

De l'intérêt d'une extension du Tonal Diffusion Model pour étudier l'évolution de l'harmonie fauréenne.

Auteur: Sacha Levi Mazloum

Université: Paris Sciences & Lettres

Contact : sacha.levimazloum@psl.eu

Date: 7 Novembre 2025.

1. Introduction

Le Tonal Diffusion Model (Lieck, Moss & Rohrmeir, 2020) permet de modéliser le “profil harmonique” spécifique à une pièce de musique. Chacune des notes de celle-ci est vue comme le résultat d’une séquence de transitions sur le Tonnetz depuis un ou plusieurs centres tonaux, le Tonnetz (Euler, 1737) étant une représentation conventionnelle des relations harmoniques (Voir Figure 1). Ainsi, étant donné la distribution des notes dans une pièce, le TDM apprend un poids pour chaque transition sur le Tonnetz (quinte, tierce majeure, tierce mineure), ainsi qu’une distribution de probabilité sur les centres tonaux et les longueurs des chemins possibles (Binomiale, Poisson, Gamma, a priori). Pour mesurer la pertinence d’un profil harmonique appris par le TDM, on génère une distribution des notes associées à ce profil abstrait, par une marche aléatoire (diffusion) sur le Tonnetz en fonction des paramètres appris. Puis, on compare cette distribution “prédictive”, avec la distribution réelle des notes de la pièce en calculant la divergence de Kullback-Leibler (la “loss” du modèle, si l’on veut, et l’on en obtient une par pièce). Pour chaque pièce, le meilleur profil est alors celui qui permet de minimiser cette divergence, après itération du processus. Les performances du modèle ont été évaluées en 2019 sur le Tonal Pitch-class Count Corpus (Moss,).

Les auteurs du TDM concluaient alors à sa supériorité sur des modèles “baseline” apprenant des profils harmoniques statiques – reflétant le mode majeur ou mineur par exemple –, et à la finesse particulière de la variante Binomiale (avec quintes + tierces) sur des œuvres à l’harmonie complexe, comme celles de Liszt. Il se trouve que la musique de Fauré est également célèbre pour les raffinements et la complexité de ses harmonies (R. C. Tait, 1986), mais trop peu représenté dans le corpus de test qu’ils utilisèrent, le TP3C (Moss & Rohrmeier, 2021). De plus, comme le souligne le musicologue R.C Tait, la musique de Fauré évolue sur trois périodes : 1861-1884 – harmonie raffinée mais encore assez traditionnelle, style un peu salonnard ; 1884-1909 – harmonie enrichie et plus modulante, par relations de tierces souvent; 1909-1923 – harmonie très modulante, et faisant usage des modes grégoriens . **Peut-on répliquer les performances du TDM sur un nouveau corpus d’œuvres de Gabriel Fauré ? Le TDM original peut-il fournir une modélisation intéressante de l’harmonie fauréenne et de son évolution ?** Pour le déterminer nous testerons les prédictions suivantes, qui découlent naturellement de notre objectif de réPLICATION et des thèses que nous venons d’exposer.

Comparaison de performances.

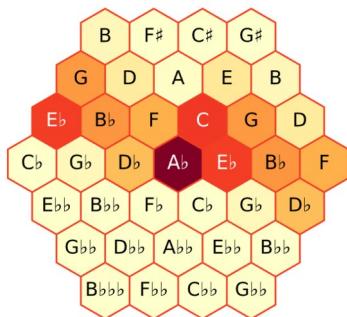
- **P1** – Le TDM Binomial (quintes + tierces) obtient de meilleures performances que les modèles baseline sur l’intégralité du corpus.
- **P2** – Le TDM Binomial (quintes + tierces) est plus performant sur les deuxième et troisième périodes que sur la première (idée d’un lien entre la finesse du modèle et la performance sur des harmonies complexes).

Analyse des profils appris par le meilleur modèle.

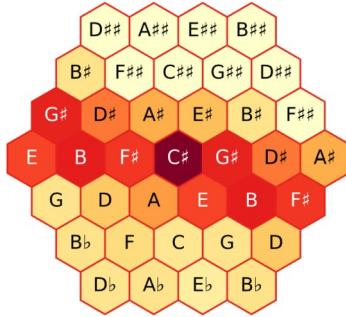
- **P3 –** Les relations de tierces comptent plus pour les œuvres des deuxième et troisième période (cela refléterait des modulations plus hardies, une harmonie qui s'éloigne du cycle des quintes).

