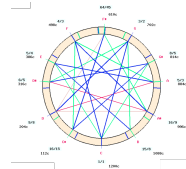




ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

PROJET D'OPTION PROFESSIONNELLE

JustIT : Just-Intonation Transform for music signal processing



Mohamed MAADILI

Encadrant : Vincent
LOSTANLEN

le 25 Mars 2024

Resumé :

Ce projet explore l'utilisation de la Just-Intonation Transform dans le traitement du signal musical, en se concentrant sur la musique indienne classique. Nous examinons comment cette approche préserve les relations harmoniques exactes entre les notes, comparativement au tempérament égal. Ce travail offre des perspectives sur l'enrichissement des pratiques musicales traditionnelles et contemporaines.

Abstract :

This project explores the use of the Just-Intonation Transform in music signal processing, focusing on classical Indian music. We examine how this approach preserves exact harmonic relationships between notes compared to equal temperament. This work provides insights into enriching both traditional and contemporary musical practices.

Table des matières

1	Approche sociologique : Diversité dans le domaine de la MIR	6
2	Librosa : Un outil efficace pour le traitement des sons musicaux	6
3	Transformée à Q	7
4	Etude comparative du tempérament égal et juste	9
5	La musique Hindustani et Carantic : Un petit voyage au pays des merveilles	16

Table des figures

1	Tempérament égal.	5
2	Librairie Librosa pour le traitement des données.	7
3	Exemple de transformée de Q appliquée sur une mélodie.	8
4	La transformée de Q du signal audio à bases de fréquences à tempérament égal.	9
5	La transformée de Q du signal audio à bases de fréquences à tempérament juste.	9
6	Représentation cyclique des phases pour un tempérament égal.	10
7	Histogramme des phases JI et equal.	10
8	Visualisation des phases pour le tempérament égal.	11
9	Visualisation des phases pour le tempérament juste.	11
10	Superposition des phases de la magnitude.	12
11	Visualisation de la magnitude pour le tempérament égal.	13
12	Visualisation de la magnitude pour le tempérament juste.	13
13	L entropie spectrale des amplitudes ji et eq en fonction du temps. . .	14
14	L entropie spectrale des phases phi ji et phi eq en fonction du temps. .	15
15	La planéité spectrale des phases phi ji et phi eq en fonction du temps. .	15
16	Dhanasri : Figuration de la musique en Inde.	16
17	Dance Kathak au nord de l'Inde.	17
18	Dance Bharatnatyam au sud de l'Inde.	17
19	Carte de l'inde.	19

Introduction :

La musique, dans ses multiples formes et traditions, est un langage universel qui transcende les barrières culturelles et linguistiques. Au cœur de cette diversité musicale se trouvent des systèmes de notation et de composition qui varient selon les cultures et les époques. Parmi ces systèmes, la musique indienne classique, notamment les traditions hindoustanie et carnatique, se distingue par sa richesse théorique et sa profondeur historique.

Cependant, même au sein de ces traditions musicales millénaires, la question de l'accordement des notes reste cruciale. Le système de tempérament égal, largement utilisé dans la musique occidentale contemporaine, divise l'octave en douze intervalles égaux. Cette division permet une certaine facilité de modulation entre différentes tonalités mais comporte des compromis en termes de pureté harmonique.

En revanche, la musique indienne classique, tout comme d'autres traditions musicales non occidentales, repose souvent sur des systèmes d'accordement basés sur des intervalles justes. C'est dans ce contexte que se situe notre projet, qui vise à explorer les implications de la Just-Intonation Transform dans le traitement du signal musical.

La Just-Intonation Transform est une approche de traitement du signal qui cherche à préserver les relations harmoniques exactes entre les notes, en utilisant des intervalles fondamentaux basés sur des ratios simples, tels que 2:1 pour l'octave, 3:2 pour la quinte, et ainsi de suite. En intégrant cette transformée dans le domaine de la musique indienne classique, nous cherchons à mieux comprendre comment les caractéristiques uniques de cette musique peuvent être préservées et enrichies dans le domaine numérique.

Dans ce projet, nous examinerons les concepts théoriques sous-jacents à la Just-Intonation Transform, ainsi que ses applications potentielles dans le domaine de la musique indienne classique. Nous comparerons également les résultats obtenus avec ceux du tempérament égal, en mettant en lumière les avantages et les limites de chaque approche.

En outre, nous explorerons les implications culturelles et esthétiques de ces différentes approches d'accordement musical, en examinant comment elles influencent la perception et l'interprétation de la musique, notamment dans les contextes hindoustani et carnatique. Enfin, nous discuterons des possibilités d'adaptation et d'intégration de la Just-Intonation

Transform dans les pratiques contemporaines de composition et de performance, tant dans le cadre de la musique indienne classique que dans d'autres traditions musicales.

