

---

---

# Initiation à la recherche

## Classification de musique non supervisée

### Résumé

La recommandation musicale se repose à la foi sur l'étiquetage des genres musicaux des chansons et sur les données personnelles des auditeurs. Dans cet article, nous vous proposons de classer automatiquement les items en fonction de leurs caractéristiques communes basées sur l'analyse du signal audio. Différentes méthodes de clustering ont été testées pour pouvoir déterminer une classification cohérente des chansons tout en étant indépendante du contexte de ces dernières. Les résultats montrent que les algorithmes de clustering peuvent classer efficacement des genres musicaux qui peuvent s'avérer différents des genres traditionnellement admis et permettent de concevoir des systèmes de recommandation.

**Mots-clés :** Analyse de signal, Musique, Classification, Non supervisé

---

---

## 1 Introduction

L'explosion des plateformes d'écoute en ligne nous expose à de plus en plus de musique. Les algorithmes de recommandations deviennent donc de plus en plus importants pour guider les utilisateurs vers la musique qui leur plaît. Les approches actuelles se basent souvent sur les habitudes d'écoutes de nombreux utilisateurs ou des métadonnées, mais ne considèrent pas vraiment le côté musical. Comme les recommandations sont basées sur les habitudes d'écoute, elles limitent la découverte de nouveaux artistes, et exacerbent les artistes déjà beaucoup écoutés. Nous souhaitons par ce projet, proposer un système de classification qui se baserait sur la musique en elle-même. Notre approche utilise donc des critères d'analyse du signal pour classer des musiques et ne se base pas sur les métadonnées des chansons. Nous espérons ainsi créer un système de recommandation qui prend en compte la musique plutôt que les habitudes d'écoute.

## 2 Etat de l'art

La musique étant massivement présente en format numérique, et le besoin de classer les différentes musiques étant toujours aussi présent, les chercheurs ont développé différentes techniques permettant d'automatiser le processus.

## 2.1 L'analyse et la classification musicale

La recommandation de musique s'appuie essentiellement sur l'identification des genres. L'humain étant capable de reconnaître un genre musical dans 70% des cas au bout de 3 secondes d'écoutes seulement, et dans 50% des cas au bout de 0.25 secondes [L. Tanquerel, 2005], les chercheurs ont essayé de réaliser cette discrimination de manière automatique et se sont reposés sur l'analyse et l'extraction des données physiques des fichiers audio. Ainsi, les critères formels pris en compte ont été utilisés pour différencier les divers genres musicaux et attribuer chaque titre à l'un de ces genres.

La difficulté réside dans le choix de critères pertinents, divers techniques se sont développées au fil du temps et les chercheurs se sont notamment basés sur la structure rythmique, la superposition des instruments, ou encore le timbre. Deux approches sont particulièrement utilisées dans le domaine, la première se repose sur l'analyse du signal, qui utilise la reconnaissance de motifs et la construction d'une "surface musicale" [L. Tanquerel, 2005] et la seconde sur l'analyse des caractéristiques physiques de haut niveau se basant sur l'analyse de partitions musicales (qui permet d'extraire des données telle que la hauteur d'une note), cette dernière technique étant possible même quand le fichier audio n'est pas disponible.

## 2.2 Les systèmes de recommandation

Souvent dans le but de fidéliser l'utilisateur et maximiser le temps qu'il passe sur la plateforme, les systèmes de recommandation (que ce soit celles utilisées par les plateformes de streaming audio comme Deezer et Spotify, vidéo comme Youtube et les réseaux sociaux comme Facebook) utilisent les données récoltées au cours de l'utilisation du service par un profil utilisateur pour affiner les recommandations en plus des autres techniques de classements.

Une analyse contextuelle est bien souvent nécessaire pour avoir des résultats plus proches de la sensibilité humaine, en prenant en compte les subjectivités liées à la reconnaissance de genres par l'Homme (comme les influences culturelles ou l'émotion). Cette analyse se fait souvent sur les métadonnées récoltées en continu et qui évoluent en suivant les tendances. Pour cela, ils se basent sur l'utilisateur en lui-même et ses interactions (autant avec les items qu'avec les autres utilisateurs). On utilise les deux approches, souvent complémentaires, qui sont :

- Le filtrage par contenu, s'intéressant au couple [*Profil utilisateur-Item*] et sur l'appréciation de l'utilisateur concernant cet item. La proximité des items est affinée en recueillant ces appréciations et l'utilisateur se voit recommander les items les plus pertinents en vue de sa notation ou de son nombre de consultations des items voisins.
- Le filtrage collaboratif, quant à lui, crée une proximité sociale entre les utilisateurs et classe les items selon les affinités entre utilisateurs afin de proposer un item "populaire" au sein d'un groupe aux utilisateurs en faisant partie.

