

Analyse Multicritère Et Priorisation Spatiale Du Potentiel Minier Dans La Région Melaky, Madagascar

RAVELONIRINA Harimbola Sahondra¹, TOVONIRINA Mamiharizo Jackie¹, RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa¹, RAJAONARISON Eddie Franck¹

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université Antananarivo

Auteur Correspondant : RAVELONIRINA Harimbola Sahondra



Resume : Cette étude propose une analyse multicritère et une priorisation spatiale du potentiel minier dans la région Melaky, Madagascar, à partir de critères géologiques, d'accessibilité, de concentration des occurrences, d'éloignement des habitations et de protection hydrographique. Les critères ont été normalisés entre 0 et 1 puis intégrés dans un indice MCDA destiné à hiérarchiser les sites. Les meilleurs scores sont obtenus par MEL_0081 (0,72), MEL_0082 (0,71), MEL_0061 (0,68) et MEL_0053 (0,66). L'analyse multivariée montre que l'indice MCDA est principalement corrélé à la concentration spatiale des occurrences ($r = 0,74$), à l'accessibilité routière ($r = 0,57$) et à la favorabilité géologique ($r = 0,50$), tandis que la distance aux routes présente une relation négative ($r = -0,59$). Les deux premières composantes principales expliquent 54,9 % de la variance totale. Une analyse de robustesse fondée sur 3 000 simulations de Monte-Carlo confirme la stabilité des sites prioritaires, MEL_0081 appartenant au groupe des 16 meilleurs dans 99 % des simulations, contre 98 % pour MEL_0082, 94 % pour MEL_0061 et 91 % pour MEL_0053. L'approche fournit ainsi un outil exploratoire reproductible de présélection spatiale pour l'exploration minière.

Mots-clés : analyse multicritère ; potentiel minier ; MCDA ; priorisation spatiale ; Melaky.

Abstract: This study proposes a multicriteria analysis and spatial prioritization of mineral potential in the Melaky Region, Madagascar, based on geological, accessibility, mineral occurrence concentration, distance from settlements, and hydrographic protection criteria. The criteria were normalized between 0 and 1 and integrated into a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) index designed to rank candidate sites. The highest scores were obtained by MEL_0081 (0.72), MEL_0082 (0.71), MEL_0061 (0.68), and MEL_0053 (0.66). Multivariate analysis shows that the MCDA index is primarily correlated with the spatial concentration of mineral occurrences ($r = 0.74$), road accessibility ($r = 0.57$), and geological favorability ($r = 0.50$), whereas distance to roads exhibits a negative relationship ($r = -0.59$). The first two principal components account for 54.9% of the total variance. A robustness analysis based on 3,000 Monte Carlo simulations confirms the stability of the priority sites, with MEL_0081 ranking among the top 16 sites in 99% of the simulations, compared with 98% for MEL_0082, 94% for MEL_0061, and 91% for MEL_0053. The approach therefore provides a reproducible exploratory spatial screening tool for mineral exploration.

Keywords: multicriteria analysis; mineral potential; MCDA; spatial prioritization; Melaky.

1. INTRODUCTION

Madagascar possède une diversité géologique et métallogénique importante, associée à de nombreuses substances métalliques, minéraux industriels et ressources gemmologiques. La synthèse géologique et minière réalisée à l'échelle nationale a notamment permis de structurer ces connaissances sous forme de cartes géologiques, métallogéniques et de bases de données numériques intégrables dans les systèmes d'information géographique [1]. Dans ce contexte, la région Melaky constitue un territoire d'intérêt pour l'exploration minière, mais la distribution des occurrences connues y demeure spatialement hétérogène. L'identification des secteurs prioritaires nécessite donc une méthode capable d'intégrer simultanément les caractéristiques géologiques, l'accessibilité,

la concentration des occurrences et certaines contraintes territoriales et environnementales. Les systèmes d'information géographique constituent un cadre privilégié pour ce type d'évaluation, car ils permettent de combiner des informations provenant de sources et d'échelles différentes, puis de produire des cartes dérivées utilisables pour l'aide à la décision. Dans le domaine des géosciences, l'intégration spatiale de plusieurs couches d'information constitue l'un des fondements de la cartographie du potentiel minéral et de la délimitation des zones d'intérêt pour l'exploration [2]. Toutefois, la sélection d'un site minier potentiel ne dépend généralement pas d'un facteur unique, mais d'un ensemble de critères pouvant présenter des niveaux d'importance différents. L'analyse multicritère spatiale offre une réponse adaptée à cette problématique en permettant de normaliser, pondérer et agréger plusieurs critères dans un indice synthétique de décision. Son intégration au SIG facilite ainsi la comparaison d'alternatives spatiales et la hiérarchisation de zones selon des objectifs définis [3]. Dans le contexte de la prospectivité minérale, les approches multicritères permettent notamment de combiner plusieurs couches d'évidence géoscientifique afin de produire une mesure synthétique de favorabilité et de réduire progressivement l'espace à investiguer sur le terrain [4]. Cependant, les résultats d'une analyse multicritère dépendent directement des critères sélectionnés et des pondérations qui leur sont attribuées. L'évaluation de la robustesse du classement constitue donc une étape essentielle afin de déterminer si les zones prioritaires restent stables lorsque les hypothèses du modèle sont modifiées. L'analyse de sensibilité, complétée par des simulations de Monte-Carlo, permet d'examiner l'influence des paramètres d'entrée sur les résultats et d'identifier les critères contrôlant le plus fortement la décision finale [5]. Dans cette perspective, la présente étude vise à réaliser une analyse multicritère et une priorisation spatiale du potentiel minier dans la région Melaky, Madagascar. Elle combine la favorabilité géologique empirique, l'accessibilité routière, la concentration des occurrences minières, la séparation des zones habitées et la protection du réseau hydrographique. L'objectif est d'établir un indice MCDA, d'identifier et de classer les sites prioritaires, d'analyser leur structure multivariée et d'évaluer la robustesse du classement au moyen de 3 000 simulations de Monte-Carlo. L'approche proposée constitue ainsi un outil de présélection spatiale destiné à orienter les investigations géologiques complémentaires, sans assimiler la favorabilité obtenue à une estimation directe des réserves ou de la rentabilité économique.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Matériels utilisés

