant que mesure physiologique du stress et de l'effort mental. Pour cela, j'ai d'abord étudié la fiabilité du bracelet Empatica E4 pour mesurer l'EDA en réponse à des stimuli émotionnels. Ces articles ont fourni une base théorique et méthodologique pour l'utilisation de l'EDA dans notre recherche.

### 1. Préparation des Séquences

La dimension algorithmique a été cruciale pour la création et la manipulation des séquences rythmiques, l'acquisition et le traitement des données. J'ai utilisé la bibliothèque Music21 en

Python pour générer les séquences rythmiques nécessaires à notre expérience. Ces séquences, issues de la Littérature, ont été évaluées par des professeurs de formation musicale afin d'avoir un nombre pertinent de séquences, tout en ayant un niveau varié. Ces séquences ont ensuite été évaluées en termes de complexité à l'aide de trois algorithmes basés sur des mesures théoriques : ClockBeat [3], basé sur la perception du battement, Pressing [4] construit sur la répétition de pattern, et Toussaint [4], basé sur la structure de la séquence

## 2. Validation

Pour valider le protocole, j'ai mis en place un système pour l'acquisition et le traitement des données expérimentales, incluant la lecture et l'écriture de fichiers CSV, ainsi que l'acquisition des paramètres du signal EDA. J'ai développé des programmes Python et des scripts Bash pour organiser les données collectées et extraire des paramètres spécifiques du signal EDA, tels que les composantes tonique et phasique, qui sont indicatives de l'effort mental et du stress.

Une phase de prototypage a été réalisée afin de prévenir tous les potentiels imprévus qui pourraient survenir lors de la passation de l'expérience. Cela a également permis de m'habituer à mon protocole, de bien prendre le temps de définir les termes, de rendre les consignes le plus compréhensible possible.

De plus, afin d'enregistrer les différents paramètres, un protocole précis de l'expérience a été rédigé. Cela a impliqué la rédaction de documents expliquant chaque étape du processus expérimental, depuis la préparation des séquences rythmiques jusqu'à la collecte des données.

J'ai ensuite élaboré un document pour la validation éthique, détaillant les objectifs de l'expérience, les procédures, et les critères d'inclusion des participants. Des tests pilotes ont été menés pour vérifier la faisabilité du protocole et affiner les détails avant de passer à la phase d'expérimentation avec un plus grand nombre de participants.

Une fois le protocole validé, l'expérience a été réalisée avec des participants qui ont été exposés aux différentes séquences rythmiques, et leurs réponses ont été enregistrées à la fois en termes de battements des séquences et de mesures physiologiques via l'EDA. Après chaque session, les données collectées étaient vérifiées et organisées dans des fichiers CSV pour faciliter leur analyse. Des sauvegardes régulières sur un Git sécurisé étaient effectuées pour éviter toute perte de données.

## B. Traitement des données

Le traitement des données collectées pendant les expériences a constitué une phase essentielle de mon stage. Cette étape impliquait l'acquisition, la modélisation et l'analyse statistique des données afin de répondre aux questions de recherche et de vérifier les hypothèses formulées.

Tout d'abord, les données sur les connaissances musicales du participant. Ces informations sont recueillies grâce à un formulaire que le participant devait remplir avant l'expérience.

Parmi ces informations, il y a les connaissances en solfège, la pratique d'instrument, ou encore le style de musique écouté régulièrement. Ces informations sont ensuite modélisées en tableau csv.

Les variations de l'activité électrodermale des participants ont été enregistrées en continu pendant les expériences à l'aide du bracelet Empatica E4. Les données brutes d'EDA ont été extraites et prétraitées pour éliminer les artefacts et les bruits, notamment dû à la surprise au début de chaque séquence.

Les participants ont également été invités à évaluer leur perception de la complexité des séquences rythmiques sur une échelle de Likert. Cette échelle correspond à un score, entre 1 et 5, sur le niveau de concentration nécessaire afin de réaliser la tâche demandée. Ces évaluations subjectives ont été collectées après chaque séquence.