Mais c'est généralement des méthodes hybrides qui sont utilisées dans les services de recommandation. Ces données sont exploitées par des algorithmes de classification supervisés

---

en se reposant sur les classements faits par les libraires, les radios et les musicologues pour les caractéristiques liées aux musiques et sur les données récoltées lors de l'utilisation du service par l'utilisateur pour ce qui est des métadonnées. Mais les différentes subjectivités et les définitions parfois très vagues de certains genres sont une source importante d'erreurs. De plus, l'analyse contextuelle favorise l'enfermement de l'auditeur dans un univers restreint et peine à réellement recommander de nouveaux genres, s'ajoute à cela qu'en prenant en compte la popularité des morceaux, en cas de filtrage collaboratif, il est moins probable que ces techniques recommandent un titre impopulaire mais proche des goûts musicaux de l'auditeur (qu'il serait donc susceptible d'apprécier).

## 2.3 Propositions

Les techniques énoncées précédemment se basent sur un mimétisme des choix des utilisateurs et sur les étiquetages et ne se reposent pas sur une classification objective de la musique. De ce fait, il est plus difficile de classer les genres de manière universelle. Nous nous proposons donc de chercher un moyen de classer la musique de façon plus indépendante de l'utilisateur dans un premier temps, mais aussi de façon indépendante des genres déjà définis, et ce pour plusieurs raisons :

- Il n'y a pas de réel consensus sur une liste exhaustive de genres musicaux.
- La définition de certains genres musicaux étant floue et assez vague pour comprendre une même chanson dans plusieurs genres.
- Ils sont basés sur des influences culturelles et parfois ancrées dans un air temporel défini.

Une fois que le classement ait été établi grâce à des algorithmes de classification non supervisée (qui se baseront donc essentiellement sur l'analyse musicale), nous intégrerons les préférences de l'auditeur au modèle pour isoler et pouvoir proposer les items les plus proches de ses envies. Cette classification indépendante des constructions "artificielles" de catégories de musiques est susceptible de rassembler les items dans des groupes aux frontières potentiellement mieux définies.

## 3 Analyse audio

Les algorithmes de clustering ont besoin de données pour effectuer une classification. Nos données initiales sont des fichiers audio, ils contiennent le signal musical en lui-même et quelques métadonnées telles que le titre, l'artiste ou encore l'album. Nous voulions dans notre démarche proposer des chansons similaires sans se baser sur les métadonnées des chansons, mais plutôt la similitude des chansons. La seule métadonnée que nous utiliserons est donc la durée.

Il n'est pas possible de donner aux algorithmes de clustering directement le signal, nous devons donc "simplifier" le signal en données exploitables pour ces algorithmes. Beaucoup de travaux ont été réalisés en analyse de musique et analyse vocale. Un grand nombre de ces travaux se base sur l'analyse du signal audio. Certains critères calculables à partir du signal

sont assez récurrents dans les différents travaux du domaine, c'est pourquoi nous avons décidé de les utiliser comme critères pour effectuer notre classification.

### 3.1 Présentation des données

Nous avons retenu 4 critères assez communs en analyse audio que nous allons détailler dans cette section : le Zero Crossing Rate, le Root Mean Square, la Centroid et le Spread. Nous devons déjà expliquer la nature de nos données.

Un signal audio analogique peut être vu comme la pression exercée par une source sur l'air qui l'entoure dans le temps. Cette pression de l'air est captée par nos oreilles ou bien un microphone. Sa nature est continue, pour transformer ce signal continu en information on utilise une méthode d'échantillonnage pour discrétiser l'information, on a alors un signal numérique.