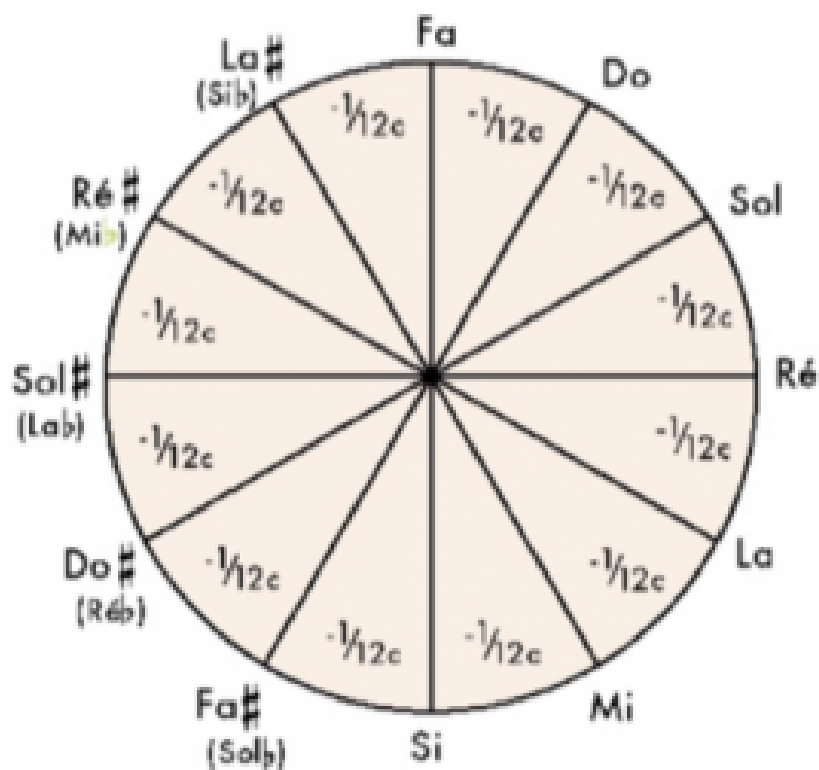


Figure 1: Tempérament égal.

1 Approche sociologique : Diversité dans le domaine de la MIR

Avant d’entamer le sujet d’un point de vue technique et mathématique, on doit tout d’abord discuter la diversité dans le domaine de la recherche en musique et informatique (MIR) et de son importance pour enrichir les expériences culturelles et musicales des praticiens. Pour ce but, on discutera l’article *Diversifying MIR: Knowledge and Real-World Challenges, and New Interdisciplinary Futures* de Georgina Bor.

Il souligne quatre composantes clés de la diversité dans la MIR et l’importance de l’interdisciplinarité pour progresser. L’auteur met en garde contre la répétition d’erreurs conceptuelles et méthodologiques du passé et encourage une approche d’innovation responsable qui intègre la réflexivité, l’inclusion et la réactivité dans la conception technologique.

Il appelle à des initiatives interdisciplinaires durables pour développer de nouvelles formes de connaissances hybrides et améliorer la compréhension de la MIR en dialogue avec d’autres disciplines telles que l’ethnomusicologie et la sociologie. Enfin, il propose la création d’un groupe de réflexion pour promouvoir ces idées et faire progresser le domaine de l’informatique musicale de manière éthique et responsable.

2 Librosa : Un outil efficace pour le traitement des sons musicaux

Dans la partie programmation du projet, j’ai utilisé la librairie Librosa de python. C’est un outil fort pour l’analyse et la manipulation de signaux audio. Elle offre une gamme de fonctionnalités pour travailler avec des données audio, notamment pour les transformées telles que la DFT, la STFT ou la DQT, ou bien pour la construction des spectrogrammes et par la suite le traitement et le filtrage des signaux audios sous différents formats.



Figure 2: Librairie Librosa pour le traitement des données.

3 Transformée à Q

Dans la transformation de Fourier discrète (DFT), la résolution temporelle et fréquentielle (par résolution, nous entendons la capacité offerte par la représentation à distinguer deux composantes temporelles ou fréquentielles adjacentes) reste constante dans le temps et la fréquence. Cette limitation a conduit au développement de l'analyse par ondelettes, qui permet une résolution spectrale plus fine aux basses fréquences et une résolution temporelle plus fine aux hautes fréquences.