Les réponses des participants sur l'échelle de Likert ont été quantifiées et analysées pour évaluer leur perception de la complexité et leur ressenti pendant l'expérience. Ces données subjectives ont été comparées à leur signal EDA pour une analyse plus poussée.

Pour comprendre les relations entre les différentes variables mesurées, des analyses de corrélation statistique ont été réalisées.

Des outils statistiques ont été utilisés pour calculer les coefficients de corrélation entre les différentes mesures de complexité musicale, les paramètres EDA, et les évaluations de l'échelle de Likert. Cette analyse a permis d'identifier les relations significatives entre les variables et de mieux comprendre comment la complexité musicale perçue et mesurée impacte l'effort mental et le stress.

### C. Analyse des résultats

Cette phase a impliqué la mise en place de scripts et de processus automatisés pour gérer les différentes étapes de traitement, depuis le lancement des expériences jusqu'à l'analyse des corrélations entre les différents types de données.

Des scripts ont été développés pour automatiser le lancement des sessions expérimentales, ainsi chaque participant aura le même déroulement sans intervention. Ce script appelle les différents programmes nécessaires à l'expérience, le tirage des séquences, le lancement des fichiers audio, l'interface utilisateur, ou encore la récupération des battements.

Les algorithmes pour le calcul de précision ont aussi été automatisés. Ainsi ces algorithmes comparent les séquences reproduites par les participants avec les séquences originales pour évaluer les écarts et les erreurs. Les paramètres de précision incluent le timing des notes, ou encore la fidélité des rythmes

Des scripts ont aussi été développés pour automatiser le calcul des corrélations entre la complexité perçue des séquences rythmiques et les données EDA.

Tous ces scripts synchronisent les horodatages des enregistrements EDA avec les événements de l'expérience musicale, permettant une analyse précise des réactions

physiologiques en réponse à des séquences rythmiques spécifiques. Cela impliquait un alignement temporel des données pour s'assurer que les réponses EDA correspondaient exactement aux moments de présentation et de reproduction des séquences.

### III. Organisation

#### A. Gestion de projet

Une organisation efficace a été essentielle pour le bon déroulement de mon stage. J'ai utilisé plusieurs outils pour gérer le partage du code, la prise de notes, l'écriture des rapports et la gestion des différents fichiers.

Tout d'abord, l'utilisation d'un GitHub afin de partager le code développé durant le stage avec les autres membres de l'équipe de recherche. Cela a d'une part faciliter le suivi, en permettant à chacun de suivre les mises à jour des différents scripts. GitHub permet également un archivage des différentes versions du code, assurant une traçabilité des modifications apportées. De plus, Git a été utilisé comme solution de sauvegarde sécurisée pour le code ainsi que les données, permettant ainsi de se prémunir contre d'éventuel problème technique sur la machine local.

Visual Studio Code (VS Code) a été utilisé comme environnement de développement intégré (IDE) pour écrire les programmes et scripts. VS Code a été choisi puisque cela offre une multitude de fonctionnalités comme l'autocomplétion, la détection d'erreurs en temps réel, et l'intégration avec Git, ce qui a rendu le processus de développement plus efficace. De plus, VS Code permet l'utilisation de nombreuses extensions pour différents langages de programmation et frameworks. Cela a notamment permis de rendre les fichiers csv plus lisibles.

Tout au long du stage, Obsidian, un outil de prise de notes basé sur Markdown, a été utilisé pour rédiger les différentes sections des rapports. Obsidian offre une interface intuitive et une gestion efficace des fichiers, facilitant ainsi la structuration et l'organisation des documents. Cela m'a permis d'organiser efficacement mes fichiers textuels, telles que ma liste de choses à faire, ma prise de notes ou encore les rapports de réunion.