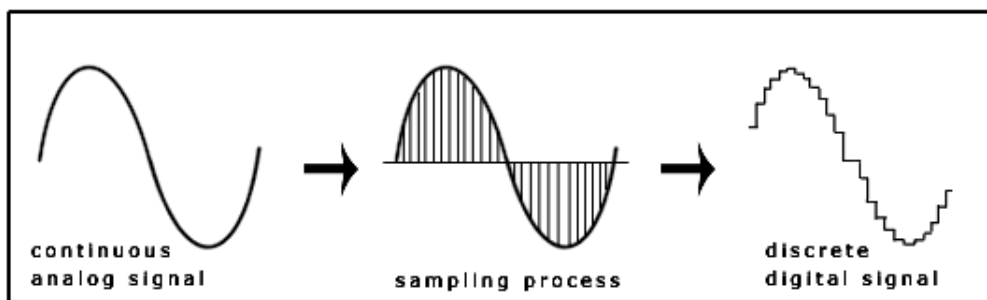


FIGURE 1 : Echantillonnage d'un signal continu

La fréquence d'échantillonnage ( $F_e$ ) détermine la fréquence à laquelle chaque échantillon est pris. Plus la fréquence est haute plus le signal numérique est proche du signal analogique. Le sampling mène à une perte d'information s'il existe des variations plus rapides que la fréquence d'échantillonnage. De manière générale on dit que le signal est bien représenté tant qu'il ne contient pas une fréquence supérieure à  $\frac{F_e}{2}$ . C'est pourquoi le standard dans l'industrie de la musique est  $F_e = 44100 \text{ Hz}$  ce qui permet de couvrir tout le spectre de l'audition humaine (20 Hz à 20000 Hz) avec un peu de marge.

Une chanson contient en général deux pistes audio pour donner un effet stéréo. Nous convertissons ces deux pistes stéréo en une seule piste mono pour conduire nos analyses. Nous découpons ensuite le signal en morceaux plus courts pour calculer chacun de nos critères en gardant l'aspect temporel de la musique. Nous avons choisit de découper le signal en sections de une seconde, qui est un bon compromis entre vitesses de calcul des critères et précision temporelle [N. Scaringella, 2006].

---

### 3.2 Critères temporels

Nous pouvons maintenant calculer deux de nos critères, le premier étant le zero crossing rate, ou taux de passage par zéro. Ce critère permet d'avoir une estimation du timbre du signal (un signal aigu passera par zéro plus fréquemment qu'un signal grave).

$$ZCR = \frac{1}{N} * \sum_{n=1}^N \delta(x_{n-1} \cdot x_n \leq 0) \quad (1)$$

Avec  $x_i$  le  $i$ -ème échantillon du signal,  $N$  le nombre d'échantillons et :

$$\delta(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } x \text{ est vrai.} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

Le second critère est le root mean square : ce critère permet de calculer l'énergie moyenne du signal sur une période.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n^2} \quad (2)$$

### 3.3 Critères fréquentiels

Nos deux autres critères s'intéressent à l'aspect fréquentiel d'un signal. Tout signal peut être décomposé comme une somme de fonctions sinusoïdales avec différentes fréquences. La transformation de Fourier est un outil nous permettant d'effectuer un passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Dans le domaine temporel on observe l'intensité du signal à un moment donné. Dans le domaine fréquentiel on observe l'intensité d'une fréquence sur la totalité du signal. L'intensité de la  $k$ -ième fréquence d'un signal  $s$  à  $N$  échantillons est donnée par :

$$s_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-2i\pi k \cdot \frac{n}{N}} \quad \text{pour } 0 \leq k < N \quad (3)$$

ou la  $k$ -ième fréquence vaut :  $-\frac{Fe}{2} (\frac{2k}{N} - 1)$

Les intensités obtenues sont donc des nombres complexes. Pour nos analyses on pourra utiliser  $|s_k|$ . La moitié de ces intensités représente des fréquences négatives. Dans le cas d'un signal réel comme le notre il existe une symétrie parfaite entre les fréquences négatives et positives. Il est important de conserver les fréquences négatives pour effectuer la transformée inverse, mais pour analyser le signal nous pouvons nous permettre de les ignorer. Nous considérons donc les fréquences dans la plage 0 à  $\frac{Fe}{2}$  Hz.

Nous pouvons ainsi calculer nos deux derniers critères, à commencer par la Spectral Centroid : Elle représente la fréquence moyenne du signal sur la période analysée.