La Transformée de Fourier à Q Constant (CQT) a été proposée comme une forme d'analyse par ondelettes adaptée aux signaux musicaux, c'est-à-dire qui permet de distinguer les différentes hauteurs possibles de la gamme musicale.

Comme pour la représentation par ondelettes, cela est réalisé en utilisant des fenêtres d'analyse $h(m)$ dont les durées sont inversement proportionnelles aux différentes fréquences de hauteur musicale. La CQT suit une échelle de fréquence logarithmique (comme les hauteurs musicales).

On dit donc qu'elle est invariante par décalage en hauteur, c'est-à-dire que la transposition d'une note (changement de hauteur) entraîne simplement un décalage de son motif harmonique (la séquence de ses harmoniques) le long de l'axe des fréquences logarithmiques.

Le CQT (Transformée Constant-Q) est utilisée dans des perspectives à la fois musicales et perceptuelles.

Dans la musique occidentale, les fréquences fondamentales F_0 en utilisant le tempérament égal à 12 tons comme exemple :

$$F_k = F_0 * 2^{k/12} \text{ tel que } k \in [-50, 40] \text{ entier } [1].$$

La transformée en CQT(k,n) est définie à partir de ses coefficients tels que $X^{CQ}(k,n)$ définies sur chaque point du signal discret $x[n]$ selon la relation suivante :

$$\sum_{n=0}^{N-1} x(n) a^*(n) = \sum_{j=0}^{N-1} X(j) A^*(j) \quad [2].$$

Où on a $X(j)$ est la transformée de Fourier directe de $x(n)$ et $A(j)$ est la transformée de Fourier directe de $a(n)$ (la partie réelle de la transformée de la base).

La CQT s'exprimera alors sous la forme suivante :

$$X^{CQ}(k, N/2) = \sum_{j=0}^{N-1} X(j) A_k^*(j) \quad [3].$$

telle que : $A_k^*(j)$ (noyau spectral) est une valeur complexe mesurant la DFT de la base $a(n)$ (noyau temporel) centrée sur le point $N/2$.

Or sachant qu'en effectuant la transformée de Fourier sur le signal $a(n)$, on obtient une matrice parcimonieuse avec des valeurs presque nulles partout. Cela permet le passage à l'écriture suivante :

$$X^{CQ} = A^* X \quad [4] \text{ où on a :}$$

A^* est la matrice conjuguée transpose de A .

Les deux matrices X et X^{CQ} sont définies comme des matrices colonnes contenant les composants de la DFT et les valeurs de la CQT correspondantes.

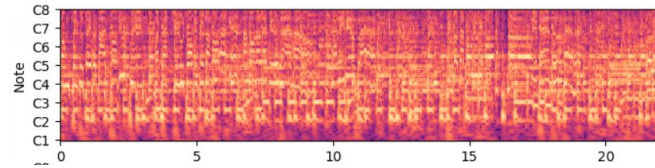


Figure 3: Exemple de transformée de Q appliquée sur une mélodie.

Nous définissons de même une notion très intéressante dans le domaine de la MIR et qui est la redondance, il réfère à la répétition ou à la duplication d'éléments qui ne sont pas strictement nécessaires pour transmettre un message ou une donnée. une certaine redondance est souhaitable car elle peut améliorer la fiabilité et la robustesse des systèmes. Cependant, trop de redondance peut également être inefficace car elle peut gaspiller des ressources telles que la bande passante, l'espace de stockage ou le temps de traitement.

La redondance a la formule suivante :

$$R = 2C_{CQT}/C_{IN} \quad [5]$$

Où C_{CQT} et C_{IN} sont respectivement la moyenne de la CQT et la moyenne

du signal d'entrée.

4 Etude comparative du tempérament égal et juste

Nous élaborons un code qui effectue plusieurs opérations pour simuler la formation d'un son et calculer les transformées de Fourier à court terme (CQT) pour les systèmes d'accordage de tempérament juste (JI) et égal (EQ).

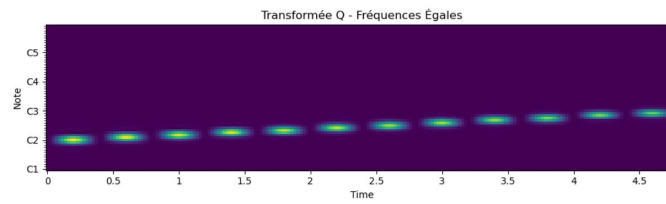


Figure 4: La transformée de Q du signal audio à bases de fréquences à tempérament égal.