En supplément de toute l'organisation personnelle et pour assurer un suivi rigoureux de l'avancement du projet, des réunions hebdomadaires ont été organisées avec mes encadrants. Ces réunions ont permis de discuter des objectifs, des défis rencontrés, et des étapes à venir, garantissant ainsi une direction claire et un encadrement continu tout au long du stage.

En parallèle, j'ai également participé à des réunions régulières avec l'équipe de recherche Algomus, basée dans le laboratoire Cristal [e], impliquée dans des projets connexes. Ces réunions ont offert l'opportunité de partager des idées, de discuter de la méthodologie et des résultats obtenus, et de collaborer sur des aspects techniques communs, enrichissant ainsi la qualité et la pertinence des travaux menés.

## B. Outil et matériel

Afin de mener à bien mon stage, j'ai utilisé divers outils incluant des langages de programmation, du matériel spécifique ou encore des logiciels.

### 1. Langages de programmation

Python est le langage principal utilisé pour le développement des différents algorithmes nécessaires à l'élaboration de l'expérience, ainsi que l'analyse des données. La présence de bibliothèque telle que music21 permet de générer et manipuler les séquences rythmiques ainsi que Pandas ou Scipy pour la visualisation et l'analyse statistique.

Bash est un langage script permettant d'automatiser des tâches répétitives telles que l'exécution successive de programmes, la gestion de fichiers, ainsi que le lancement de l'expérience.

### 2. Matériels

Lors de l'expérience, il nous fallait un outil pour enregistrer les actions du participant. Ainsi, un pavé tactile a été utilisé pour capturer les battements du participants avec les séquences rythmiques, enregistrant les temps de réponse nécessaires pour reproduire les rythmes.

Nous avons aussi pensé à récupérer les battements sur un clavier ou sur une application de téléphone, mais le pavé tactile nous a semblé le meilleur choix. Il permet une bonne précision, tout en étant intuitif. Durant la phase de prototype, nous nous sommes rendus compte que le clavier faisait du bruit. De plus, la récupération des données est plus simple sur le pavé tactile que sur une application de téléphone.

Le bracelet Empatica E4 est un bracelet permettant d'enregistrer l'activité électrodermale (EDA) des participants en temps réel, fournissant des données sur leur état physiologique pendant l'expérience.

### 3. Logiciels

Pour récupérer les données du bracelet, un logiciel nommé "Empatica Real-Time" a été utilisé pour d'une part, surveiller l'acquisition des données, mais surtout enregistrer les données EDA des participants pendant les expériences, permettant une collecte de données précise et synchronisée. Ce logiciel est développé par les concepteurs du bracelet, ce qui nous assure le bon fonctionnement, ou un contact avec un support qualifié

Afin de gérer les références bibliographiques des articles scientifiques lors de mes documentations, le logiciel Zotero a été utilisé. Ce logiciel permet de stocker, organiser et citer facilement les références dans les documents de recherche. Zotero possède plusieurs outils de traitement de texte qui facilitent l'insertion de citations ou permettent le surlignement des idées principales. Combiner avec Obsidian, cela m'a permis une prise de note efficace et précise.

Lors de l'analyse de données, le logiciel Excel a été utilisé pour manipuler facilement les données. De plus, ce logiciel permet de réaliser des graphiques et des tableaux utiles pour visualiser les résultats et pour les intégrer dans les rapports et les présentations.



## IV. Conclusion

### A. Synthèse et perspectives

Ce rapport présente une exploration de l'effort mental lié à la complexité rythmique musicale, en se basant sur l'activité électrodermale (EDA) mesurée par le bracelet Empatica E4. À travers une méthodologie rigoureuse, incluant l'élaboration d'un protocole expérimental, la création et la validation de séquences rythmiques complexes, et l'acquisition de données physiologiques, nous avons cherché à confirmer l'hypothèse selon laquelle l'effort mental varie en fonction de la complexité des tâches rythmiques.