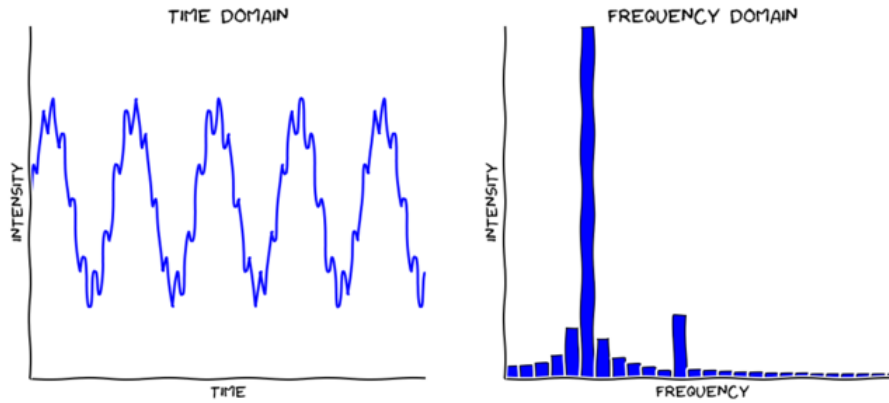


FIGURE 2 : Passage du domaine temporel au domaine fréquentiel

$$Centroid = \frac{\sum_{k=0}^{T-1} \frac{Fe}{2} \frac{k}{T} * s_k}{\sum_{k=0}^{T-1} s_k} \quad \text{avec } T \text{ le nombre de fréquences} \quad (4)$$

Le dernier critère que nous calculons est le Spectral Spread. Ce critère représente l'écart de fréquence du signal sur la période analysée.

$$Spread = \frac{\sum_{k=0}^{T-1} \frac{Fe}{2} \frac{k}{T} (s_k - Centroid)^2}{\sum_{k=0}^{T-1} s_k} \quad \text{avec } T \text{ le nombre de fréquences} \quad (5)$$

Ces calculs sont réalisés par un programme que nous avons écrit dans le langage C#. Ces calculs nous donnent donc quatre vecteurs d'une longueur égale à la durée de la chanson en seconde. Nous utiliserons ces données pour effectuer notre clustering par la suite.

## 4 Classification

Notre but étant d'obtenir une classification "naturelle" des chansons, et d'obtenir un ensemble d'univers musicaux cohérents. Nous utilisons donc des algorithmes de classifications non supervisées avec les données recueillies précédemment. Nous considérons pour chaque chanson la médiane et l'écart type de chaque critère ainsi que sa durée.

### 4.1 Méthodes adoptées

Nous avons testé 4 algorithmes de clustering pour classer les différents genres musicaux avec, en entrée les 9 valeurs extraites des différentes analyses :

- **K-Means** : divise les items en un nombre défini de clusters de variances égales et minimisant le critère de la somme des carrés au sein d'un cluster

- 
- **Agglomerative Clustering** : Algorithme de classification hiérarchique à approche ascendante. Pouvant s'utiliser avec plusieurs critères de liaison : simple, moyenne, complète, ward, c'est ce dernier que nous avons choisi et qui est assez proche de la fonction objectif de K-Means mais abordée avec une approche hiérarchique agglomérative.
  - **Affinity Propagation** : classe les données en considérant successivement les paires d'items jusqu'à convergence pour décider, ensuite, d'un ensemble de données "représentatifs". Cet algorithme ayant la particularité de choisir lui-même le nombre de clusters pour les données fournies, nous nous sommes basés sur ses résultats pour décider du nombre de clusters pour les autres algorithmes testés.
  - **Spectral Clustering** : Classe les items en suivant l'imbrication de la matrice d'affinité entre échantillons, suivie d'un K-Mean dans l'espace dimensionnel faible.

## 4.2 Mise en oeuvre

Pour mettre en oeuvre ces algorithmes, nous avons développé un programme en Python et utilisons une bibliothèque libre d'apprentissage automatique : Scikit-learn. La communication avec le programme d'analyse se fait via un fichier JSON. Nous obtenons les résultats présentés en figure 3.

