

Modélisation Géospatiale Et Multicritère Du Potentiel Minier Et De Ses Déterminants Territoriaux Dans La Région D'ihorombe A Madagascar

RAHARISON Harimalala Marie Elie^{1,1}, RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa^{1,2}, RAZAFIARISERA RALAY TIANA^{1,3}, RASOLOMANANA Eddy Harilala^{1,4}

^{1,2,3,4}Université d'Antananarivo

Corresponding Author: RAHARISON Harimalala Marie Elie



Résumé : La région d'Ihorombe présente une forte diversité géologique et minérale, mais l'organisation spatiale de ce potentiel demeure insuffisamment caractérisée au regard de l'accessibilité routière, du réseau hydrographique et des contrastes territoriaux. Cette étude vise à modéliser, à l'échelle communale, la distribution du potentiel minier et à identifier ses principaux déterminants spatiaux par une approche géomatique et multicritère. L'analyse combine 168 tronçons routiers, 4 664 éléments hydrographiques et plus de trente catégories de substances minérales, puis mobilise la standardisation des variables, l'analyse en composantes principales, la classification hiérarchique et un indice multicritère exploratoire. Les deux premiers axes de l'ACP expliquent 70,6 % de la variance totale, dont 44,9 % pour l'axe 1 et 25,7 % pour l'axe 2. Trois groupes territoriaux distincts sont mis en évidence. Ihosy obtient le score multicritère le plus élevé, proche de 0,75, devant Ankily (0,62), Maropaika (0,57) et Ranohira (0,55). La densité routière est positivement corrélée à la densité minière selon Pearson ($r = 0,69$; $p = 8,24 \times 10^{-5}$), tandis que Spearman indique une relation non significative ($\rho = 0,12$; $p = 0,565$), soulignant l'influence de quelques unités extrêmes. Ces résultats fournissent une base d'aide à la prospection et à la planification territoriale.

Mots-clés : modélisation géospatiale ; potentiel minier ; analyse multicritère ; accessibilité routière ; Ihorombe.

Abstract: The Ihorombe Region is characterized by substantial geological and mineral diversity, yet the spatial organization of this potential remains insufficiently documented in relation to road accessibility, hydrographic networks, and territorial disparities. This study aims to model mineral potential at the municipal level and identify its main spatial determinants through an integrated geospatial and multicriteria approach. The analysis combines 168 road segments, 4,664 hydrographic features, and more than thirty categories of mineral substances. The methodological framework includes variable standardization, principal component analysis, hierarchical clustering, and the construction of an exploratory multicriteria index. The first two principal components explain 70.6% of the total variance, with 44.9% attributed to PC1 and 25.7% to PC2. Three distinct territorial groups are identified. Ihosy records the highest multicriteria score, approximately 0.75, followed by Ankily (0.62), Maropaika (0.57), and Ranohira (0.55). Road density is positively and significantly correlated with mining density according to Pearson's coefficient ($r = 0.69$; $p = 8.24 \times 10^{-5}$), whereas Spearman's coefficient indicates a weak and non-significant monotonic relationship ($\rho = 0.12$; $p = 0.565$), suggesting the influence of several extreme territorial units. These findings provide a decision-support basis for mineral exploration and territorial planning.

Keywords: geospatial modelling; mineral potential; multicriteria analysis; road accessibility; Ihorombe.

1. INTRODUCTION

Madagascar possède un socle précambrien complexe, marqué par plusieurs épisodes de métamorphisme, de magmatisme et de déformation, favorisant une grande diversité de minéralisations métalliques, industrielles et gemmifères [1]. Cette richesse