Les recherches préliminaires ont permis de situer notre étude dans un contexte théorique solide, reliant la perception rythmique à des mesures quantitatives de complexité, et validant l'EDA comme un indicateur pertinent de l'effort mental. La création des séquences rythmiques, leur évaluation par des experts, et l'utilisation d'algorithmes spécifiques ont permis de garantir la pertinence des stimuli utilisés dans l'expérience.

La phase d'acquisition des données, soutenue par une automatisation poussée des procédures expérimentales et des analyses statistiques, a permis de collecter des données riches et variées, non seulement sur les réponses physiologiques des participants, mais aussi sur leur perception subjective de la complexité des tâches. L'analyse de ces données, combinée à l'évaluation des corrélations entre les différents paramètres mesurés, devrait permettre d'affiner notre compréhension de la relation entre la complexité rythmique et l'effort mental.

En termes de perspectives, ce projet ouvre la voie à plusieurs développements futurs. Premièrement, l'amélioration des programmes de formation musicale pourrait bénéficier de nos résultats, en adaptant les exercices rythmiques à la capacité mentale des élèves. Deuxièmement, la validation de l'EDA comme mesure de l'effort mental dans le contexte musical suggère de potentielles applications dans des domaines tels que la neuropsychologie et l'éducation, où des technologies similaires pourraient être employées pour évaluer et accompagner les processus d'apprentissage.

Enfin, ce travail constitue une base pour des études futures qui pourraient explorer plus en profondeur les liens entre l'effort mental, la complexité rythmique, et d'autres facteurs cognitifs ou émotionnels, élargissant ainsi le champ des applications de l'EDA dans la recherche scientifique.

### B. Connaissances et compétences

#### 1. Notions utilisées

Les cours de programmation suivis pendant mes études ont été cruciaux pour le développement des scripts en Python et en Bash. J'ai pu appliquer mes compétences en algorithmie pour automatiser des tâches, analyser des données et développer des programmes spécifiques au projet.

Les principes de gestion de projet appris durant mes études m'ont aidé à structurer mon travail, à planifier les différentes étapes du projet et à respecter les délais impartis.

Les méthodes statistiques apprises durant mes études ont été essentielles pour analyser les données collectées. J'ai utilisé des tests statistiques pour vérifier les hypothèses, analyser les corrélations et interpréter les résultats.

## 2. Notions développées

Ce stage m'a permis de consolider mes connaissances dans le domaine de la santé, en particulier l'EDA. J'ai appris d'une part à utiliser un équipement biomédical comme le bracelet Empatica E4, à collecter des données physiologique, mais aussi à comprendre et à interpréter les composantes phasiques et toniques d'un signal EDA, et à utiliser ces données pour évaluer le niveau de concentration des participants. La manipulation de données de santé m'a également forcé à me familiariser avec le côté éthique, que ce soit la création d'un protocole pertinent, mais aussi dans le fonctionnement de la validation du protocole par un comité.

J'ai également appris à créer et à manipuler des fichiers audio en utilisant des bibliothèques Python comme music21. Cette compétence m'a permis de générer des séquences rythmiques précises pour les expériences et de les analyser en détail.

J'ai renforcé mes compétences pour assurer la lisibilité des fichiers de sortie, en utilisant des formats de données standards comme CSV et en structurant les données de manière claire et organisée. J'ai mis en place des scripts pour générer automatiquement des rapports de résultats, incluant des visualisations et des analyses, facilitant ainsi la communication des résultats de recherche.

Le stage m'a confirmé l'importance d'une documentation rigoureuse, tant pour les protocoles expérimentaux que pour le code développé. J'ai documenté chaque étape du projet de manière détaillée, permettant une reproductibilité et une compréhension claire du travail effectué.

J'ai amélioré mes compétences en présentation en préparant un posters scientifiques, des rapports détaillés, et des présentations orales. J'ai appris à communiquer efficacement les informations à des audiences variées, incluant des chercheurs mais aussi des novices.

Le stage m'a permis d'améliorer mes compétences en anglais, en particulier dans le contexte scientifique. J'ai lu de nombreux articles et rapport en anglais. Ainsi que de participer à des réunions et conférences en anglais.