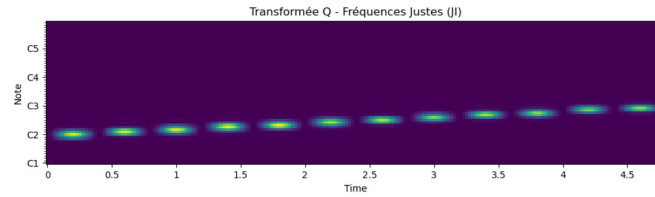


Figure 5: La transformée de Q du signal audio à bases de fréquences à tempérament juste.

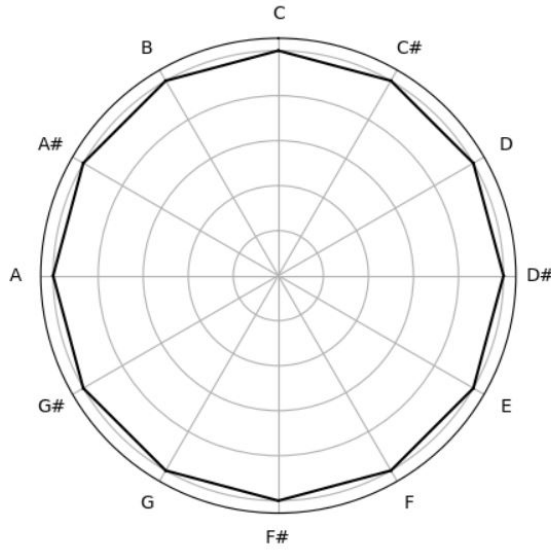


Figure 6: Représentation cyclique des phases pour un tempérament égal.

On trace de meme l'histogramme des phases à tempérament juste et égal :

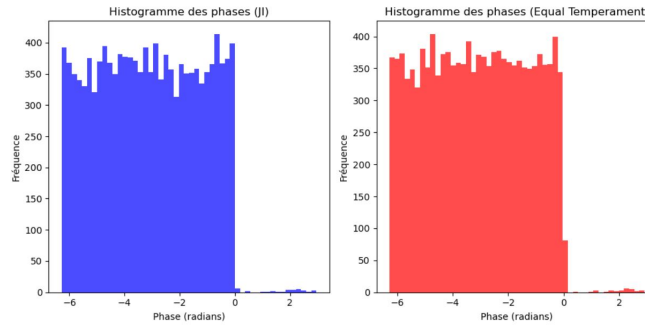


Figure 7: Histogramme des phases JI et equal.

On remarque que la distribution des phases pour le tempérament juste et aussi égal est souvent uniforme, ce qui signifie que les phases des différentes composantes fréquentielles du signal audio sont réparties de manière aléatoire sur tout le cercle des phases.

Nous visualisons les fréquences correspondantes sur une partie du signal indexées entre 12 et 24, la réduction des fréquences va nous permettre de

réduire l'espace mémoire utilisé et accélérer de meme le traitement des données.

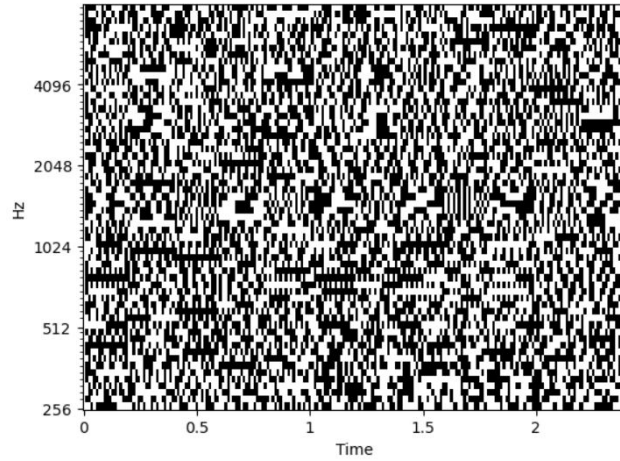


Figure 8: Visualisation des phases pour le tempérament égal.

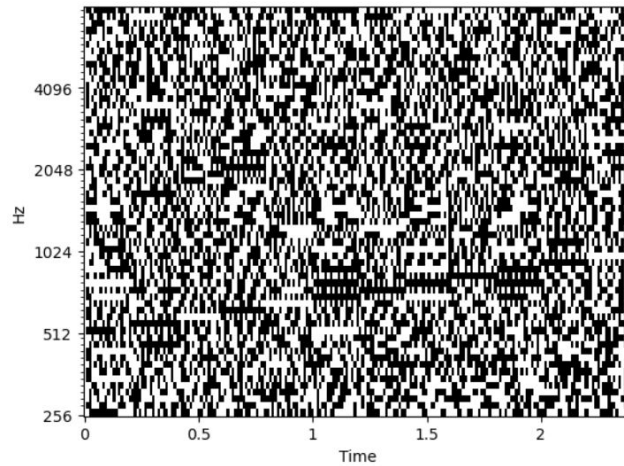


Figure 9: Visualisation des phases pour le tempérament juste.