Analyse Bonus :

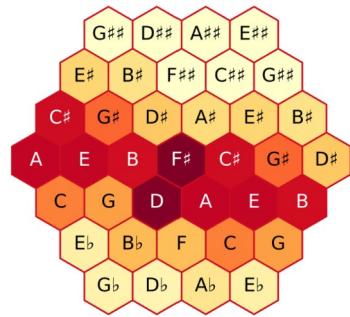
Sans trop de conviction au départ, nous avons testé un TDM binomial avec Tonnetz à 3 dimensions (quintes, tierces ET tritons), étoffement le plus minime qui soit. (Mais qui peut se justifier : le triton joue un grand rôle dans la gamme par tons et les accords diminués, facilite des modulations vers des tons éloignés – autant de caractéristiques d'une harmonie avancée.). Nous rendrons compte du succès stupéfiant d'un tel modèle sur notre corpus, et concluerons par quelques analyses semi-exploratoires des nouveaux profils harmoniques appris.



(a) Dans les ruines d'une abbaye,
Op. 2 n°1, période 1.



(b) Nocturne n°7 Op.74,
période 2.



(c) Impromptu n°5, Op. 102,
période 3.

Figure 1. Distributions des notes sous la forme de Heatmap-Tonnetz (2d). Les trois œuvres choisies appartiennent aux différentes périodes de la musique du Fauré, et reflètent son évolution stylistique. Les graphes ont été produits à l'aide de la librairie *pitchplots*, légèrement révisée et mise à jour par nous-mêmes

2. Données.

Nous avons utilisé CorpusFaureMvp, jeu de données provisoire créé à partir des partitions de 66 œuvres de Fauré. Pour le constituer, nous nous sommes appuyés sur les 18 partitions Musicxml de Fauré, téléchargeables via le PDMX (Long et al., 2024, large corpus de partitions scrapées depuis Musescore). Nous avons complété par d'autres partitions au format Musicxml, que nous avons scrapées depuis Musescore ou transcris nous-mêmes si indisponibles. Dans ce dernier cas, nous n'avons pris que des réductions piano pour les pièces orchestrales ; avons privilégié les mouvements isolés aux œuvres entières, et rien transcrit d'autres que les notes (pas d'indication de tempo, d'expression etc. pour nous épargner du temps perdu inutilement). Toutes ces œuvres furent sélectionnées en choisissant aléatoirement un numéro d'opus, et de manière à obtenir 20 pièces pour chaque période. Nous avons rajouté 6 œuvres de la première période, déjà contenues dans le TP3C, et que nous avions oubliées.

Ces partitions Musicxml furent ensuite « parsées » à l'aide de la librairie python *ms3*. Nous obtenons ainsi un jeu de données de 66 lignes et 38 colonnes : titre ; compositeur ; période ; puis 35 « classes » de notes (de Fbb à B##), avec comme valeurs les comptages pour chaque pièce (**Figure 1.**)

3. Méthodes.

Nous invitons le lecteur à revenir à l'article original pour plus de détail sur fonctionnement du TDM et de ses variantes.

Après normalisation des comptages de notes, nous avons successivement lancé 4 variantes du TDM sur tout le corpus : Poisson, Binomial, Gamma, et notre nouvelle variante Binomial « tritons ».

En ce qui concerne les modèles baseline nous en avons testé 3 : le *GaussianModel*, ajuste simplement une gaussienne sur la distribution des notes. Le *SimpleStaticModel* apprend un profil unique sur tout le corpus qu'il plaque sur chaque distribution en le transposant. Le *FactorModel (poisson)* est une version simplifiée du TDM : c'est un modèle de diffusion basé sur le Tonnetz, mais lieu de simuler explicitement toutes les étapes du processus de diffusion, il suppose que le résultat final peut être écrit comme un produit direct de plusieurs “facteurs” indépendants, un par type d’intervalle (**Figure 2**).