## 3. Expériences acquises

En plus des diverses connaissances et compétences, mon stage m'a offert une expérience enrichissante et m'a permis de faire des rencontres professionnelles importantes.

J'ai eu la chance de travailler avec des chercheurs expérimentés et bienveillants, qui ont été très disponibles pour m'accompagner et m'orienter tout au long de mon stage. Leur soutien et leur suivi ont été essentiels pour mon développement professionnel et personnel.

Les interactions avec les membres de l'équipe de recherche et les autres stagiaires m'ont permis de développer des contacts dans un réseau professionnel, ce qui sera précieux pour ma future carrière académique et professionnelle.

De plus, ce stage m'a confirmé l'intérêt que je porte pour la recherche scientifique. J'ai particulièrement apprécié le processus de création et la passation de l'expérience, ainsi que la satisfaction de contribuer à l'avancement des connaissances. Les compétences et les connaissances acquises durant ce stage m'ont préparé de manière pertinente pour poursuivre en doctorat, ayant une meilleure compréhension des attentes et des exigences d'un projet de recherche à long terme.

### C. Problèmes rencontrés

L'avancement dans ce projet était plutôt fluide, seuls deux problèmes peuvent être notifiés. La synchronisation des fichiers audio, et l'attente de la validation du protocole par le comité éthique.

#### 1. Fichier audio

Le premier problème est dû à la sortie audio. En effet, celle-ci fonctionne différemment suivant le système d'exploitation. Sur Windows, pour récupérer le son dans un programme Python tout en le jouant sur une enceinte, il était nécessaire de passer par un logiciel tiers (VB-Cable) pour créer ce câble virtuel. Ce logiciel permet de rediriger l'audio de sortie de mon programme Python vers une enceinte tout en permettant l'acquisition du même signal audio dans une autre application.

Cependant, sur linux, il fallait faire des manipulations spécifiques pour configurer correctement les pilotes audio afin de permettre l'acquisition et la lecture simultanée du son. J'ai dû configurer ALSA (Advanced Linux Sound Architecture) et PulseAudio, les deux principaux systèmes de gestion audio sous Linux. En modifiant les fichiers de configuration et en utilisant des outils de routage audio (pavucontrol), j'ai pu rediriger le son de manière appropriée. Ces ajustements ont permis de résoudre les problèmes de compatibilité et de garantir que le son soit capturé et joué correctement.

#### 2. Validation du protocole

Le deuxième problème majeur de ce projet était la validation du protocole expérimental. Cette validation a pris beaucoup de temps. Cette étape est cruciale pour s'assurer que l'expérience respecte les normes éthiques et méthodologiques. Il était impossible de commencer les expériences, et donc l'enregistrement de données, sans ce retour.

La manipulation de données physiologiques renforce l'importance de cette validation.

### V. Remerciement

Je souhaiterais remercier, Florence Levé, ma tutrice, professeure à l'université Picardie Jules Verne, laboratoire MIS, qui m'a offert la chance de réaliser ce stage, m'a accompagnée et conseillée tout au long de ce projet.

M. Geoffray Bonnin, maître de conférence au LORIA, qui a co-supervisé la recherche, en étant présent toujours dans la bonne humeur et la bienveillance.

Ainsi qu'à toute l'équipe Algomus, pour leur inclusion et leur bienveillance.

De plus, je souhaiterais également remercier, Mme. Sahar Moghimi, ainsi que l'équipe GRAMFC [f], présente au CURS, de m'avoir autorisé l'accès à une salle pour la passation de l'expérience.

Sans oublier Laure Brisoux Devendeville, ma tutrice universitaire, pour sa préoccupation et son implication tout au long du stage.