Les matériels mobilisés pour cette étude reposent sur un ensemble de données géospatiales institutionnelles, d'informations minières, d'observations de terrain et d'outils informatiques destinés à la construction de l'analyse multicritère et à la priorisation spatiale du potentiel minier dans la région Melaky. Les données cartographiques de référence proviennent principalement du Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (FTM), Institut Géographique et Hydrographique National de Madagascar [6]. Cette institution constitue une source nationale de référence pour l'information géographique et cartographique. Les couches exploitées comprenaient notamment les limites régionales et communales, le réseau routier, le réseau hydrographique ainsi que les localités et habitations. Ces informations ont permis de caractériser l'accessibilité, les contraintes territoriales et l'environnement spatial des occurrences minières. Les informations relatives aux sites, occurrences et potentiels miniers ont été complétées à partir des données du Bureau du Cadastre Minier de Madagascar (BCMM). Le BCMM est un établissement public chargé notamment de la gestion des autorisations et permis miniers et de l'organisation de l'information cadastrale du secteur minier malgache [7]. Ces données ont constitué la base pour localiser les occurrences et calculer leur concentration spatiale. La couche géologique a parallèlement permis de distinguer les unités lithologiques et de construire un indicateur empirique de favorabilité géologique à partir de la distribution des occurrences connues.

Les données numériques ont été complétées par les informations recueillies lors des descentes sur terrain, enregistrées et organisées dans des fichiers Microsoft Excel. Ces observations ont principalement servi à contrôler les noms de sites, les coordonnées disponibles, la nature des occurrences et certains attributs descriptifs. Une phase de vérification a été effectuée afin de détecter les doublons, valeurs manquantes, incohérences de nomenclature ou divergences entre les observations de terrain et les couches SIG. Les différentes bases ont ensuite été harmonisées dans le système projeté WGS 84 / UTM zone 38S (EPSG:32738) afin de permettre des calculs cohérents de distance, de longueur et de superficie.

Le contrôle cartographique, la visualisation des couches, les vérifications topologiques et certaines opérations de découpage et de reprojection ont été réalisés dans QGIS, environnement SIG libre permettant la manipulation, l'analyse et la représentation des données géographiques vectorielles et matricielles [8]. Les traitements reproductibles ont ensuite été automatisés sous Python. La bibliothèque GeoPandas a été utilisée pour la lecture des fichiers vectoriels, les opérations géométriques, les jointures spatiales, les intersections et les reprojections [9]. Pandas et NumPy ont été mobilisés pour la structuration des tableaux, la normalisation des critères et les calculs matriciels, tandis que SciPy et scikit-learn ont contribué aux traitements statistiques, à l'analyse en composantes principales et aux calculs nécessaires aux simulations. Enfin, Matplotlib a été utilisé pour produire les cartes, matrices de corrélation, diagrammes radar, coordonnées parallèles, graphiques de sensibilité et représentations tridimensionnelles de l'indice MCDA [10]. Cette bibliothèque est spécifiquement conçue pour la production de visualisations scientifiques sous Python. Les résultats ont été exportés en formats PDF vectoriel, PNG et TIFF à haute résolution afin d'assurer leur exploitation cartographique et leur intégration dans les documents scientifiques.

