



MODÉLISATION SPATIALE ET STRUCTURATION TERRITORIALE DE L'ACTIVITÉ MINIÈRE DANS LE DISTRICT DE BETAFO

¹RANDRIATAHINAMALALA Livasoa Moratiavina, ² Docteur RAHAAMANANA Jasmin,

³ Professeur Titulaire RANDRIANJA Roger

- 1- Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences Université d'Antananarivo
- 2- Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences Université d'Antananarivo
- 3- Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences Université d'Antananarivo
- 4- Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences Université d'Antananarivo

RESUME : Le district de Betafo, dans la région Vakinankaratra, présente un potentiel minier diversifié dont la répartition spatiale constitue un enjeu important pour l'analyse de l'exploitation minière artisanale. Cette étude vise à modéliser et hiérarchiser spatialement les potentiels miniers afin d'identifier les communes prioritaires et de mieux orienter l'évaluation des impacts socio-économiques et environnementaux. L'analyse repose sur 127 entités minières réparties en 8 catégories de potentiel. Les résultats montrent une forte concentration à Andrembesoa, qui regroupe 47 entités, soit environ 37 % du total, et présente 5 catégories distinctes. Anosiarivo Manapa compte 20 entités, Mahaiza 17 et Ambohimasina 11. La densité la plus élevée est observée à Mahaiza, avec environ 7,1 entités pour 100 km². L'indice synthétique de potentiel minier classe Andrembesoa au premier rang avec environ 74/100, devant Mahaiza et Anosiarivo Manapa, proches de 40/100. Le modèle de régression explique 57 % de la variation de la densité minière, avec un R² ajusté de 0,48. La diversité exerce l'effet positif le plus marqué, tandis que la superficie communale et la distance au plus proche voisin présentent des effets négatifs. Ces résultats fournissent ainsi une base spatiale robuste pour cibler les zones nécessitant une surveillance et une gestion prioritaires.

Mots-clés : Modélisation spatiale ; Potentiel minier ; Hiérarchisation ; Exploitation minière artisanale ; Betafo.

ABSTRACT: The District of Betafo, located in the Vakinankaratra Region, has diversified mineral potential whose spatial distribution represents an important issue for the analysis of artisanal mining activities. This study aims to spatially model and rank mineral potential in order to identify priority communes and support the assessment of related socio-economic and environmental impacts. The analysis is based on 127 mineral entities classified into 8 potential categories. The results show a strong concentration in Andrembesoa, which accounts for 47 entities, representing approximately 37% of the total, and includes 5 distinct mineral categories. Anosiarivo Manapa records 20 entities, Mahaiza 17, and Ambohimasina 11. The highest density is observed in Mahaiza, with approximately 7.1 entities per 100 km². The synthetic mineral potential index ranks Andrembesoa first, with about 74/100, followed by Mahaiza and Anosiarivo Manapa, both close to 40/100. The regression model explains 57% of the variation in mineral density, with an adjusted R² of 0.48. Mineral diversity shows the strongest positive effect, whereas commune area and nearest-neighbor distance have negative effects. These results provide a robust spatial basis for identifying areas requiring priority monitoring and management.

Keywords: Spatial modelling; Mineral potential; Ranking; Artisanal mining; Betafo.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.22829305>

1 Introduction

L'exploitation minière artisanale occupe une place importante dans les économies rurales de Madagascar, mais son développement peut également entraîner des transformations socio-économiques et environnementales significatives [1]. Dans ce contexte, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et les méthodes d'analyse spatiale constituent des outils adaptés pour localiser les ressources, analyser leur concentration et identifier les territoires potentiellement exposés aux effets des activités minières [2]. La modélisation spatiale permet notamment de combiner plusieurs indicateurs afin de caractériser et de hiérarchiser le potentiel minier [3]. Les approches multicritères appliquées à la cartographie de prospectivité facilitent l'intégration de données spatiales hétérogènes et l'identification des secteurs prioritaires [4]. Elles sont aujourd'hui complétées par des méthodes de cartographie et d'observation spatiale spécifiquement appliquées à l'exploitation minière artisanale [5]. Ainsi, dans le district de Betafo, cette étude vise à modéliser et hiérarchiser spatialement le potentiel minier à partir du nombre d'occurrences, de leur diversité, de leur densité, de leur proximité spatiale et de la superficie des communes. Cette démarche permet d'identifier les communes présentant les configurations minières les plus importantes et de fournir une base spatiale à l'analyse ultérieure des impacts socio-économiques et environnementaux.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