On peut concaténer les deux figures précédentes sur une meme figure, celà nous permettra de localiser les valeurs des phases de chacun des tempéraments par rapport à l'autre.

Il faut prendre en compte dans ce qui suit que pour le JustIT, les fréquences sont basées sur des rapports simples, souvent dérivés de relations mathématiques simples telles que les fractions. Cela peut conduire à des harmoniques qui ont des relations numériques simples, ce qui peut influencer le caractère tonal du son. Intervalles Égaux : Les fréquences sont réparties de manière égale sur l'échelle musicale. Cela donne une répartition uniforme des fréquences, indépendamment des relations mathématiques simples, ce qui est caractéristique de la gamme tempérée.

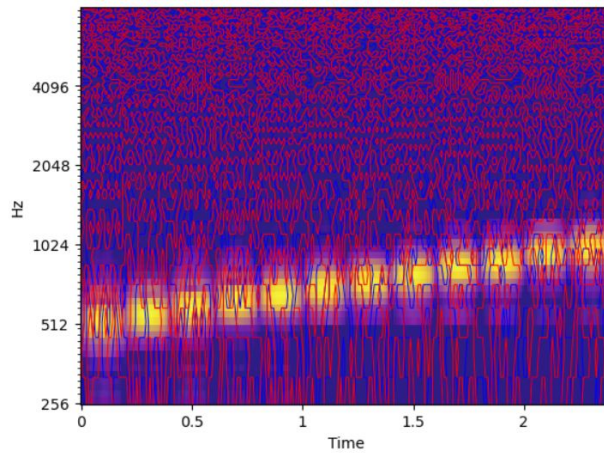


Figure 10: Superposition des phases de la magnitude.

On peut de meme afficher un "rainbowgram" représentant les phases de la transformée en quadrature (VQT) associée au tempérament juste (JI).

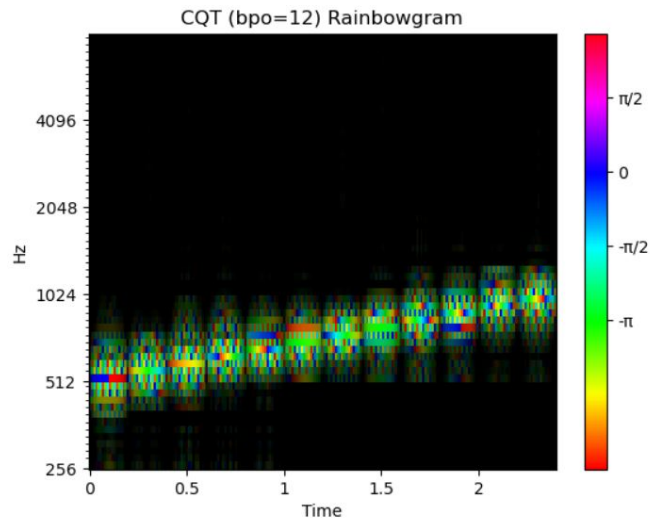


Figure 11: Visualisation de la magnitude pour le tempérament égal.

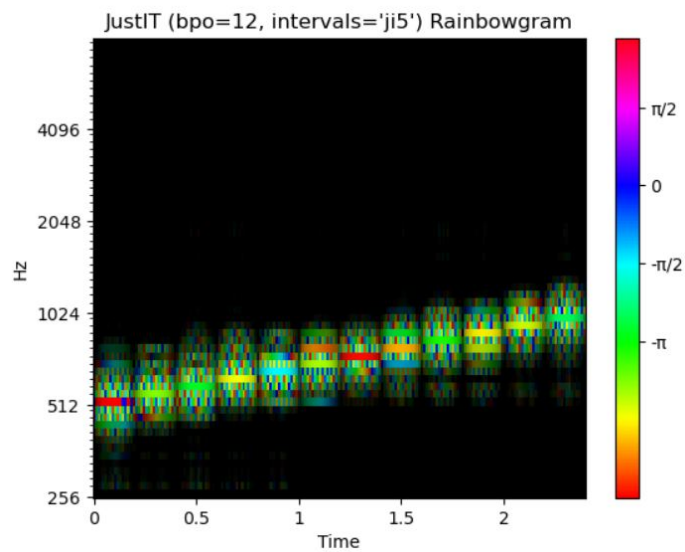


Figure 12: Visualisation de la magnitude pour le tempérament juste.