confère au secteur minier une importance économique majeure, bien que son développement reste limité par l'insuffisance des connaissances territoriales, l'inégale accessibilité des sites et les contraintes environnementales [2], [3]. Dans la région d'Ihorombe, les occurrences minières présentent une distribution hétérogène susceptible de dépendre des structures géologiques, du réseau hydrographique et de l'accessibilité routière. Toutefois, les zones les mieux desservies peuvent être davantage prospectées, créant un biais dans la répartition des indices recensés. La proximité des cours d'eau représente également un avantage opérationnel, mais constitue une source potentielle de risques d'érosion, de sédimentation et de pollution. La problématique consiste donc à déterminer dans quelle mesure la distribution du potentiel minier est associée aux caractéristiques hydrographiques, routières et territoriales. Les systèmes d'information géographique et l'analyse multicritère permettent d'intégrer ces différents facteurs et de hiérarchiser les unités spatiales [4], [5]. L'analyse en composantes principales complète cette démarche en réduisant la redondance entre variables et en identifiant les principaux gradients territoriaux [6]. L'objectif est ainsi de modéliser le potentiel minier d'Ihorombe, d'établir une typologie communale et d'identifier les zones prioritaires pour des investigations géologiques approfondies.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude a mobilisé quatre couches vectorielles représentant les limites administratives, les occurrences minières, les routes et les rivières de la région d'Ihorombe. Les traitements ont été réalisés sous Python avec GeoPandas, Pandas, NumPy, SciPy et Matplotlib [7]. Les données ont été vérifiées, corrigées, découpées selon la limite régionale puis projetées dans le système WGS 84/UTM zone 38 Sud, adapté aux calculs métriques à Madagascar [8]. Les communes ont constitué les unités d'analyse. Pour chacune, la densité et l'emprise minières, la diversité des substances selon l'indice de Shannon, les densités routière et hydrographique ainsi que la proximité des occurrences aux routes et aux rivières ont été calculées [9]. Les valeurs manquantes ont été remplacées par la médiane, puis les variables ont été standardisées. L'analyse en composantes principales a servi à réduire la redondance et à identifier les principaux gradients territoriaux [10]. Une classification hiérarchique de Ward a regroupé les communes selon leurs profils [11]. Un indice exploratoire a ensuite été établi par normalisation et pondération égale des critères. Enfin, les relations entre accessibilité routière et densité minière ont été évaluées au moyen des corrélations de Pearson et de Spearman [12], [13]. Cette démarche correspond au modèle analytique programmé pour l'étude.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Organisation hydrographique et accessibilité routière des zones à intérêt géologique et minier dans la région d'Ihorombe

La figure ci-dessous présente la répartition spatiale du réseau routier et du réseau hydrographique dans la région d'Ihorombe, à partir de 168 tronçons routiers et de 4 664 éléments hydrographiques, superposés aux limites communales, district et régionales.