Pour chaque pièce, et chaque modèle nous avons retenu une « loss » correspondant à la divergence de Kullback-Leibler entre la distributions réelle de notes et le profil généré par un modèle après 700 itérations, et *early stopping* éventuel. (Pour la Gaussian Model toutefois, il n'y a besoin que d'un seul passage sur les données). Nous avons également retenu les paramètres appris associés à la meilleur loss.

Pour test **P1** nous avons utilisé le test de Wilcoxon pour comparer les loss moyennes des modèles sur toutes les œuvres (normalité des distributions pressentie comme douteuse, et groupes similaires). **P2** fut vérifiée par un test de Kruskal, pour comparer les loss moyennes selon la période, pour le modèle le plus performant au global. Enfin, **P3** et quelques hypothèses *ad-hoc* pour le modèle Binomial « triton » furent soumises au Mann-Whitney U test.

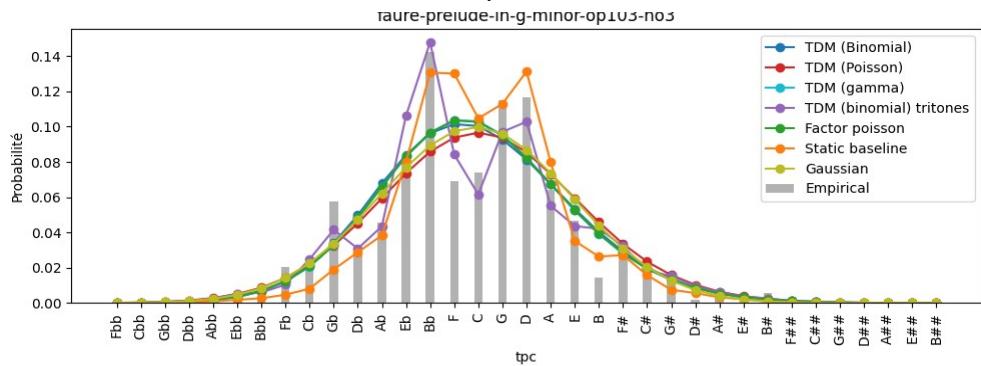


Figure 2: Barplot des profils appris par les différents modèles vs la distribution réelle des notes, pour un exemple de la 3^e période. Le modèle statique semble ici un peu chanceux. En revanche on constate la finesse de notre TDM Binomial triton, qui épouse parfaitement là distribution, là où les autres TDM se bornent à imiter une gaussienne et semblent inadaptés.

4. Résultats.

4.1 TDM Binomial (quintes + tierces) vs autre modèles.

En moyenne, sur l'ensemble du corpus, le TDM Binomial (quintes + tierces) obtient des performances significativement meilleures que tous les autres modèles TDM classiques (poisson, gamma) ou les modèles baseline. Ainsi **P1** est vérifiée.

Model	p
TDM Poisson	<0.0000
TDM Gamma	<0.0000
FactorModel Poisson	<0.0256
SimpleStaticModel	<0.0000

GaussianModel	<0.0000
---------------	---------

Table 1 : Série de tests de Wilcoxon où les loss (par pièce) obtenues par chacun des modèles sont comparées à celle du TDM Binomial (quintes + tritons). C'est en effet ce modèle qui obtient la plus faible divergence KL moyenne ($\mu = 0.05708$), suivi du *FactorModel (poisson)* ($\mu = 0.06090$), du TDM Poisson ($\mu = 0.09505$), du *GaussianModel* ($\mu = 0.0970$), du *SimpleStaticModel* ($\mu = 0.14113$), et enfin du TDM Gamma ($\mu = 0.18571$).

En revanche, nous n'avons pas trouvé de différences significatives de performance pour ce modèle (Kruskal H=5.112, p=0.0776), en fonction de la période des œuvres considérées. Ainsi **P2** est invalidée car nous nous attendions à ce que le TDM Binomial soit plus performant sur les 2e et 3e période (**Figure 3**).