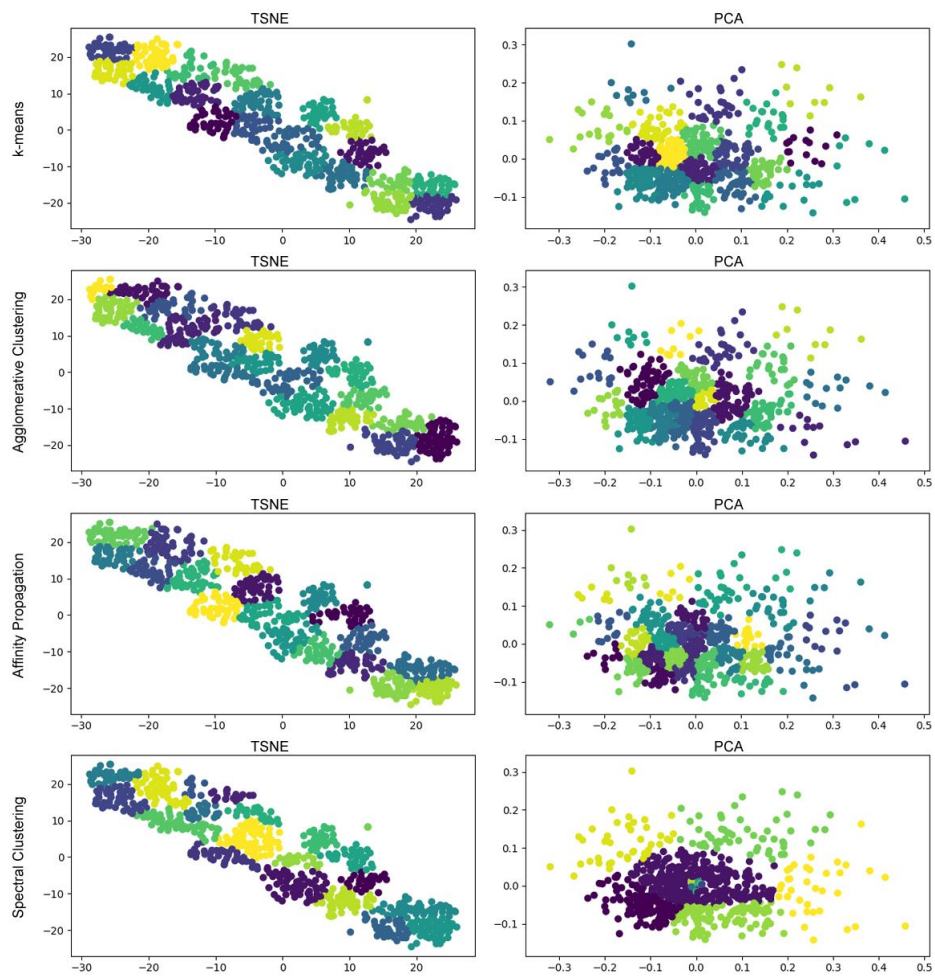
Les données présentent, à gauche, une représentation en 2D des clusters obtenus en appliquant les algorithmes sur les 9 données recueillies, et à droite, la régression des données après application de l'algorithme PCA (Principal Component Analysis). On peut constater une forte similarité entre les clusters des différents algorithmes, en particulier sans utilisation de PCA. Avec la réduction des données, les résultats sont assez proches pour chacun de K-Means, Agglomerative Clustering et Affinity Propagation, avec quelques différences pour les données les plus excentrées. En revanche, la classification se fait de manière différente pour Spectral Clustering (algorithme traditionnellement utilisé sur un faible nombre de clusters). Nous pouvons, ici, remarquer un grand nombre de clusters contenant peu d'items, au niveau de ce qui semble être le centre de gravité du jeu de données, englobés par un cluster beaucoup plus imposant suivi des autres clusters tout autour.

## 5 Résultat expérimentaux

Après avoir extrait les données et appliqué les algorithmes de classification non supervisés sur 675 chansons et musiques tirées d'univers musicaux variés allant de While My Guitar Gently Weeps des Beatles à Ride the Lightning de Metallica en passant par Diriyi de Ait Menguellet. Nous nous proposons de tester l'efficacité de la classification obtenue.

### 5.1 Protocole

L'évaluation s'est faite sur la classifiant les items avec une réduction des données grâce à PCA puis sans. Les tests, réalisés sur un échantillon de 5 personnes, consistaient à tirer aléatoirement 3 morceaux d'un même cluster et les faire écouter aux participants. Ensuite, chaque participant propose une chanson qu'il juge proche des morceaux écoutés, et une chanson qu'il juge, au contraire, de styles différents. Nous renouvelons l'expérience de chaque participant avec chaque algorithme de clustering testé. Une fois ces données recueillies, nous appliquons



**FIGURE 3 :** *Clusters formés par différents algorithmes sans PCA et avec PCA.*



notre programme d'analyse sur les chansons proposées et demandons à l'algorithme correspondant à la réponse de prédire la classe du nouvel item afin de comparer avec les réponses des participants.