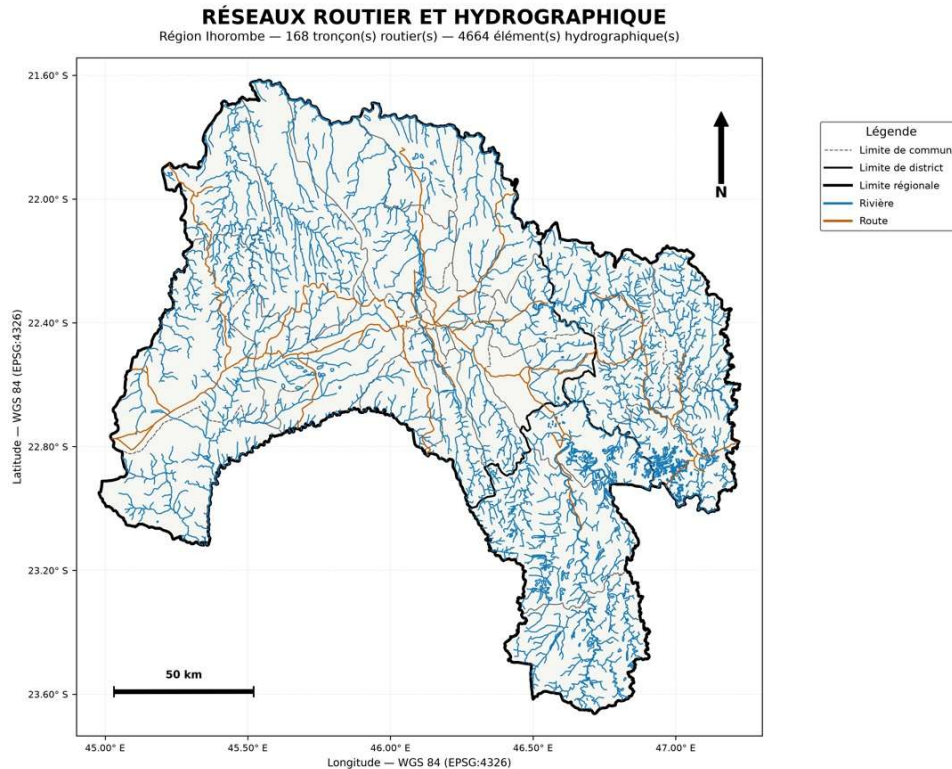


Figure 1: Organisation hydrographique et accessibilité routière des zones à intérêt géologique et minier dans la région d'Ihorombe

Source : Auteur

Interprétation

L'analyse cartographique met en évidence un réseau hydrographique très développé, particulièrement dense dans les parties orientale, sud-orientale et centrale de la région, tandis que certains secteurs occidentaux présentent un drainage plus espacé. Cette organisation peut traduire l'influence combinée du relief, de la fracturation et de la nature des formations géologiques sur l'écoulement des eaux de surface, sans toutefois permettre, à elle seule, d'identifier précisément les unités lithologiques. Le réseau routier apparaît nettement moins dense que le réseau hydrographique et se concentre principalement le long de quelques axes traversant les secteurs centraux et occidentaux. Cette configuration favorise l'accessibilité de certaines zones d'exploration, mais peut limiter les opérations de reconnaissance, de transport et d'exploitation dans les secteurs périphériques, notamment au sud et à l'est. La proximité des cours d'eau peut constituer un avantage pour l'approvisionnement en eau des activités minières, mais elle représente également une contrainte environnementale importante en raison des risques d'érosion, de sédimentation et de contamination. Cette figure constitue ainsi une base spatiale essentielle pour croiser ultérieurement l'accessibilité routière, les caractéristiques géologiques, les indices miniers et les contraintes hydrologiques.

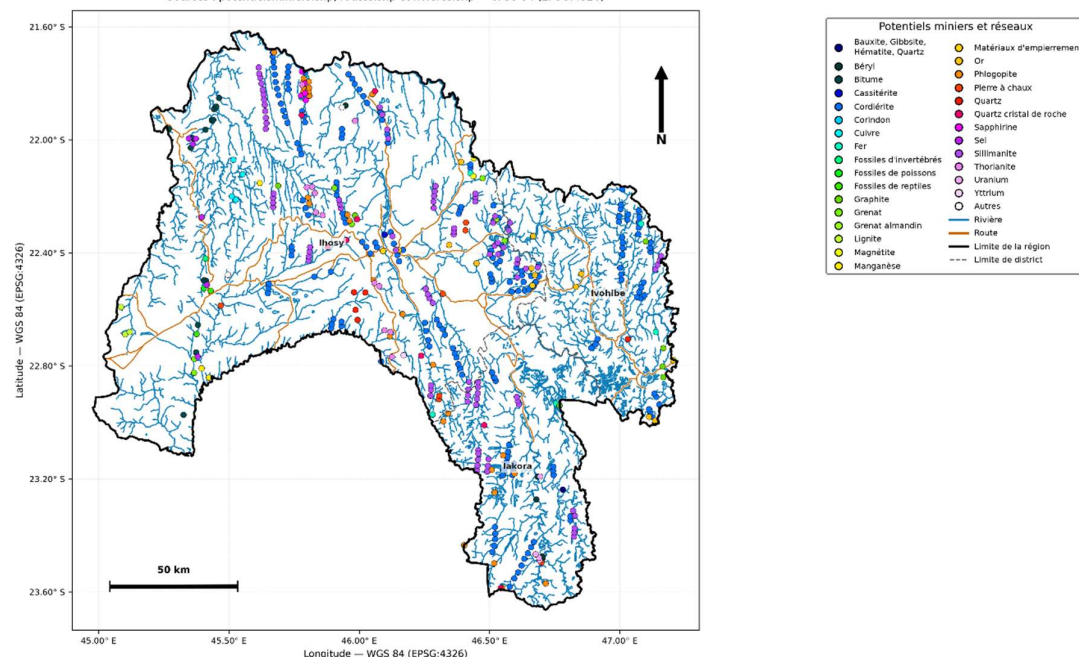
3.2 Répartition spatiale du potentiel minier et relations avec les réseaux hydrographique et routier