La réalisation de la modélisation s'est appuyée sur des données géographiques de référence du FTM Madagascar, notamment les limites administratives, les fonds cartographiques, le réseau routier et hydrographique [6]. Le FTM assure notamment la production et la diffusion de cartes et de bases de données géographiques de référence. Les informations relatives aux potentialités, occurrences et zones minières ont été complétées à partir des documents et données cartographiques du Bureau du Cadastre Minier de Madagascar (BCMM) [7], organisme chargé de la gestion des autorisations et permis miniers. Les données socio-économiques et informations de terrain proviennent également des documents et fiches d'enquête de le District de Betafo [8]. Les données ont été structurées principalement sous format CSV, puis traitées avec le langage Python dans l'environnement de développement Visual Studio Code, qui permet l'édition, l'exécution et le débogage de scripts Python. Les traitements ont mobilisé notamment Pandas, NumPy, GeoPandas, Matplotlib, Seaborn, SciPy et Scikit-learn pour la gestion des données, les calculs statistiques, les analyses spatiales, la régression et la production des représentations graphiques [9–11]. GeoPandas est spécifiquement conçu pour le traitement des données géospatiales sous Python.

2.2 Méthodes

La démarche méthodologique repose d'abord sur une collecte documentaire et institutionnelle combinant les données SIG du FTM, les informations minières du BCMM et les documents d'enquête provenant sur terrain dans le District de Betafo. Les données collectées ont été vérifiées, harmonisées et structurées afin de constituer une base exploitable pour les analyses statistiques et spatiales. Cette approche documentaire permet de croiser plusieurs sources et d'améliorer la cohérence de l'information utilisée [12]. L'analyse spatiale a ensuite porté sur le nombre d'entités minières, leur diversité, leur densité pour 100 km² et leur distance moyenne au plus proche voisin. Cette dernière mesure permet notamment d'apprécier le caractère concentré ou dispersé des occurrences minières [13]. Les indicateurs obtenus ont été standardisés puis combinés afin de construire un indice synthétique de potentiel minier permettant de comparer et de hiérarchiser les communes. L'utilisation d'indicateurs composites constitue une méthode appropriée pour synthétiser plusieurs dimensions dans une mesure commune [14]. Enfin, une régression linéaire multiple a été utilisée pour analyser la relation entre la densité du potentiel minier et les variables explicatives retenues, notamment la diversité, la distance au plus proche voisin et la superficie communale. La qualité du modèle a été appréciée à partir du R², du R² ajusté, des valeurs observées et prédites, des résidus, du QQ-plot et des coefficients standardisés, conformément aux principes du diagnostic des modèles de régression [15].