2.2 Méthodes adoptées

Les méthodes adoptées ont reposé sur une chaîne intégrée combinant prétraitement géospatial, construction de critères normalisés, agrégation multicritère, analyse multivariée et évaluation de la robustesse du classement. Dans un premier temps, les couches relatives aux limites administratives, à la géologie, aux occurrences minières, aux routes, aux rivières et aux habitations ont été contrôlées afin d'éliminer les géométries nulles ou invalides et d'harmoniser les attributs. Toutes les données ont ensuite été reprojetées dans le système WGS 84 / UTM zone 38S (EPSG:32738), puis découpées selon l'emprise de la région Melaky. Cette étape a permis de garantir la cohérence des calculs de distances, de longueurs et de superficies nécessaires à l'analyse multicritère spatiale. L'intégration de critères géographiques hétérogènes dans un cadre décisionnel commun suit les principes généraux de l'analyse multicritère couplée aux SIG [11]. Cinq critères principaux ont été construits : la favorabilité géologique, l'accessibilité routière, la concentration locale des occurrences minières, la séparation par rapport aux habitations et la protection vis-à-vis du réseau hydrographique. La favorabilité géologique a été estimée empiriquement à partir de la densité des occurrences minières associées aux différentes unités géologiques. L'accessibilité routière a été calculée à partir de la distance aux routes, avec une échelle caractéristique d'environ 10 km, de manière à attribuer les scores les plus élevés aux sites les plus accessibles. L'éloignement des habitations et des rivières a été évalué selon des échelles respectives d'environ 5 km et 2 km, tandis que la concentration des occurrences a été estimée dans un voisinage d'environ 20 km autour de chaque site. Les indicateurs ont ensuite été transformés sur une échelle commune comprise entre 0 et 1, ce qui permet de comparer et d'agréger des critères exprimés initialement dans des unités différentes [12]. L'indice synthétique de priorisation a été calculé par combinaison linéaire pondérée. Les poids retenus étaient de 0,30 pour la favorabilité géologique, 0,25 pour l'accessibilité routière, 0,20 pour la concentration des occurrences, 0,15 pour la séparation des habitations et 0,10 pour la protection hydrographique. Pour chaque site, le score MCDA correspondait ainsi à la somme des valeurs normalisées multipliées par leurs poids respectifs. Cette méthode permet d'obtenir un indice unique de favorabilité compris théoriquement entre 0 et 1 et de classer les sites selon leur niveau relatif de priorité [11], [12]. Les valeurs obtenues ont ensuite été interpolées spatialement afin de représenter la continuité du potentiel entre les points observés et d'identifier les noyaux de favorabilité régionale. Une analyse multivariée a ensuite été réalisée afin d'examiner la structure statistique des critères. Les corrélations entre variables ont été calculées pour identifier les associations positives, négatives et les éventuelles redondances. Une analyse en composantes principales (ACP) a également été appliquée aux critères standardisés afin de réduire la dimension de l'information et d'identifier les principaux gradients contrôlant la différenciation des sites. Les deux premières composantes ont été conservées pour la représentation factorielle, conformément au principe de l'ACP qui vise à résumer la variance d'un ensemble de variables corrélées par un nombre limité de composantes orthogonales [13]. Les diagrammes radar et les coordonnées parallèles ont complété cette analyse en permettant de comparer les profils multicritères des sites les mieux classés. La robustesse de la priorisation a été évaluée au moyen de 3 000 simulations de Monte-Carlo. À chaque simulation, un nouveau vecteur de poids a été généré autour de différentes combinaisons admissibles, puis normalisé afin que la somme des pondérations reste égale à 1. Le score MCDA et le rang de chaque site ont été recalculés pour chaque tirage. Cette approche permet de quantifier l'incertitude induite par les choix de pondération et d'identifier les sites qui demeurent prioritaires malgré la variation des hypothèses du modèle [14]. La fréquence d'appartenance aux meilleurs sites a été utilisée comme indicateur de stabilité du classement. Enfin, une analyse de sensibilité fondée sur la corrélation de Spearman entre les poids

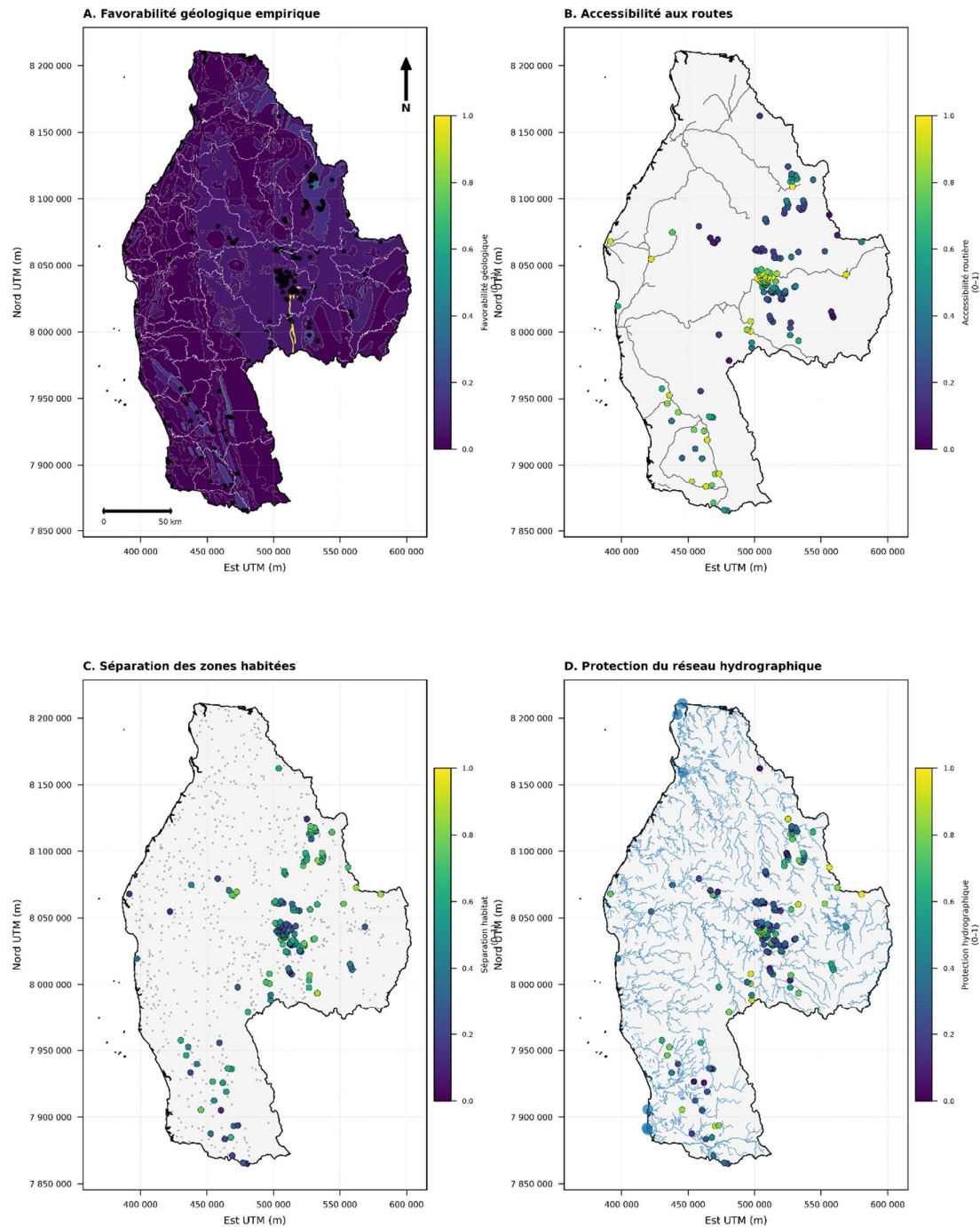
simulés et les scores obtenus a permis d'identifier les critères exerçant la plus forte influence sur chaque site. La combinaison de simulations stochastiques et d'analyses de sensibilité constitue ainsi un moyen pertinent d'évaluer la robustesse d'une décision multicritère et d'éviter qu'une hiérarchisation repose uniquement sur un jeu fixe de pondérations [15].