La figure suivante présente la distribution des indices et occurrences de potentiel minier dans les trois districts d'Ihosy, d'Ivohibe et d'Iakora, en les mettant en relation avec le réseau hydrographique, les infrastructures routières et les limites administratives de la région d'Ihorombe. Elle couvre approximativement l'espace compris entre 45,0° et 47,2° de longitude Est et entre 21,6° et

23,6° de latitude Sud, avec une échelle graphique de 50 km, et distingue plus de trente catégories de substances et matériaux minéraux.

CARTE DU POTENTIEL MINIER, DES ROUTES ET DES RIVIÈRES — IHOROMBE

Sources : potentielsminiers.shp, routes.shp et rivières.shp — WGS 84 (EPSG:4326)



Sources : potentiels miniers, routes, rivières et limites administratives. La carte représente les objets présents dans les couches sources ; elle ne constitue pas une estimation de réserves certifiées.

Figure 2: Répartition spatiale du potentiel minier et relations avec les réseaux hydrographique et routier

Source : Auteur

Interprétation

La répartition des occurrences minières apparaît spatialement hétérogène, avec des concentrations marquées dans les secteurs nord, centre-est et sud de la région, tandis que certaines zones occidentales présentent une densité plus faible. Les indices se regroupent notamment autour des espaces traversés par les principaux axes routiers et à proximité de nombreux cours d'eau, ce qui suggère une accessibilité relativement favorable pour certaines zones de prospection, en particulier autour d'Ihoso et dans la partie orientale vers Ivohibe. Le district d'Iakora présente également plusieurs alignements d'occurrences dans sa partie méridionale, mais son accessibilité routière demeure plus limitée. La diversité observée, comprenant notamment le quartz, l'or, le graphite, la magnétite, le manganèse, la cassitérite, le béryl, le cuivre, le fer, l'uranium et plusieurs minéraux métamorphiques, traduit une importante variété du potentiel géologique régional. La proximité de certaines occurrences avec les rivières peut faciliter l'approvisionnement en eau des activités d'exploration, mais elle constitue simultanément un facteur de sensibilité environnementale en raison des risques d'érosion, de transport de sédiments et de contamination des eaux. Ces résultats décrivent uniquement la localisation des objets recensés dans les couches géographiques et ne constituent pas une estimation des volumes, de la teneur ou des réserves minières économiquement exploitables.

3.3 Diagnostic multicritère du potentiel minier, classement territorial et influence de l'accessibilité routière

La figure suivante synthétise la distribution des indicateurs standardisés, les profils multicritères des unités administratives prioritaires, leur classement selon un indice exploratoire compris entre 0 et 1, ainsi que la relation statistique entre la densité routière et la densité des occurrences minières dans la région d'Ihorombe.