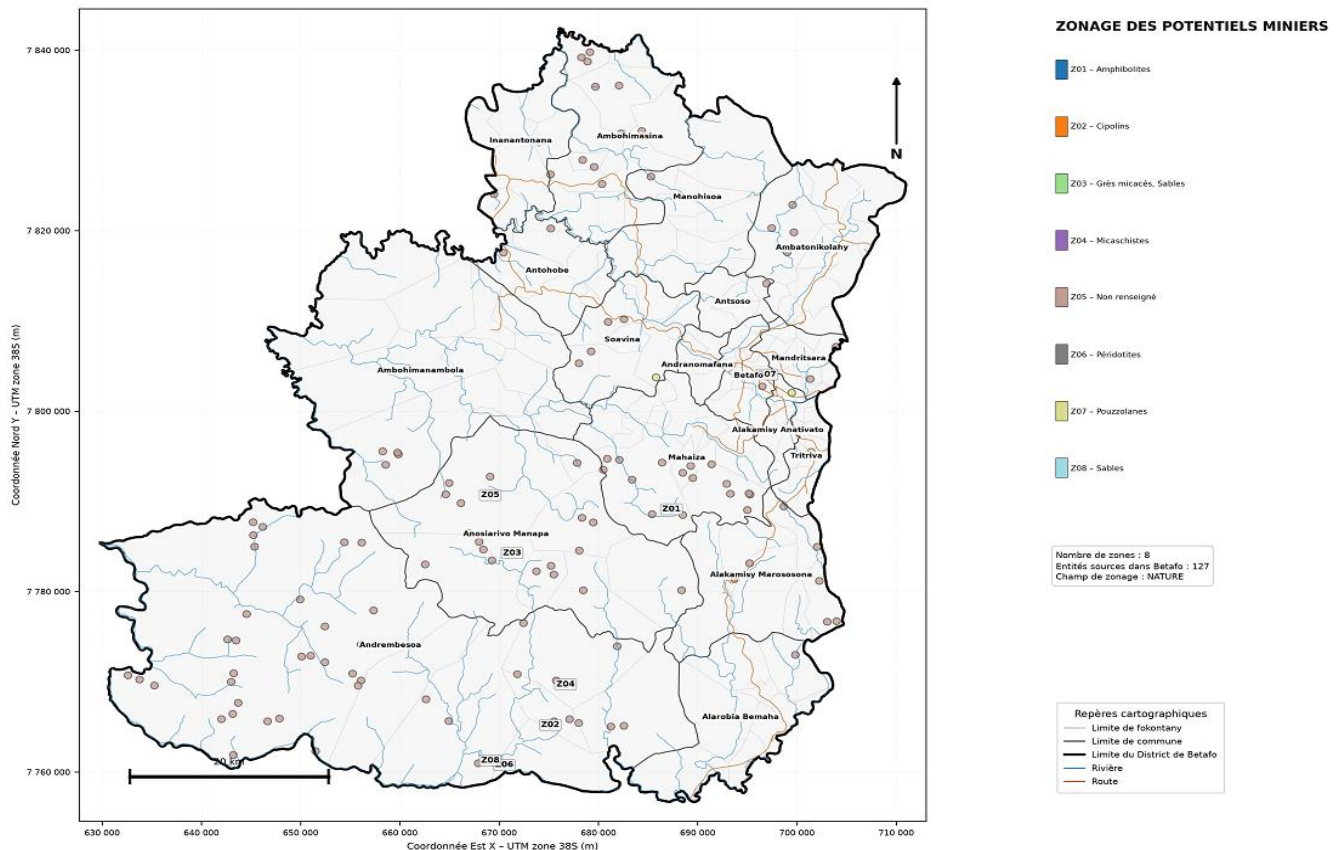
3 Résultats et discussions

3.1 Résultats

3.1.1 Répartition spatiale des zones de potentiel minier dans le district de Betafo

La figure 1 suivante présente la répartition spatiale des potentialités minières dans le district de Betafo, région Vakinankaratra. La cartographie distingue huit zones de potentiel minier, établies à partir de 127 entités sources recensées à l'intérieur du district. Elle met également en relation ces potentialités avec les limites administratives, le réseau hydrographique et les principaux axes routiers, éléments déterminants pour l'analyse intégrée des incidences socio-économiques et environnementales de l'exploitation minière artisanale.

Figure 1: Répartition spatiale des zones de potentiel minier dans le district de Betafo
CARTE DE ZONAGE DES POTENTIELS MINIER - DISTRICT DE BETAFO
RÉGION VAKINANKARATRA