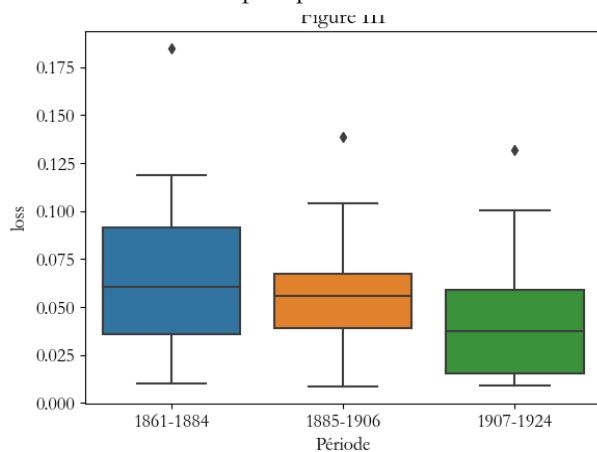


Figure 3. Boxplots de la loss (par œuvre) du TDM Binomial, selon la période des œuvres considérées.

4.2 Performances et analyse du TDM Binomial (quintes + tierces + tritons)

Ce modèle ajoutant un niveau de complexité supplémentaire au TDM Binomial (quintes + tierces) nous pouvions nous attendre à ce qu'il soit encore plus performant que ce dernier – et tous les autres – sur le corpus Fauré. C'est en effet ce que l'on observe ($\mu = 0.04512$, $p = 0.0001$, Wilcoxon test). Quand aux performances par période, seule la différence entre période 1 et période 3 est significative, le modèle se révélant plus efficace sur cette dernière ($p = 0.0017$).

L'analyse des poids appris par le modèle révèle une plus forte présence des relations de tritons dans les œuvres de la dernière période de Fauré, par rapport ses œuvres de jeunesse ($p = 0.0017$). En revanche pas de différences significatives dans l'importance des relations de tierces selon la période considérée. Cela invalide **P3**.

En lançant ce nouveau TDM sur un corpus d'œuvres de Bach et de Beethoven, nous avons constaté que les performances étaient nettement moins fulgurantes. Des modèles faisant appel à des représentations moins complexes u Tonnetz (Binomial quintes + tierces ou Binomial quintes pour Bach) permettent ici des modélisations plus précises et subtiles.

5. Conclusion

Ce travail a permis de répliquer avec succès les résultats de l'article original sur le Tonal Diffusion Model (TDM), en l'appliquant à un nouveau corpus consacré à Gabriel Fauré. Comme dans l'étude initiale sur les œuvres de Liszt, la variante Binomiale classique du TDM (reposant sur les relations de quintes et de tierces) surpassé nettement les modèles baseline à profil harmonique statique. Cela

confirme l'intérêt de cette approche pour représenter des structures harmoniques complexes et évolutives. En outre, l'introduction d'une extension tritonique du modèle (qui les intervalles de tritons dans le Tonnetz) améliore encore les performances sur le corpus fauréen, en particulier pour les œuvres de la dernière période du compositeur. Ces résultats suggèrent que cette variante « 3D » du TDM capture efficacement des relations harmoniques plus subtiles et instables, caractéristiques du langage tardif de Fauré, mais moins présentes chez Bach ou Beethoven. Nous n'avons néanmoins pas encore les outils, notre étude met en évidence le potentiel du TDM, notamment dans ses versions enrichies, pour modéliser les transformations et la complexité harmonique propres à des esthétiques musicales spécifiques.

(NDLR :On nous reprochera peut-être de n'avoir pas pré-enregistré nos prédictions. C'est que nous n'étions pas encore tout à fait sûr d'arriver à faire fonctionner le TDM, jusqu'à très récemment, et que notre corpus nous semblait trop faible pour cela. Espérons que la justification que nous en avons donné et la non-significativité de certains résultats puissent attester de notre bonne foi.)

6. Références

Lieck, Robert & Moss, Fabian & Rohrmeier, Martin. (2020). The Tonal Diffusion Model. *Transactions of the International Society for Music Information Retrieval*. 3. 153. 10.5334/tismir.46.

Moss, Fabian & Rohrmeier, Martin. (2021). Discovering Tonal Profiles with Latent Dirichlet Allocation. *Music & Science*, 4. <https://doi.org/10.1177/20592043211048827>

Tait, Robin C. The musical language of Gabriel Faure. Diss. University of St Andrews, 1986.