## 5.2 Resultats

Nous avons, tout d'abord, testé nos algorithmes sans réduction des données (donc sur 9 dimensions) avons testé la prédiction des chansons proposées par les participants aux tests et les avons comparé à leur appréciation. Le taux de prédictions correctes pour les chansons de style jugés proches est, globalement, de 35% et pour les chansons de style jugés différent est de 100%.

	K-means	Agglomerative	Affinity	Spectral
réussite : chansons proches	20%	20%	20%	80%
réussite : chansons différentes	100%	100%	100%	100%

**FIGURE 4 :** Taux de réussite des algorithmes sans PCA.

Ensuite, nous avons réalisé le même test avec le même échantillon de 5 personnes avec les résultats des classification après réduction des données (en utilisant l'algorithme PCA). Cette fois-ci le taux de prédictions correctes pour les chansons de style jugés proches est de 55% et pour les chansons de style jugés différent, il est de 100%.

	K-means	Agglomerative	Affinity	Spectral
réussite : chansons proches	60%	60%	60%	40%
réussite : chansons différentes	100%	100%	100%	100%

**FIGURE 5 :** Taux de réussite des algorithmes avec PCA.

Les résultats nous montrent que la prédiction de non-appartenance d'une chanson à un cluster jugé différent d'elle est tout le temps correct. Les méthodes que nous avons utilisées semblent discriminer correctement les genres très différents, indépendamment de l'algorithme de classification ou de l'application ou non de PCA. En ce qui concerne l'efficacité de la prédiction positive (l'item appartient à la classe), il est globalement plus intéressant d'utiliser une réduction PCA, correcte dans 55% des cas, avec K-Means, Agglomerative Clustering et Affinity Propagation qui présentent des taux de prédiction corrects de 60% chacun (contre 20% chacun si les données ne sont pas réduites). En revanche, on peut remarquer que l'algorithme Spectral Clustering est le plus performant avec 80% de taux de prédictions positives correctes quand il est utilisé sans réduction des données. Mais tous les résultats de ces tests sont à prendre avec prudence du fait du faible nombre d'échantillons de l'expérience.

La classification de la musique grâce à des algorithmes de clustering semble possible. Cependant plusieurs améliorations pourraient donner des résultats plus solides. Premièrement, le

faible nombre de données (675 chansons classifiées) peut affecter significativement les résultats potentiels et ces algorithmes pourraient affiner leur classification avec un jeu de données plus conséquent. Deuxièmement la réduction des données à une simple médiane et écart-type alors que les valeurs peuvent être très différentes à divers moments de la musique (pour rappel, 4 valeurs sont calculées en étudiant le signal de chaque fichier audio divisé en fenêtres de 1 seconde). Appliquer ces méthodes de clustering sur des données plus représentatifs des fichiers audios pourrait se montrer assez fructueux.

## 6 Conclusion

Le travail mené au cours de cette étude a permis d'obtenir un système de classement des genres musicaux basé sur des algorithmes de classification non supervisés. Afin de produire un ensemble de critères efficaces, nous avons expérimenté divers descripteurs et avons retenu les plus pertinents et ceux dont les résultats sont les plus significatifs. Les données récoltées après les analyses des fichiers audio ont pu servir à la classification des différents morceaux, et comme nous avons pu nous y attendre, créé des genres assez différents de ceux que l'on pourrait imaginer de prime abord. Même si les principaux styles musicaux semblent être représentés, certains clusters contiennent des chansons que l'on aurait pu imaginer plus différentes. La classification résultant de notre travail peut servir à étiqueter les chansons de manière plus objective, et peut permettre une recommandation plus basée sur la musique aux auditeurs et moins sur les statistiques d'écoute de cette musique, notamment la popularité de la chanson ou de l'artiste, l'effet de mode qui fait que l'on peut être influencé par l'évolution des goûts du groupe social auquel on s'identifie, ce qui permet de donner autant de chances pour des artistes moins connus mais dont la musique pourrait s'avérer compatible avec les goûts de l'auditeur.

## Références

- [L. Tanquerel, 2005] L. Tanquerel, L. L. (2005). Techniques pour la recherche de similarités musicales - un état de l'art.
- [N. Scaringella, 2006] N. Scaringella, G. Zoia, D. M. (2006). Automatic genre classification of music content : a survey. *IEEE Signal Processing Magazine*.