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Distribution spatiale des critères de favorabilité minière dans la région Melaky

La Figure 1 suivante présente les principaux critères spatiaux mobilisés dans l'analyse multicritère du potentiel minier de la région Melaky. Quatre dimensions complémentaires sont considérées : la favorabilité géologique empirique, l'accessibilité au réseau routier, la séparation par rapport aux zones habitées et la protection du réseau hydrographique. L'ensemble des critères a été normalisé sur une échelle comprise entre 0 et 1, où une valeur proche de 1 correspond à une condition considérée comme plus favorable selon les hypothèses du modèle, tandis qu'une valeur proche de 0 traduit une condition moins favorable.

Figure 1. Critères spatiaux de l'analyse multicritère — région Melaky



Les critères sont normalisés de 0 à 1 : une valeur élevée indique une condition plus favorable selon les hypothèses du modèle.

Figure 1: Distribution spatiale des critères de favorabilité minière dans la région Melaky

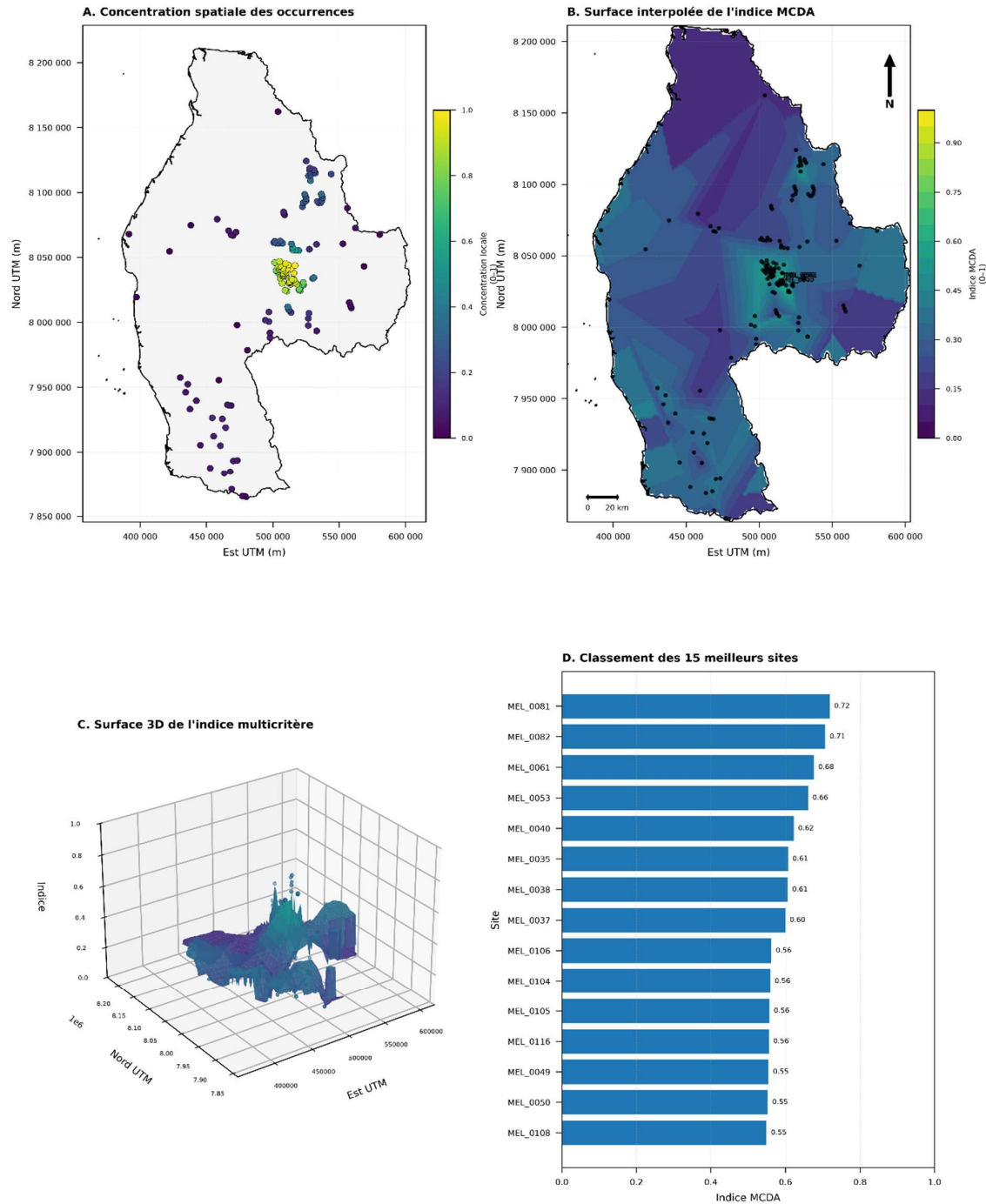
Interprétation

La favorabilité géologique présente une forte hétérogénéité spatiale. La majeure partie du territoire est caractérisée par des scores faibles, généralement inférieurs à 0,2–0,3, alors que quelques secteurs localisés, notamment dans la partie centrale à sud-est, atteignent des valeurs élevées, proches de 0,8 à 1,0. Cette configuration traduit une concentration des conditions géologiques favorables dans un nombre limité de secteurs et justifie leur prise en compte prioritaire dans la présélection des zones d'intérêt. L'accessibilité routière varie également fortement entre les sites miniers. Plusieurs occurrences situées dans la partie centrale et méridionale présentent des scores élevés, compris approximativement entre 0,6 et 1,0, indiquant une proximité relativement importante avec les infrastructures routières. À l'inverse, certaines occurrences affichent des valeurs inférieures à 0,2, traduisant une accessibilité plus faible. Cette variabilité montre que le potentiel géologique n'est pas nécessairement associé à une accessibilité homogène. Le critère de séparation des zones habitées présente majoritairement des valeurs intermédiaires à élevées, souvent comprises entre 0,4 et 0,8, tandis que plusieurs occurrences situées dans les secteurs les plus anthropisés obtiennent des scores inférieurs à 0,3. Les sites les plus éloignés des habitations atteignent localement des valeurs proches de 0,9–1,0, ce qui traduit une contrainte humaine potentiellement plus faible. Enfin, la protection du réseau hydrographique montre une distribution très contrastée, avec des scores allant de valeurs proches de 0 pour les occurrences situées à proximité immédiate des cours d'eau à des valeurs supérieures à 0,8 pour les sites plus éloignés. Dans l'ensemble, la figure met ainsi en évidence une forte variabilité spatiale des quatre critères et montre que les zones potentiellement les plus favorables sont celles combinant forte favorabilité géologique, bonne accessibilité et éloignement relatif des habitations et du réseau hydrographique.

3.2 Priorisation multicritère et hiérarchisation spatiale des sites à potentiel minier dans la région Melaky