## VI. Référence

### A. Bibliographie

[1] Sequence rythmique : Rhythm Complexity Measures. A Comparison of Mathematical Models of Human Perception and Performance, Eric Thul, Godfried T. Toussaint, ISMIR 2008

[2] ClockBeat : Music Perception: An Interdisciplinary Journal, Summer, 1985, Vol. 2, No. 4 (Summer, 1985), pp. 411-440

[3] Mesure de Complexité : Measuring the Complexity of Musical Rhythm, Eric Thul, 2008

[4] Activité Electrodermal : Toward Mental Effort Measurement Using Electrodermal Activity Features, William Romine, Noah Schroeder, Tanvi Banerjee and Josephine Graft, 2022

### B. Sitographie

[a] UPJV : <https://www.u-picardie.fr/>

[b] MIS : <https://mis.u-picardie.fr/>

[c] Loria : <https://www.loria.fr/fr/>

[d] Empatica : <https://e4.empatica.com/connect/dashboard.php>

[e] Cristal : <https://element.cristal.fr>

[f] Gramfc : <https://gramfc.u-picardie.fr/>

## VII. Annexe

### A. Mesure de complexité

#### 1. ClockBeat d'Essens

**Table 1**  
**Potential Time Scales (Clocks a–i) for Sequence 1221123**  
**With Calculated Counterevidence**

Clock	Sequence	Clock Size	Counterevidence		
	> > > > >     .   .       .   . . !		0ev	–ev	C*
a	i . i . i . i . i . i .	2	2	4	18
b	. i . i . i . i . i . i	2		1	4
c	i . . i . . i . . i . .	3	2		2
d	. i . . i . . i . . i .	3		2	8
e	. . i . . i . . i . . i	3		3	12
f	i . . . i . . . i . . .	4	1	2	9
g	. i . . . i . . . i . .	4			0
h	. . i . . . i . . . i .	4	1	2	9
etc.					

Note—| = tone onset that marks interval; smallest interval is 200 msec; dots indicate relative time; > marks tone perceived as accented; ! = first tone next cycle; i = beat. \*C-score = 0ev + (4 \* –ev).

Figure 1 : Fonctionnement du Clock Beat d'Essens et Povel

Cette mesure se focalise sur la perception du battement comme un temps fort ou un temps faible. S'il un temps fort est décalé par rapport à une pulsation, alors on incrémente le score. La score le plus bas correspond à la meilleure horloge interne, et donc, la meilleure pulsation.