Le résultat du code différera entre le tempérament égal et le tempérament juste principalement en raison des différences dans les fréquences des com-

posantes du signal et de leurs relations harmoniques.

Dans le tempérament égal, toutes les notes de l'octave sont divisées de manière égale. Cela signifie que les fréquences des composantes du signal seront régulièrement espacées les unes des autres, et les relations harmoniques entre les différentes composantes ne seront pas parfaitement alignées avec les ratios de fréquence purs des intervalles justes.

En revanche, dans le tempérament juste, les fréquences des composantes du signal seront ajustées pour correspondre aux ratios de fréquence les plus simples et les plus harmonieux. Par conséquent, les relations harmoniques entre les différentes composantes du signal seront alignées de manière plus précise avec les ratios de fréquence purs des intervalles justes. En termes de résultat visuel du "rainbowgram", cela se traduira par des schémas de couleurs différents pour les deux tempéraments. Dans le cas du tempérament juste, on peut s'attendre à ce que les harmoniques et les relations entre les différentes composantes du signal se manifestent de manière plus cohérente et régulière dans le "rainbowgram" par rapport au tempérament égal, où les harmoniques peuvent apparaître de manière plus dispersée et moins alignée avec les intervalles justes.

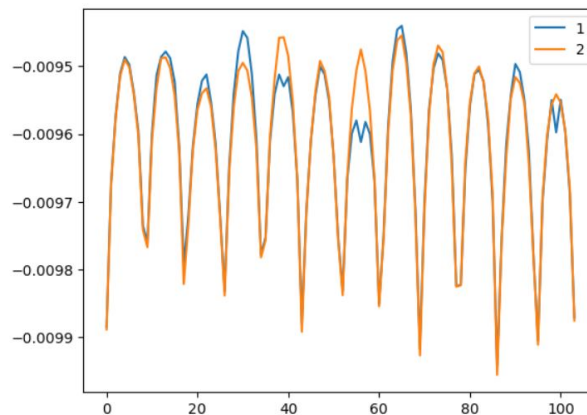


Figure 13: L'entropie spectrale des amplitudes j_i et e_q en fonction du temps.

On remarque qu'en se basant sur le calcul des entropies spectrales ou bien d'autres facteurs caractéristiques du tempérament à partir de l'amplitude de la CQT, les résultats sont presque confondus. Par conséquent, notre étude doit être basée sur les phases et non pas sur les amplitudes.

le cas du tempérament égal, les harmoniques peuvent avoir des relations de phase plus complexes en raison de l'égalisation des intervalles entre les harmoniques. Cela peut entraîner des variations dans les valeurs de l'entropie et de la planéité spectrale au fil du temps, car les relations de phase entre les harmoniques changent.

Passant maintenant à une notion aussi intéressante et qui la redondance, qui fait référence à la proportion d'informations répétitives ou excédentaires présentes dans ce signal par rapport à l'information réellement utile ou pertinente.

Nous trouvons que le signal reconstitue en tempérament égal a une redondance de 13 pourcent alors que pour le tempérament juste, on obtient un pourcentage de 12 pourcent. Une différence de l'ordre de 0.01 est considéré si importante en faisant la comparaison entre deux redondances. Cela peut être expliqué par le fait que la source de redondance dans le tempérament égal réside dans la division uniforme de l'octave en intervalles égaux, tandis que le tempérament juste minimise la redondance en ajustant les intervalles pour correspondre aux rapports de fréquence les plus harmonieux.

5 La musique Hindustani et Carantique : Un petit voyage au pays des merveilles



Figure 16: Dhanasri : Figuration de la musique en Inde.

La musique hindoustanie et la musique carnatique sont deux traditions musicales classiques de l'Inde avec des origines et des caractéristiques dis-

tinctes.

La musique Hindustani est originaire du nord de l'Inde. Cette musique est principalement basée sur les ragas (modes mélodiques) et les talas (rythmes).

Chaque raga est composé d'un ensemble spécifique de notes appelées swaras. Ces notes sont souvent représentées par des syllabes comme Sa, Re, Ga, Ma, Pa, Dha et Ni dans le système de solfège indien. Un raga a une structure mélodique caractéristique qui comprend une série ascendante (arohan) et une série descendante (avarohan) de notes. Certaines notes peuvent être accentuées, tandis que d'autres peuvent être évitées ou utilisées de manière subtile. Par contre, en musique carnatique, les ragas sont également des structures mélodiques fondamentales, mais elles ont leurs propres caractéristiques distinctes par rapport à la musique hindoustanie. Chaque raga carnatique a une structure mélodique unique, avec des séquences ascendantes (aarohanam) et descendantes (avarohanam) de notes. Cette structure est souvent plus rigide et moins flexible que celle des ragas hindoustans.