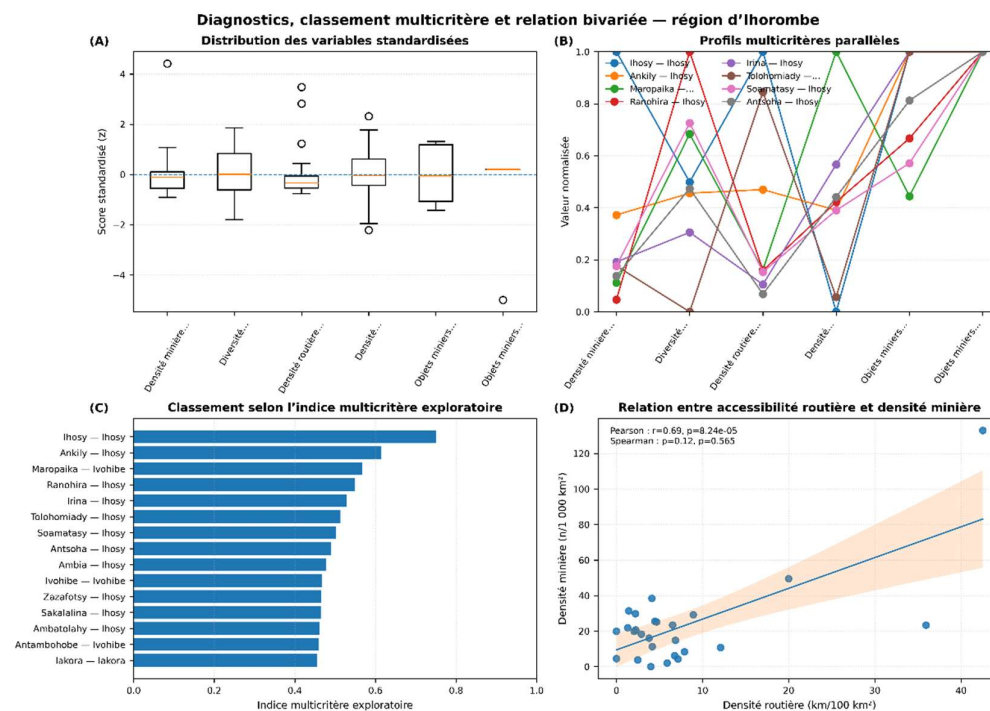


Figure 3: Diagnostic multicritère du potentiel minier, classement territorial et influence de l'accessibilité routière

Source : Auteur

Interprétation

Les distributions standardisées révèlent une forte hétérogénéité territoriale, avec des valeurs extrêmes dépassant $z=4$ pour la densité minière, environ $z=3,5$ pour certains indicateurs d'accessibilité et une valeur inférieure à $z=-5$ pour l'un des critères de proximité des objets miniers. Les profils parallèles confirment que les communes les mieux classées ne présentent pas une supériorité uniforme sur tous les critères, mais des combinaisons différenciées de densité minière, de diversité minérale, de densité routière et de proximité aux réseaux. La commune d'Ihoso occupe le premier rang avec un indice multicritère d'environ 0,75, suivie d'Ankily avec près de 0,62, de Maropaika avec environ 0,57 et de Ranohira avec près de 0,55. Irina, Tolohomiady et Soamatasy présentent des scores intermédiaires compris approximativement entre 0,50 et 0,53, tandis que les unités situées au bas du classement conservent des indices voisins de 0,45 à 0,47. La relation bivariable indique une corrélation linéaire positive et statistiquement significative entre la densité routière et la densité minière, avec un coefficient de Pearson de $r=0,69$ et une probabilité $p=8,24 \times 10^{-5}$. Toutefois, la corrélation de rang de Spearman demeure faible et non significative, avec $\rho=0,12$ et $p=0,565$, ce qui suggère que la relation observée est fortement influencée par quelques unités présentant des densités routières et minières particulièrement élevées. L'accessibilité routière apparaît ainsi comme un facteur associé à la distribution des occurrences recensées, sans pouvoir être considérée, à elle seule, comme un déterminant direct du potentiel géologique ou de l'exploitabilité minière.

3.4 Typologie multicritère des unités communales selon le potentiel minier et l'accessibilité spatiale

La figure ci-après présente les profils normalisés des unités les mieux classées, la distribution des critères standardisés, la classification hiérarchique de Ward et la projection des communes sur le plan factoriel de l'analyse en composantes principales, afin d'identifier les principales formes d'organisation territoriale du potentiel minier régional.