La Figure 2 ci-après présente les résultats de l'analyse multicritère appliquée à la priorisation spatiale des sites miniers dans la région Melaky. Elle combine la concentration locale des occurrences, la surface interpolée de l'indice MCDA, sa représentation tridimensionnelle et le classement des quinze sites obtenant les scores les plus élevés. L'indice MCDA varie de 0 à 1, les valeurs fortes correspondant à des conditions plus favorables selon les critères et pondérations retenus.

Figure 2. Résultats de la priorisation multicritère — région Melaky



L'interpolation est exploratoire et ne représente ni teneur, ni réserves, ni rentabilité financière.

Figure 2: Priorisation multicritère et hiérarchisation spatiale des sites à potentiel minier dans la région Melaky

Interprétation

La concentration spatiale des occurrences met en évidence un noyau particulièrement dense dans la partie centrale à centre-est de la région, où plusieurs sites atteignent des scores proches de 0,8 à 1,0. À l'inverse, les occurrences situées dans les secteurs nord, ouest et sud présentent le plus souvent des valeurs inférieures à 0,3–0,4, traduisant une concentration locale plus faible. Cette configuration confirme que les occurrences minières ne sont pas distribuées de manière homogène dans l'espace. La surface interpolée de l'indice MCDA montre également plusieurs zones de favorabilité différenciée. Les valeurs les plus élevées apparaissent principalement dans la partie centrale et dans certains secteurs méridionaux, avec des scores localement supérieurs à 0,6–0,7. La majeure partie du territoire présente cependant des indices compris approximativement entre 0,15 et 0,45, ce qui traduit des conditions intermédiaires. La représentation 3D confirme cette organisation en faisant apparaître plusieurs pics localisés plutôt qu'une surface uniformément favorable. Le classement des sites précise cette hiérarchie. Le site MEL_0081 obtient le score MCDA le plus élevé, avec 0,72, suivi de MEL_0082 (0,71), MEL_0061 (0,68) et MEL_0053 (0,66). Les sites MEL_0040, MEL_0035 et MEL_0038 présentent respectivement des scores d'environ 0,62, 0,61 et 0,61, tandis que les derniers sites du groupe des quinze meilleurs se situent autour de 0,55–0,56. L'écart relativement modéré entre plusieurs sites du classement indique que la sélection finale ne doit pas reposer uniquement sur la position ordinale, mais également sur la robustesse du score et les contraintes locales. Ces résultats permettent d'identifier des secteurs prioritaires pour des investigations complémentaires. Ils doivent toutefois être interprétés comme une priorisation spatiale exploratoire fondée sur des critères géographiques et territoriaux, et non comme une estimation directe de teneur, de réserves ou de rentabilité économique.

3.3 Structure multivariée des critères de priorisation du potentiel minier dans la région Melaky

La Figure 3 ci-après présente l'analyse multivariée des critères intégrés dans l'indice de priorisation MCDA afin d'identifier leurs relations, leurs redondances éventuelles et les profils caractéristiques des sites les mieux classés. Elle combine une matrice de corrélation, une analyse en composantes principales (ACP), un diagramme radar et une représentation en coordonnées parallèles. Cette approche permet d'examiner simultanément la contribution de la géologie, de l'accessibilité routière, de la concentration des occurrences, de l'éloignement des habitations et du réseau hydrographique à la différenciation des sites miniers.