Source : Auteur 2026

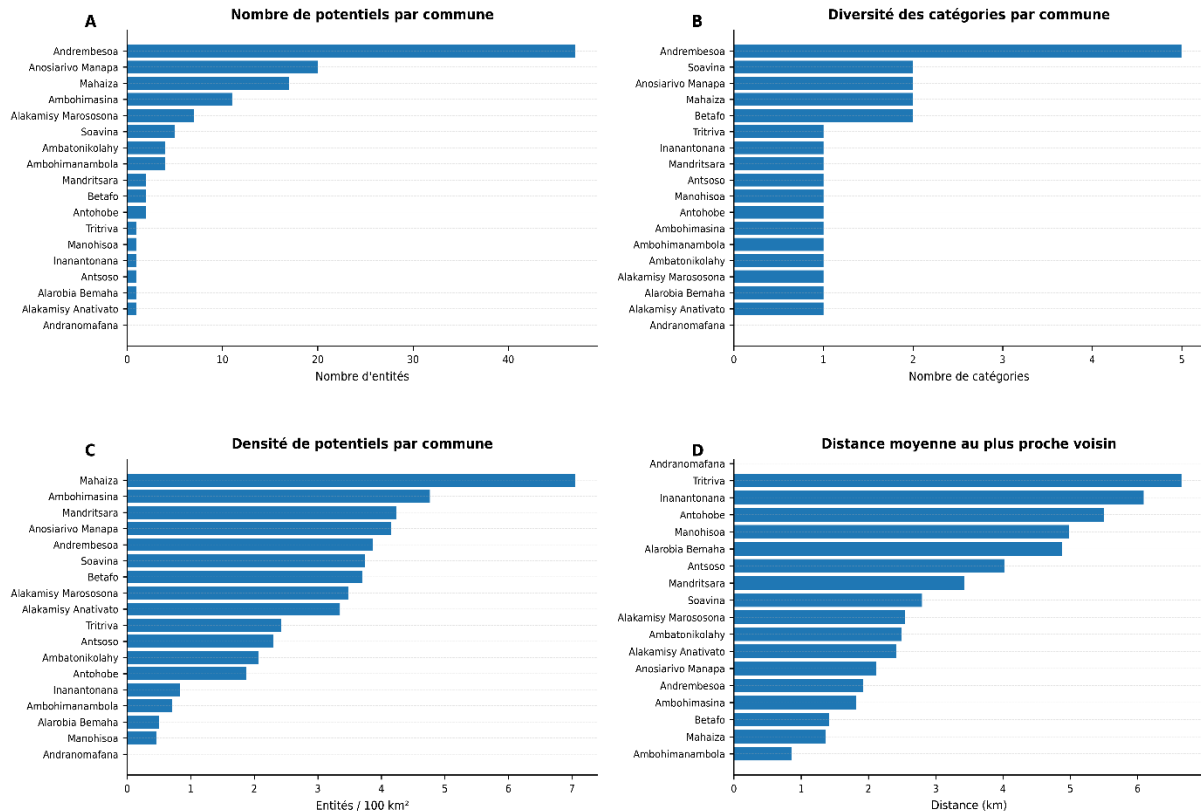
Interprétation

La carte met en évidence une répartition hétérogène du potentiel minier dans le district de Betafo. Elle distingue 8 zones minières (Z01 à Z08), définies à partir de 127 entités sources, correspondant notamment aux amphibolites, cipolins, micaschistes, périodites, pouzzolanes et sables. Les occurrences apparaissent davantage concentrées dans les parties centrale, méridionale et sud-ouest du district, même si des indices sont également observés au nord. La superposition avec le réseau hydrographique et routier montre que plusieurs zones potentielles sont situées à proximité des cours d'eau et des axes de circulation. Cette configuration facilite l'accès aux ressources et peut favoriser le développement de l'exploitation minière artisanale, mais elle peut également accroître les risques de dégradation des sols, de perturbation des cours d'eau et de pression sur les ressources naturelles. La carte permet ainsi d'identifier les secteurs prioritaires pour l'analyse intégrée des enjeux économiques, sociaux et environnementaux liés à l'activité minière artisanale dans le district de Betafo.

3.1.2 Organisation spatiale des potentiels miniers dans le district de Betafo

La figure 2 présente la distribution des potentiels miniers par commune à travers leur nombre, leur diversité, leur densité et leur degré de concentration spatiale. Ces indicateurs permettent d'identifier les communes où les enjeux liés à une éventuelle exploitation minière artisanale sont les plus importants.

Figure 2: Organisation spatiale des potentiels miniers dans le district de Betafo