Figure 17: Dance Kathak au nord de l'Inde.



Figure 18: Dance Bharatnatyam au sud de l'Inde.

D'un point de vue historique, le nord de l'Inde a été le plus influencé par les cultures voisines, y compris la culture arabe et perse surtout pendant la domination moghole de la région. Le rythme musical et les sujets des morceaux ainsi que la langue utilisée (Urdu qui est un mélange entre le hindi, arabe, perse et sanskrit) ont été différents que celles utilisées dans le sud, étant plus conservatif et renfermé. Les deux types musicaux ont été loin de l'influence de la musique occidentale. Il faut attendre jusqu'au 19^{ème} siècle, après l'occupation de l'Inde par l'Angleterre. Certes l'intégration des instruments occidentaux est moins répandue que dans la musique populaire ou cinématographique, mais elle existe néanmoins.

Certains artistes classiques indiens ont intégré des instruments occidentaux dans leurs performances et compositions en explorant de nouvelles sonorités et textures. Par exemple, des musiciens de renom comme Ravi Shankar ont expérimenté avec des collaborations interculturelles impliquant des instruments occidentaux tels que la guitare ou le violoncelle.

Les systèmes d'accordage et les échelles utilisés dans la musique occidentale diffèrent souvent de ceux de la musique indienne classique. Par exemple, la musique indienne utilise généralement des ragas basés sur des échelles mélodiques spécifiques, tandis que la musique occidentale utilise le tempérament égal, qui divise l'octave en douze intervalles égaux. L'intégration d'instruments occidentaux peut donc nécessiter des ajustements dans la manière dont les intervalles sont interprétés, ce qui peut affecter le tempérament musical perçu par l'auditeur.

En effet, la région nordique du pays a été plus influencée que le sud, Les régions du sud de l'Inde, telles que le Karnataka, le Tamil Nadu, l'Andhra Pradesh et le Kerala, ont également une riche tradition musicale, mais elles ont souvent été moins exposées aux influences étrangères en comparaison avec le nord de l'Inde. Cependant, cela ne signifie pas qu'il n'y a pas eu d'intégration d'instruments occidentaux dans la musique du sud de l'Inde. Des musiciens et compositeurs du sud de l'Inde ont également exploré des collaborations interculturelles et des expérimentations musicales qui incluent parfois des instruments occidentaux.

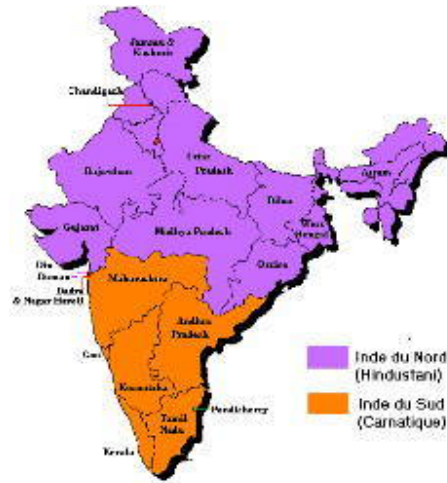


Figure 19: Carte de l'inde.

Il convient de noter que les musiciens indiens ont également adapté leur musique à certains instruments occidentaux, tels que le piano, qui sont accordés selon le tempérament égal. Dans de tels cas, des compromis sont souvent nécessaires pour rendre la musique indienne compatible avec ces instruments. Cela peut impliquer des ajustements dans la manière dont les intervalles sont interprétés ou des techniques spéciales pour créer des effets microtonaux, pour ce faire, nous allons créer un morceau de musique de type hindustani et d'intervalle suivant:

$interval1 = [1.0, 9/8, 5/4, 4/3, 3/2, 5/3, 15/8]$ [6].

On construit de meme un morceau de type carantic selon l'intervalle suivant :

$interval2 = [1.0, 16/15, 9/8, 6/5, 5/4, 4/3, 45/32]$ [7].

On construit par la suite le vecteur des phases correspondantes aux deux rythmes musicaux afin de comparer la corrélation de chacun des deux phases aux phases du tempérament égal et juste. En se basant sur le calcul de la valeur de la corrélation à partir de la phase, on retrouve les valeurs suivantes :

cov	phi hi	phi ca
phi eq	0.07128	0.9999
ph ji	1.0000	0.07128

Table 1: Covariance des vecteurs phases des différents tempéraments.