Figure 3. Analyse multivariée des critères — région Melaky

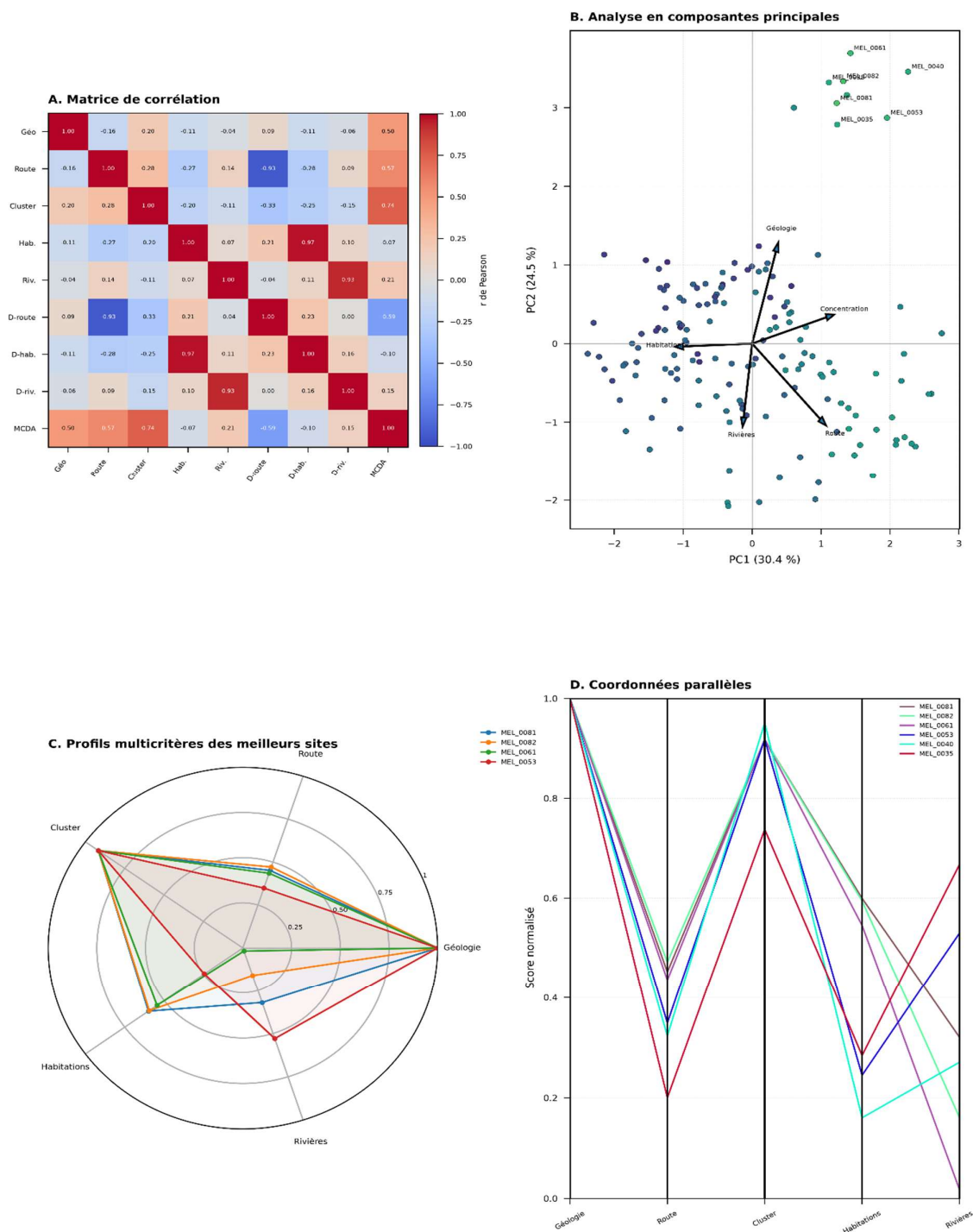


Figure 3: Structure multivariée des critères de priorisation du potentiel minier dans la région Melaky

Interprétation

La matrice de corrélation montre que l'indice MCDA est principalement associé à la concentration spatiale des occurrences ($r = 0,74$), suivie de l'accessibilité routière ($r = 0,57$) et de la favorabilité géologique ($r = 0,50$). À l'inverse, la distance aux routes présente une corrélation négative relativement forte avec l'indice ($r = -0,59$), confirmant que l'éloignement des infrastructures réduit le score global de priorisation. Les relations avec les habitations et leur distance restent faibles, respectivement $r = -0,07$ et $r = -0,10$, tandis que la composante hydrographique présente des associations plus modestes, autour de $r = 0,15-0,21$. La très forte corrélation négative entre accessibilité routière et distance aux routes ($r = -0,93$) ainsi que les fortes relations entre habitat et distance aux habitations ($r = 0,97$) et entre réseau hydrographique et distance aux rivières ($r = 0,93$) indiquent une redondance attendue entre certains critères spatiaux. L'ACP confirme cette structuration. Les deux premières composantes expliquent ensemble environ 54,9 % de la variabilité totale, dont 30,4 % pour PC1 et 24,5 % pour PC2. La première composante oppose principalement les sites caractérisés par une forte concentration et une bonne accessibilité routière à ceux davantage associés aux contraintes d'habitat, tandis que la deuxième composante différencie surtout les sites selon leur contexte géologique et hydrographique. Les sites MEL_0061, MEL_0040, MEL_0082, MEL_0081 et MEL_0053 apparaissent dans la partie supérieure droite de l'espace factoriel, traduisant des profils multicritères relativement favorables. Les profils radar et les coordonnées parallèles montrent enfin que les meilleurs sites ne présentent pas tous la même combinaison de critères. La favorabilité géologique est élevée, proche de 1,0, pour la majorité d'entre eux, tandis que le critère de concentration se situe souvent autour de 0,75 à 0,95. En revanche, les scores associés aux routes, habitations et rivières varient davantage, approximativement entre 0,2 et 0,7 selon les sites. Ces résultats montrent que la priorisation finale repose sur une combinaison de facteurs complémentaires plutôt que sur un critère unique, la concentration spatiale, l'accessibilité et la géologie constituant les dimensions les plus structurantes de l'indice MCDA.