Source : Auteur 2026

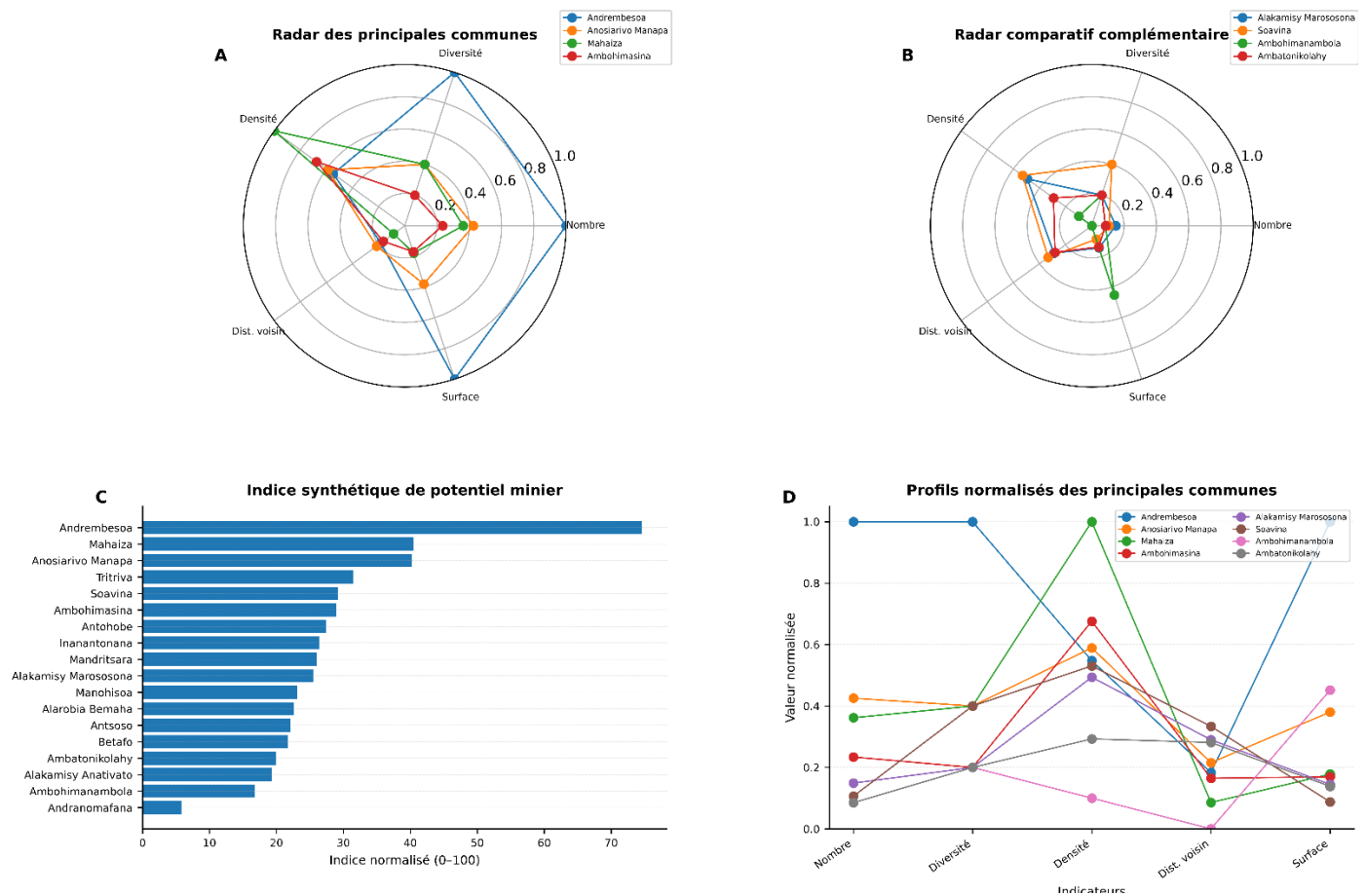
Interprétation

L'analyse met en évidence de fortes disparités entre les communes. Andrembesoa concentre 47 des 127 entités recensées, soit environ 37 % du total, devant Anosiario Manapa avec 20 entités, Mahaiza avec 17 et Ambohimasina avec 11. Andrembesoa présente également la plus forte diversité avec 5 catégories de potentiel, tandis que Soavina, Anosiario Manapa, Mahaiza et Betafo en comptent 2. En termes de densité, Mahaiza se distingue avec environ 7,1 entités pour 100 km², suivie d'Ambohimasina avec près de 4,8 entités pour 100 km². La distance au plus proche voisin montre par ailleurs une forte concentration des occurrences à Ambohimambola, Mahaiza et Betafo, où les distances moyennes sont inférieures à environ 1,5 km, contrairement à Tritriva et Inanantonana où elles dépassent 6 km, traduisant une répartition plus dispersée. Ainsi, Andrembesoa, Mahaiza, Anosiario Manapa et Ambohimasina apparaissent comme les principales communes à potentiel minier, justifiant une attention particulière dans l'évaluation des impacts socio-économiques et environnementaux de l'exploitation artisanale.

3.1.3 Synthèse multivariée et hiérarchisation du potentiel minier

La figure 3 synthétise les principaux indicateurs spatiaux du potentiel minier des communes de Betafo à partir du nombre d'occurrences, de la diversité, de la densité, de la distance au plus proche voisin et de la superficie. Les profils normalisés permettent ainsi de comparer les communes et d'établir un indice synthétique de potentiel minier.