On en déduit que les phases des tempéraments hindustani sont bien corrélés avec celles du tempérament juste, alors que les phases du tempérament carantici sont plus corrélés aux phases de tempéraments égaux.

Cela peut être expliqué par le fait que le tempérament juste est basé sur des intervalles harmoniques purs, qui sont également utilisés dans la musique hindoustani pour créer des ragas. Dans le tempérament juste, les intervalles sont définis par des rapports de fréquence simples, tels que 3:2 pour la quinte parfaite et 4:3 pour la quarte juste.

De même, la musique hindoustani utilise des intervalles naturels et harmoniques qui correspondent souvent aux intervalles du tempérament juste. Par conséquent, les phases des deux systèmes d'accordage sont bien corrélées car ils partagent des principes fondamentaux similaires en termes d'intonation et de construction harmonique.

Dans la musique carnatique, l'utilisation de micro-intervalles et de modulations précises peut être mieux adaptée au tempérament égal, qui offre une plus grande précision dans la représentation des intervalles que le tempérament juste.

Conclusion :

En conclusion, ce projet sur l'application de la Just-Intonation Transform dans le domaine de la musique a révélé des perspectives fascinantes sur la préservation des relations harmoniques précises entre les notes. En se concentrant spécifiquement sur la musique indienne classique, nous avons pu apprécier la richesse théorique et esthétique de cette tradition musicale séculaire, tout en explorant les possibilités offertes par une approche d'accordement juste.

Nous avons constaté que la Just-Intonation Transform offre une alternative prometteuse au tempérament égal, en permettant une reproduction plus fidèle des intervalles et des harmonies dans le domaine numérique. Cette approche ouvre de nouvelles voies pour l'enrichissement des pratiques musicales traditionnelles, tout en offrant des possibilités créatives

dans le contexte contemporain de la composition et du traitement du signal musical.

Cependant, des défis persistent, notamment en termes de compatibilité avec les systèmes existants et de la nécessité de sensibiliser les praticiens et les auditeurs à cette approche alternative d'accordement musical. Néanmoins, les avantages potentiels en termes de qualité sonore et d'expression musicale justifient pleinement la poursuite de la recherche et du développement dans ce domaine.

En définitive, ce projet nous rappelle que la musique est un art profondément ancré dans la culture et la tradition, mais aussi en constante évolution grâce à l'exploration et à l'innovation. La Just-Intonation Transform représente une voie prometteuse pour préserver et enrichir l'héritage musical mondial, tout en stimulant la créativité et l'expression individuelle dans le monde de la musique.

Bibliographie :

- + Born, G. (2020). Diversifying MIR: Knowledge and real-world challenges, and new interdisciplinary futures. *Transactions of the International Society for Music Information Retrieval*, 3(1).
- + McFee, B., Raffel, C., Liang, D., Ellis, D. P., McVicar, M., Battenberg, E., Nieto, O. (2015, July). librosa: Audio and music signal analysis in python. In *Proceedings of the 14th python in science conference* (Vol. 8, pp. 18-25).
- + Schörkhuber, C., Klapuri, A. (2010, July). Constant-Q transform toolbox for music processing. In *7th sound and music computing conference*, Barcelona, Spain (pp. 3-64).
- + Serra, J., Koduri, G. K., Miron, M., Serra, X. (2011, October). Assessing the Tuning of Sung Indian Classical Music. In *ISMIR* (pp. 157-162).
- + <https://perso.telecom-paristech.fr/grichard/Publications/2021-deep-learning-audio-book.pdf>
- + Music Deep Learning: Deep Learning Methods for Music Signal Processing—A Review of the State-of-the-Art.
- + Melody Extraction from Polyphonic Music Signals: Approaches, Applications and Challenges by Justin Salamon, Student Member, IEEE, Emilia Gomez, ´ Member, IEEE, Daniel P.W. Ellis, Senior Member, IEEE, and Gael Richard, ¨ Senior Member, IEEE.
- + Signal Processing Approaches to Musical Tuning System Detection in Audio, by Cobb, Ethan. 2022. Signal Processing Approaches to Musical Tuning System Detection in Audio Bachelor’s thesis, Harvard College.
- + Johnston, Ben (2006) [2003]. "A notation system for extended Just Intonation". In Gilmore, Bob (ed.). 'Maximum Clarity' and Other Writings on Music. Urbana and Chicago, Illinois: University of Illinois Press. pp. 77–88. ISBN 978-0-252-03098-7.