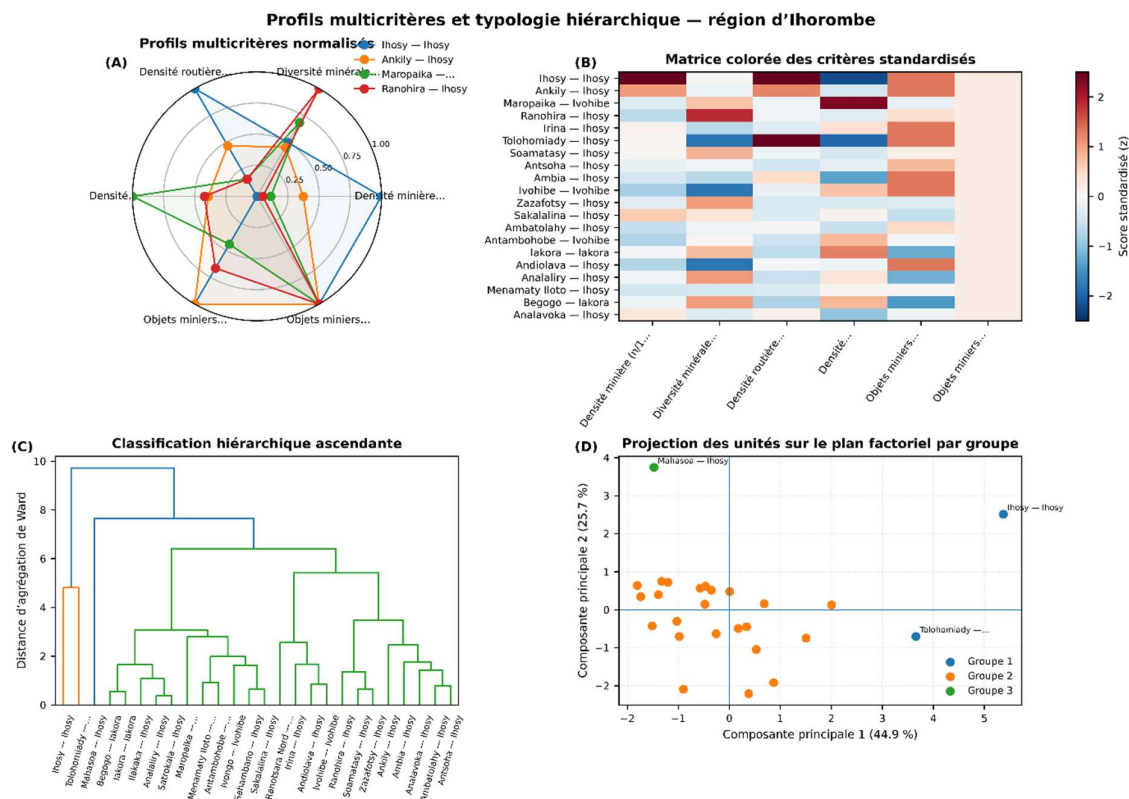


Figure 4: Typologie multicritère des unités communales selon le potentiel minier et l'accessibilité spatiale

Source : Auteur

Interprétation

Les profils radar montrent que les unités prioritaires ne possèdent pas les mêmes avantages comparatifs. Ihoso se caractérise par des valeurs normalisées proches de 1 pour la densité minière, la densité routière et certains indicateurs de proximité des objets miniers, tandis qu'Ankily présente un profil plus équilibré, avec des valeurs généralement comprises entre 0,35 et 1. Maropaika se distingue surtout par une forte densité hydrographique, proche de 1, et une diversité minière relativement élevée, voisine de 0,70, alors que Ranohira atteint la valeur maximale pour la diversité minière. La matrice colorée confirme cette forte différenciation spatiale, avec des scores standardisés variant approximativement de $z = -2,5$ à $z = +2,5$, notamment pour la densité minière, la diversité minière, la densité routière et la proximité des occurrences aux réseaux. La classification hiérarchique distingue trois ensembles principaux. Le premier groupe réunit Ihoso et Tolohomiady, dont les profils s'écartent fortement de ceux des autres unités et ne rejoignent l'ensemble principal qu'à une distance d'agrégation de Ward proche de 9,7. Le deuxième groupe rassemble la majorité des communes, caractérisées par des profils intermédiaires et relativement proches. Le troisième groupe est représenté par Mahaso, qui constitue une unité atypique principalement différenciée par les variables associées au deuxième axe factoriel.

La projection ACP confirme cette structuration : la première composante explique 44,9 % de la variance et la deuxième 25,7 %, soit une variance cumulée de 70,6 %. Ihosy et Tolohomiady se situent à l'extrémité positive de l'axe 1, tandis que Mahasoa présente une position très élevée sur l'axe 2, ce qui traduit des combinaisons de critères nettement distinctes. Cette typologie permet ainsi d'identifier des territoires à fort potentiel apparent, des unités à profil intermédiaire et des communes atypiques nécessitant des analyses géologiques, environnementales et économiques plus approfondies.