## 2. Métrique de Toussaint

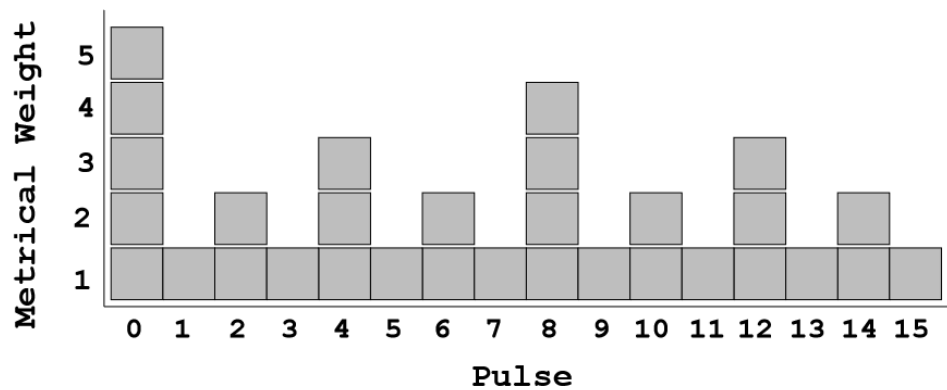


Figure 2 : Fonctionnement de la métrique issue du travail de Toussaint

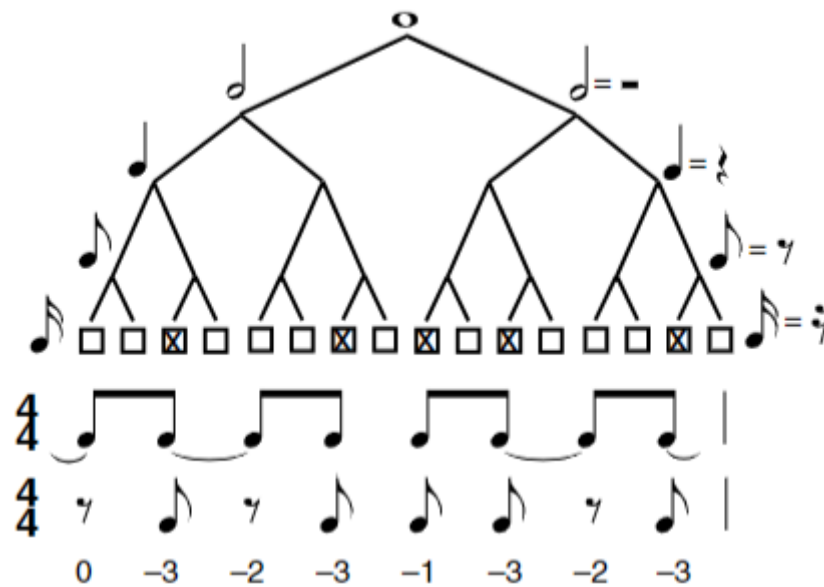


Figure 3 : Autre représentation de la métrique de Toussaint

Toussaint propose une métrique basée sur la forme d'un arbre. Une note jouée donnera plus ou moins de point suivant quelle feuille elle représente. Un haut score sera composé de notes situées sur les temps forts. Cependant, le nombre de notes est un facteur à prendre en compte lors de l'utilisation de cette méthode.

### 3. Structure de Pressing

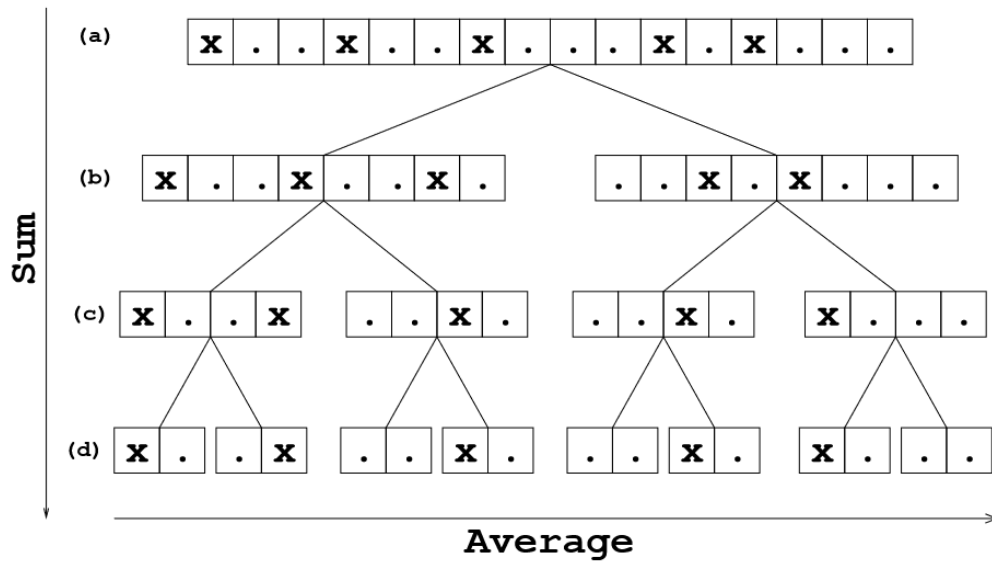


Figure 4 : Structure de complexité et division en pattern de Pressing



Figure 6 : Pattern de décomposition de la structure

Pressing propose une métrique basée sur la subdivision de la séquence en sous séquence, puis en attribuant un score suivant le pattern présent. Une séquence sera considérée complexe si elle est composée de pattern complexes. Par exemple, la figure a) étant plus facile que la figure c), celle-ci donnera moins de point au score final.