3.4 Robustesse du classement et sensibilité du modèle multicritère de priorisation minière à Melaky

La Figure 4 suivante évalue la robustesse du modèle MCDA et la sensibilité du classement des sites aux variations des poids attribués aux différents critères. L'analyse repose sur 3 000 simulations de Monte-Carlo, permettant d'examiner la dispersion des critères, l'incertitude associée aux scores, la stabilité des rangs et l'influence de chaque pondération sur les sites prioritaires. Cette étape permet de vérifier si les résultats de la priorisation demeurent relativement stables lorsque les hypothèses de pondération sont modifiées.

Figure 4. Robustesse et sensibilité du modèle MCDA – région Melaky

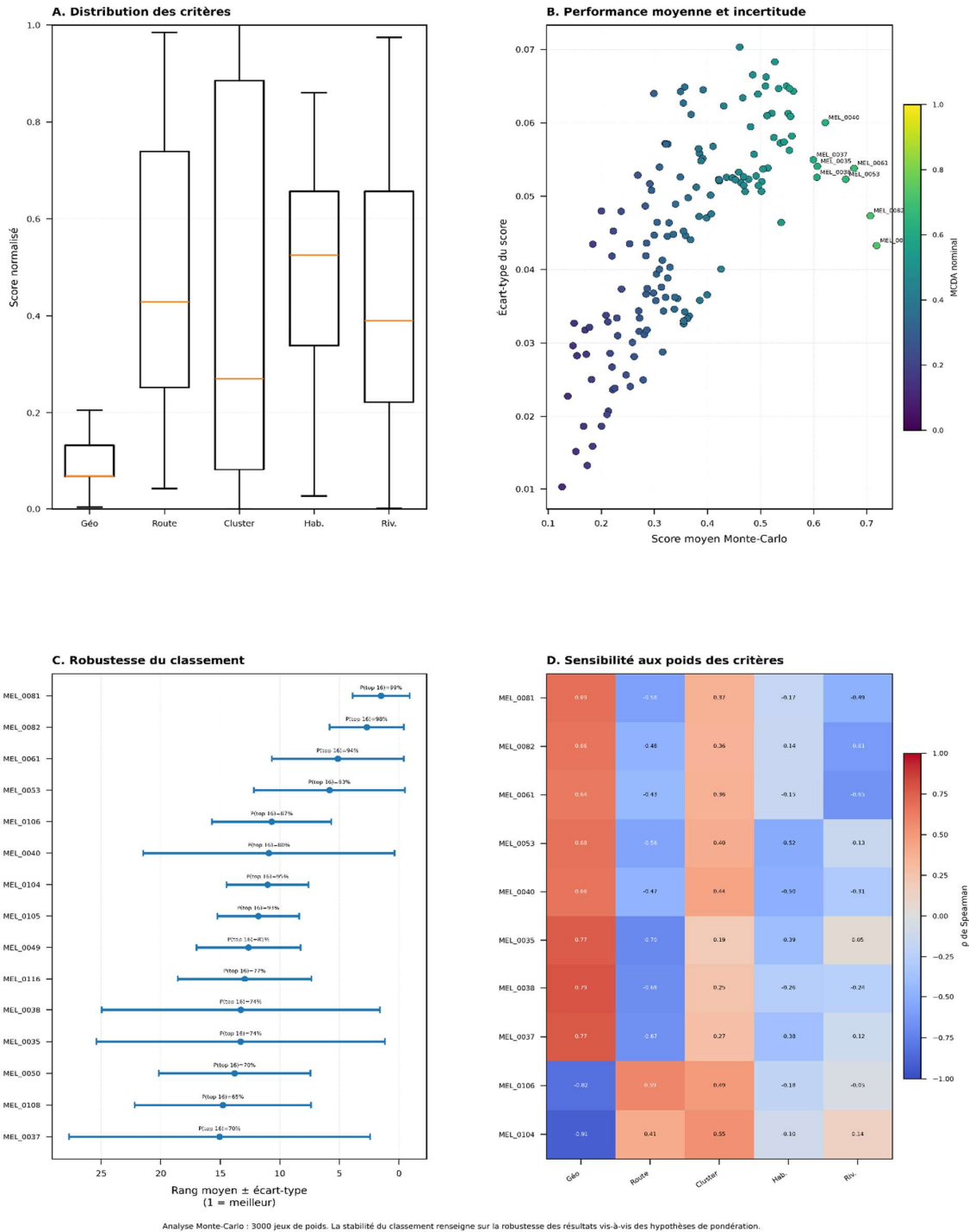


Figure 4 : Robustesse du classement et sensibilité du modèle multicritère de priorisation minière à Melaky