4. DISCUSSION

Les résultats montrent une forte hétérogénéité spatiale du potentiel minier dans la région d'Ihorombe. Les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales expliquent 70,6 % de la variance totale, ce qui indique que la densité des occurrences minières, la diversité des substances, l'accessibilité routière et les caractéristiques hydrographiques contribuent fortement à la différenciation des communes. La classification hiérarchique distingue trois groupes territoriaux, tandis que l'indice multicritère place Ihosy au premier rang avec un score d'environ 0,75, devant Ankily (0,62), Maropaika (0,57) et Ranohira (0,55). La densité routière présente une corrélation positive et significative avec la densité minière selon Pearson ($r=0,69$; $p=8,24 \times 10^{-5}$). Toutefois, la faible corrélation de Spearman ($\rho=0,12$; $p=0,565$) suggère que cette relation est influencée par quelques communes atypiques. L'accessibilité routière peut donc favoriser la prospection et le recensement des occurrences sans constituer un facteur géologique direct. La proximité des rivières peut également faciliter certaines activités minières, tout en augmentant les risques d'érosion, de sédimentation et de pollution. Ces résultats constituent ainsi un outil de présélection territoriale, mais ne permettent pas d'estimer les réserves, les teneurs ni la rentabilité économique des ressources.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de modéliser la répartition spatiale du potentiel minier de la région d'Ihorombe en intégrant les occurrences minérales, l'accessibilité routière et les caractéristiques hydrographiques. Les résultats montrent une forte différenciation territoriale, avec trois groupes communaux distincts et une position prioritaire d'Ihosy, suivie d'Ankily, Maropaika et Ranohira. La relation observée entre densité routière et densité minière indique que l'accessibilité peut favoriser la prospection et le recensement des occurrences, sans déterminer directement le potentiel géologique. Cette modélisation constitue donc un outil d'orientation pour la planification des campagnes de reconnaissance et la sélection des zones prioritaires. Elle devra être complétée par des études géologiques de terrain, des analyses géochimiques et une évaluation environnementale avant toute décision d'exploitation.

REFERENCES

- [1] Tucker, R. D., Roig, J.-Y., Moine, B., Delor, C. et Peters, S. G. (2014). A geological synthesis of the Precambrian shield in Madagascar. *Journal of African Earth Sciences*, 94, 9–30. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2014.02.001.
- [2] Bureau de recherches géologiques et minières — BRGM (2012). A geological and mining synthesis for Madagascar. *Projet de synthèse géologique et métallogénique de Madagascar à l'échelle 1:1 000 000*.
- [3] ITIE Madagascar (2024). *Rapport ITIE Madagascar 2022. Initiative pour la transparence dans les industries extractives*, Antananarivo.
- [4] Sun, T., Chen, F., Zhong, L., Liu, W. et Wang, Y. (2019). GIS-based mineral prospectivity mapping using machine learning methods: A case study from Tongling ore district, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 109, 26–49. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.04.003.
- [5] 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.
- [6] Gewers, F. L., Ferreira, G. R., Arruda, H. F., Silva, F. N., Comin, C. H., Amancio, D. R. et Costa, L. F. (2021). Principal component analysis: A natural approach to data exploration. *ACM Computing Surveys*, 54(4), 1–34. DOI: 10.1145/3447755.

-
- [7] Jordahl, K., Van den Bossche, J., Fleischmann, M., et al. (2020). GeoPandas: Python tools for geographic data. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3946761>.
- [8] EPSG Geodetic Parameter Dataset (2022). WGS 84/UTM zone 38S — EPSG:32738.
- [9] Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 27, 379–423 et 623–656.
- [10] Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 374, 20150202.
- [11] Ward, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. Journal of the American Statistical Association, 58, 236–244.
- [12] Pearson, K. (1895). Note on regression and inheritance in the case of two parents. Proceedings of the Royal Society of London, 58, 240–242.
- [13] Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. American Journal of Psychology, 15, 72–101.