Figure 3: Synthèse multivariée et hiérarchisation du potentiel minier



Source : Auteur 2026

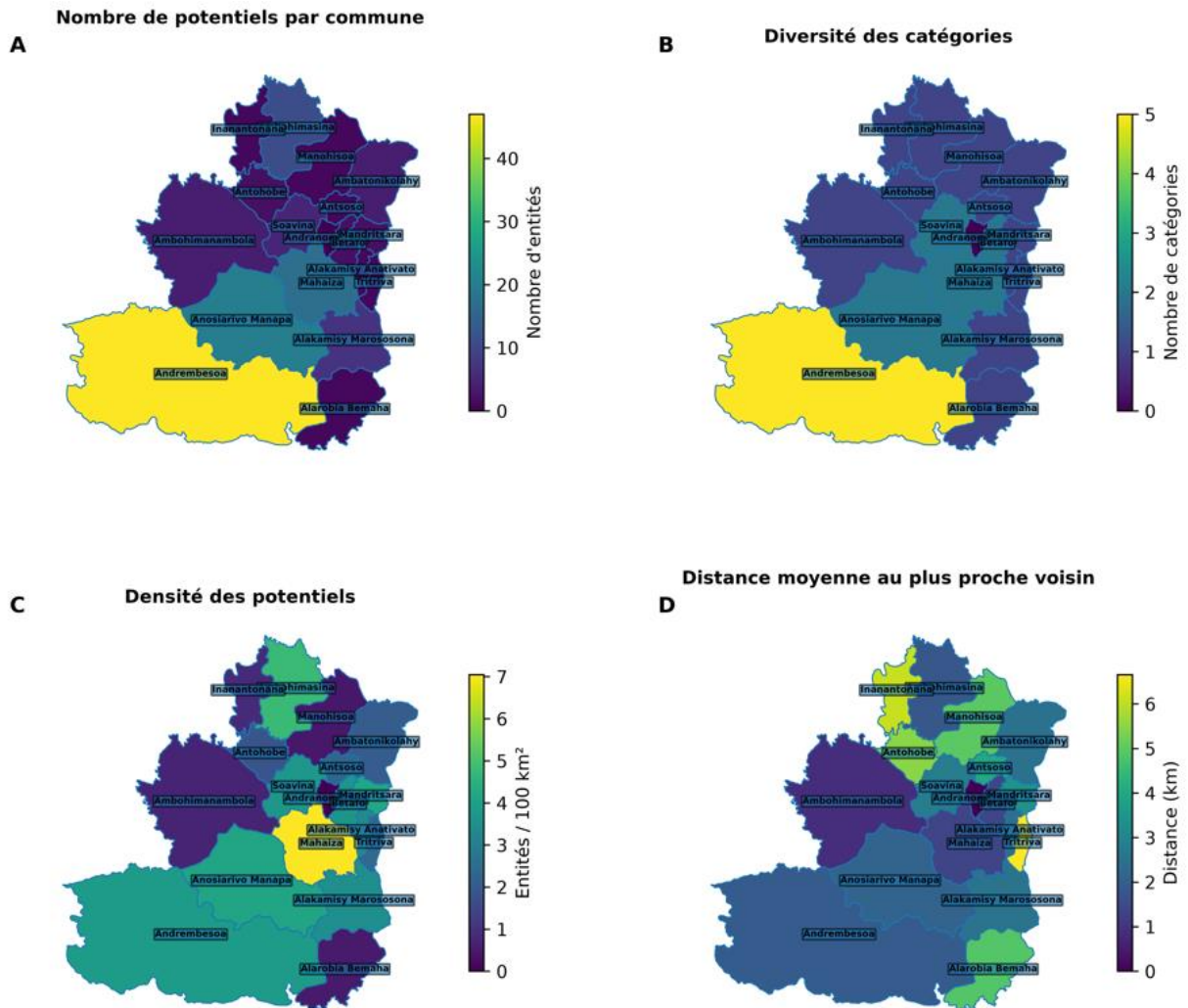
Interprétation

Les résultats montrent une nette prédominance d'Andrembesoa, avec un indice synthétique d'environ 74/100, largement supérieur à ceux de Mahaiza et Anosiario Manapa, proches de 40/100. Andrembesoa se distingue principalement par le nombre et la diversité des potentiels ainsi que par sa superficie, tandis que Mahaiza présente la densité relative la plus élevée. Tritriva et Soavina occupent une position intermédiaire, avec des indices proches de 30/100, alors qu'Andranomafana présente la valeur la plus faible, inférieure à 10/100. Cette analyse multivariée confirme donc une forte différenciation spatiale du potentiel minier et permet d'identifier Andrembesoa, Mahaiza et Anosiario Manapa comme des communes prioritaires pour l'évaluation approfondie des enjeux socio-économiques et environnementaux associés à l'exploitation minière artisanale.

3.1.4 Distribution spatiale des indicateurs de potentiel minier par commune

La figure 4 présente la répartition spatiale du potentiel minier selon quatre indicateurs complémentaires : le nombre d'entités recensées, la diversité des catégories, la densité des potentiels et la distance moyenne au plus proche voisin. Cette représentation permet de visualiser les principaux contrastes entre les communes du district de Betafo.