Interprétation

La distribution des critères montre des niveaux de dispersion différents. La favorabilité géologique présente les valeurs globalement les plus faibles, avec une médiane proche de 0,07 et des valeurs généralement inférieures à 0,20. À l'inverse, la séparation des habitations affiche une médiane d'environ 0,53, tandis que l'accessibilité routière et la protection hydrographique présentent des médianes proches de 0,43 et 0,39. Le critère de concentration spatiale possède la dispersion la plus importante, avec des valeurs couvrant pratiquement toute l'échelle 0–1, ce qui confirme son fort pouvoir discriminant entre les sites. Les simulations de Monte-Carlo montrent que les scores moyens varient approximativement de 0,10 à 0,75, pour des écarts-types généralement compris entre 0,01 et 0,07. Les sites les mieux classés conservent des scores moyens élevés, autour de 0,60–0,70, mais avec une incertitude non négligeable. Cette dispersion indique que la valeur exacte du score dépend des pondérations retenues, même si plusieurs sites restent régulièrement positionnés dans le groupe supérieur. La stabilité du classement est particulièrement élevée pour MEL_0081, qui appartient au groupe des 16 meilleurs sites dans environ 99 % des simulations. Cette probabilité atteint environ 98 % pour MEL_0082, 94 % pour MEL_0061 et 91 % pour MEL_0053. À l'inverse, certains sites présentent une variabilité de rang beaucoup plus importante, notamment MEL_0038, MEL_0035 et MEL_0037, dont les intervalles de classement sont nettement plus étendus. Ces différences permettent de distinguer les sites robustement prioritaires de ceux dont la position dépend davantage des hypothèses de pondération. L'analyse de sensibilité confirme enfin que la géologie joue un rôle déterminant pour plusieurs sites prioritaires, avec des corrélations de Spearman atteignant 0,69 pour MEL_0081, 0,77 pour MEL_0035 et 0,79 pour MEL_0038. À l'inverse, le poids associé aux routes présente souvent des relations négatives, par exemple –0,58 pour MEL_0081 et –0,70 pour MEL_0035. Certains sites réagissent toutefois différemment : MEL_0106 et MEL_0104 présentent respectivement des corrélations géologiques de –0,82 et –0,91, mais des associations positives avec les routes (0,59 et 0,41) et la concentration (0,49 et 0,55). Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la hiérarchie des premiers sites est relativement robuste, tout en soulignant que la géologie, l'accessibilité et la concentration spatiale constituent les principaux facteurs contrôlant la sensibilité du classement.

4. DISCUSSION

Les résultats montrent que la priorisation spatiale du potentiel minier dans la région Melaky dépend principalement de la combinaison entre favorabilité géologique, concentration des occurrences et accessibilité routière. Les scores MCDA les plus élevés concernent MEL_0081 (0,72), MEL_0082 (0,71), MEL_0061 (0,68) et MEL_0053 (0,66), ce qui permet d'identifier un groupe restreint de sites présentant les conditions les plus favorables selon les critères retenus. L'analyse multivariée confirme l'importance de la concentration spatiale des occurrences, fortement corrélée à l'indice MCDA ($r = 0,74$), suivie de l'accessibilité routière ($r = 0,57$) et de la favorabilité géologique ($r = 0,50$). À l'inverse, la distance aux routes présente une association négative ($r = -0,59$), ce qui souligne le rôle de l'accessibilité dans la hiérarchisation des sites. Les deux premières composantes principales expliquent 54,9 % de la variance totale, indiquant que l'essentiel de la différenciation entre les sites peut être résumé par quelques gradients spatiaux majeurs. L'analyse de robustesse renforce la fiabilité du classement. Sur 3 000 simulations de Monte-Carlo, MEL_0081 reste parmi les sites prioritaires dans environ 99 % des cas, contre 98 % pour MEL_0082, 94 % pour MEL_0061 et 91 % pour MEL_0053. Ces résultats montrent que les premiers sites du classement sont relativement stables malgré les variations de pondération. L'approche MCDA fournit une base cohérente pour la présélection des secteurs prioritaires d'exploration. Les résultats doivent néanmoins être interprétés comme une mesure de favorabilité spatiale relative et non comme une estimation directe des réserves ou de la rentabilité minière.

5. CONCLUSION

Cette étude montre que l'analyse multicritère constitue une approche pertinente pour hiérarchiser spatialement les sites à potentiel minier dans la région Melaky. La combinaison de la favorabilité géologique, de l'accessibilité routière, de la concentration des occurrences, de l'éloignement des habitations et de la protection hydrographique a permis d'identifier plusieurs sites prioritaires, notamment MEL_0081, MEL_0082, MEL_0061 et MEL_0053. Les analyses multivariées et les 3 000 simulations de Monte-Carlo confirment que ces sites conservent globalement une position favorable malgré les variations de pondération, ce qui renforce la robustesse de leur classement. La concentration des occurrences, l'accessibilité et la géologie apparaissent comme les

facteurs les plus structurants de la priorisation. Ainsi, la méthode proposée fournit un outil reproductible d'aide à la décision pour orienter les investigations géologiques et les campagnes de terrain vers les secteurs les plus prometteurs. Les résultats représentent toutefois une favorabilité spatiale relative et devront être complétés par des données sur les teneurs, les réserves et les paramètres économiques avant toute décision d'exploitation.

Référence

- [1] BRGM. (2012). Une synthèse géologique et minière de Madagascar. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.
- [2] Bonham-Carter, G. F. (1994). Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Oxford. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-03864-9>.
- [3] Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, New York.
- [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. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.07.006>.
- [5] Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). Global Sensitivity Analysis: The Primer. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470725184>.
- [6] Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (FTM). (2023). Madagascar Report by FTM. Southern African and Islands Hydrographic Commission, International Hydrographic Organization.
- [7] Bureau du Cadastre Minier de Madagascar (BCMM). Présentation et missions du Bureau du Cadastre Minier de Madagascar. Antananarivo, Madagascar.
- [8] QGIS Development Team. (2025). QGIS Geographic Information System: Documentation, Version 3.44. Open Source Geospatial Foundation Project.
- [9] Jordahl, K., Van den Bossche, J., Fleischmann, M., et al. (2020). *geopandas/geopandas: v0.8.1*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3946761>.
- [10] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>.
- [11] Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, New York.
- [12] Eastman, J. R. (1999). Multi-criteria evaluation and GIS. In P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire & D. W. Rhind (Eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, 493–502. Wiley.
- [13] Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis*. 2nd ed., Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/b98835>
- [14] Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470725184>
- [15] Rubinstein, R. Y., & Kroese, D. P. (2016). *Simulation and the Monte Carlo Method*. 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9781118631980>