Figure 4: Distribution spatiale des indicateurs de potentiel minier par commune



Source : Auteur 2026

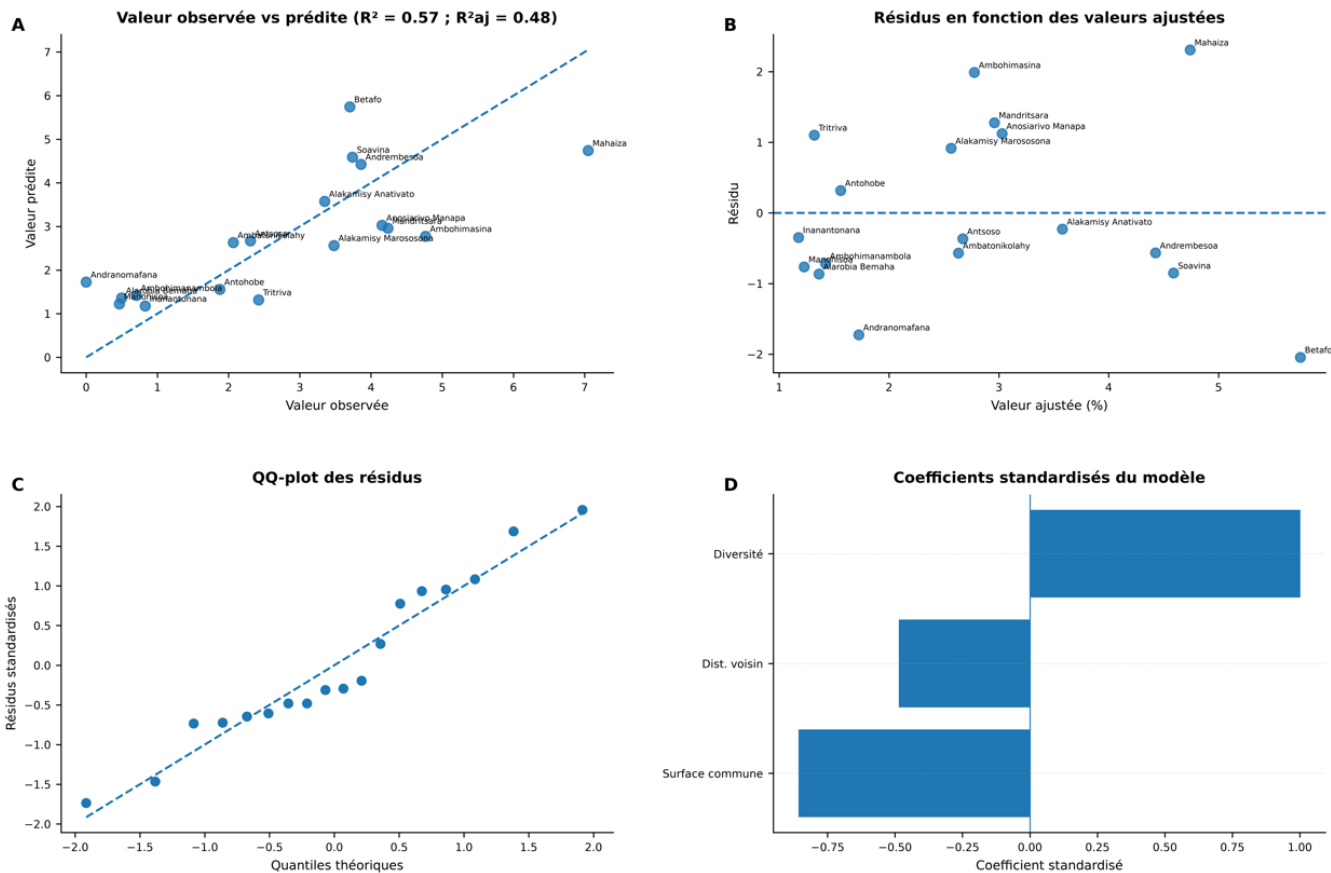
Interprétation

La cartographie montre une forte concentration du potentiel dans certaines communes. Andrembesoa domine avec 47 entités et 5 catégories de potentiel, suivie d'Anosiarivo Manapa (20 entités), de Mahaiza (17) et d'Ambohimasina (11). Cependant, la densité la plus élevée est observée à Mahaiza, avec environ 7,1 entités/100 km², indiquant une forte concentration des occurrences sur une superficie relativement réduite. La distance au plus proche voisin confirme cette organisation : les faibles valeurs observées notamment à Ambohimanambola, Mahaiza et Betafo traduisent des potentiels spatialement regroupés, tandis que les valeurs supérieures à 6 km à Tritriva et Inanantonana indiquent une distribution plus dispersée. Ces contrastes spatiaux permettent ainsi d'identifier les communes où les activités minières artisanales pourraient exercer les pressions socio-économiques et environnementales les plus importantes.

3.1.5 Diagnostic du modèle de régression expliquant la densité des potentiels miniers par commune

La figure 5 présente les performances et les diagnostics du modèle de régression utilisé pour expliquer la densité communale des potentiels miniers à partir de la diversité des catégories, de la distance au plus proche voisin et de la superficie communale. La comparaison entre valeurs observées et prédites permet d'évaluer la capacité explicative du modèle, tandis que l'analyse des résidus et des coefficients précise l'influence des différents facteurs.

Figure 5: Diagnostic du modèle de régression expliquant la densité des potentiels miniers par commune



Source : Auteur 2026

Interprétation

Le modèle présente un R^2 de 0,57 et un R^2 ajusté de 0,48, indiquant qu'environ 57 % de la variation de la densité minière entre les communes est expliquée par les variables retenues. La diversité des catégories minières exerce l'effet positif le plus important, avec un coefficient standardisé proche de +1,0 : une plus grande diversité est donc associée à une densité minière plus élevée. À l'inverse, la superficie communale présente un effet négatif marqué, proche de -0,85, et la distance au plus proche voisin un effet négatif d'environ -0,50, traduisant une densité plus élevée lorsque les occurrences sont spatialement rapprochées. Les résidus sont globalement distribués autour de zéro et le QQ-plot montre une normalité approximativement satisfaisante, bien que certaines communes, notamment Mahaiza, Ambohimasina et Betafo, présentent des écarts plus importants entre valeurs observées et prédites. Le modèle fournit ainsi une explication modérée mais pertinente de l'organisation spatiale des potentiels miniers, tout en indiquant que d'autres facteurs socio-économiques, géologiques ou environnementaux doivent être intégrés pour améliorer la modélisation.

3.2 Discussions

Les résultats mettent en évidence une forte hétérogénéité spatiale du potentiel minier dans le district de Betafo. La concentration des occurrences dans certaines communes, notamment Andrembesoa, Mahaiza et Anosiarivo Manapa, montre que le potentiel minier n'est pas réparti de manière uniforme. Cette organisation traduit l'influence combinée de la géologie locale, de la superficie communale et de la proximité spatiale des occurrences. La hiérarchisation multivariée confirme la position dominante d'Andrembesoa, caractérisée par un nombre élevé d'entités et une forte diversité des catégories minières. À l'inverse, Mahaiza se distingue surtout par une densité élevée, ce qui indique une concentration importante du potentiel sur un espace plus restreint. Ces différences montrent qu'un indicateur unique ne suffit pas à caractériser correctement le potentiel minier d'une commune. Le modèle de régression, avec un R^2 de 0,57, fournit une capacité explicative modérée. La diversité apparaît comme un facteur positif majeur, tandis que la superficie et la distance au plus proche voisin ont une influence négative sur la densité. Ces résultats confirment l'intérêt d'une approche intégrée combinant analyse spatiale, indicateurs synthétiques et modélisation statistique pour identifier les zones prioritaires dans l'étude des impacts de l'exploitation minière artisanale.

4 Conclusion

La modélisation et la hiérarchisation spatiale du potentiel minier montrent une répartition inégale des ressources dans le district de Betafo. Les communes d'Andrembesoa, Mahaiza et Anosiarivo Manapa se distinguent par leur importance en termes de nombre, de diversité ou de densité des occurrences minières. L'indice synthétique et le modèle de régression confirment que la diversité des potentiels, leur concentration spatiale et la superficie communale jouent un rôle déterminant dans cette organisation. Ces résultats permettent ainsi d'identifier les communes prioritaires et constituent une base objective pour approfondir l'évaluation des impacts socio-économiques et environnementaux de l'exploitation minière artisanale dans le district de Betafo.

REFERENCES

- [1] Canavesio, R. (2014). Formal mining investments and artisanal mining in southern Madagascar: Effects of spontaneous reactions and adjustment policies on poverty alleviation. *Land Use Policy*, 36, 145–154. DOI: 10.1016/j.landusepol.2013.08.001.
- [2] Werner, T. T., Bebbington, A., & Gregory, G. (2019). Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*, 6(3), 993–1012. DOI: 10.1016/j.exis.2019.06.011.
- [3] Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. DOI: 10.1080/13658810600661508.
- [4] Yousefi, M., & Carranza, E. J. M. (2015). Geometric average of spatial evidence data layers: A GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping. *Computers & Geosciences*, 83, 72–79. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.07.006.
- [5] Nursamsi, I., Phinn, S. R., Levin, N., Luskin, M. S., & Sonter, L. J. (2024). Remote sensing of artisanal and small-scale mining: A review of scalable mapping approaches. *Science of the Total Environment*, 951, 175761. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175761.
- [6] FTM – Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara. (2023). Madagascar Report by FTM. Institut Géographique et Hydrographique National de Madagascar.
- [7] Bureau du Cadastre Minier de Madagascar – BCM. Cartographie, données et requêtes sur les permis miniers à Madagascar. BCM, Antananarivo.
- [8] Préfecture de Betafo. Documents administratifs, données socio-économiques et fiches d'enquête relatives aux activités minières dans le district de Betafo. Source institutionnelle non publiée.
- [9] The Pandas Development Team. (2020). pandas-dev/pandas: Pandas. Zenodo. DOI : 10.5281/zenodo.3509134.
- [10] Jordahl, K., Van den Bossche, J., Fleischmann, M., et al. (2020). geopandas/geopandas: v0.8.1. Zenodo. DOI : 10.5281/zenodo.3946761.
- [11] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. DOI : 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [12] Bowen, G. A. (2009). Document Analysis as a Qualitative Research Method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27–40. DOI : 10.3316/QRJ0902027.
- [13] Clark, P. J., & Evans, F. C. (1954). Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations. *Ecology*, 35(4), 445–453. DOI : 10.2307/1931034.
- [14] Greco, S., Ishizaka, A., Tasiou, M., & Torrisi, G. (2019). On the Methodological Framework of Composite Indices: A Review of the Issues of Weighting, Aggregation, and Robustness. *Social Indicators Research*, 141, 61–94. DOI : 10.1007/s11205-017-1832-9.
- [15] Belsley, D. A., Kuh, E., & Welsch, R. E. (1980). *Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. Wiley. DOI : 10.1002/0471725153.