



EVALUATION SPATIALE ET COMPARATIVE DES POTENTIALITÉS MINIÈRES DE LA RÉGION MELAKY

^{1,1} RAOELISOA Hafalianirina Laurencia, ^{1,2} RABEFIHAVANANA L. ^{1,3} RAKOTOSON Tolontsoa,
^{1,4} TOVONIRINA Mamiharizo Jackie, ^{1,5} RATRIMO Voahangy

¹ECOLE DOCTORALE INGENIERIE ET GESOSCIENCES - UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

RESUME : Cette étude analyse les potentialités minières de la région Melaky à partir d'une approche spatiale et comparative fondée sur l'accessibilité, la proximité hydrographique, le coût logistique et le score d'exploitation. Les résultats montrent une hiérarchisation nette des substances étudiées. Les groupes Sn, Zr, Th, La, Sc, Y, Ce et Y, Sn, Zr, Th obtiennent les meilleurs scores moyens d'exploitation, avec 3,95, suivis du Ni avec 3,73, puis du Fe et du SiO₂, chacun avec 3,67. Les substances à potentiel intermédiaire sont le mica et les hydrocarbures lourds, avec 3,05, tandis que le Ti atteint 2,95, le CaCO₃ 2,82 et le groupe Pb-Zn 2,80. Les scores les plus faibles concernent la sillimanite avec 2,69 et l'or avec 2,55. L'analyse révèle aussi une forte dépendance à l'accessibilité routière, avec une corrélation de 1,00 entre la distance aux routes et le coût logistique, et de 0,87 entre le score route et le score d'exploitation. Ainsi, les zones proches des routes apparaissent plus favorables à une valorisation minière durable.

Mots clés : potentialités minières ; Melaky ; score d'exploitation ; accessibilité routière ; valorisation durable.

ABSTRACT: This study analyzes the mining potential of the Melaky region using a spatial and comparative approach based on accessibility, proximity to water bodies, logistics costs, and an exploitation score. The results reveal a clear ranking of the substances studied. The groups comprising Sn, Zr, Th, La, Sc, Y, and Ce, as well as Y, Sn, Zr, and Th, achieved the highest average exploitation scores (3.95), followed by Ni (3.73), and then Fe and SiO₂ (3.67 each). Substances with intermediate potential include mica and heavy hydrocarbons (3.05), while Ti scored 2.95, CaCO₃ 2.82, and the Pb-Zn group 2.80. The lowest scores were recorded for sillimanite (2.69) and gold (2.55). The analysis also reveals a strong dependence on road accessibility, showing a correlation of 1.00 between distance to roads and logistics costs, and 0.87 between the road score and the exploitation score. Consequently, areas close to roads appear more favorable for sustainable mining development.

Keywords: mining potential; Melaky; exploitation score; road accessibility; sustainable development.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.22044457>

1 Introduction

La région Melaky, située dans la partie occidentale de Madagascar, constitue un espace stratégique pour l'analyse territoriale des ressources naturelles. Elle couvre une superficie de 36 269 km² et comprend cinq districts, à savoir Maintirano, Antsalova, Morafenobe, Ambatomainy et Besalamy [1]. Par sa position géographique, son ouverture sur le canal de Mozambique, la diversité de ses formations géologiques et l'importance de ses espaces encore faiblement aménagés, cette région présente des conditions favorables à une réflexion sur les potentialités minières et leur intégration dans le développement territorial. À l'échelle nationale, le secteur minier occupe une place

importante dans l'économie malgache. Madagascar dispose de nombreux gisements de substances métalliques, industrielles et énergétiques, et le secteur minier représentait en 2022 environ 4,6 % du PIB, 1,74 % des recettes publiques et 49,2 % des exportations du pays [2]. Cette contribution montre que les ressources extractives peuvent constituer un levier économique majeur, mais leur valorisation dépend fortement des conditions d'accès, de la qualité des infrastructures, du cadre institutionnel, de la transparence dans la gestion des permis et de la prise en compte des impacts sociaux et environnementaux. Dans ce contexte, l'étude intitulée "Évaluation spatiale et comparative des potentialités minières de la région Melaky" vise à analyser la répartition des indices miniers et à apprécier leur niveau d'intérêt à partir de critères territoriaux et techniques. Il ne s'agit pas seulement d'identifier la présence de substances minérales, mais aussi de comprendre leur position par rapport aux routes, aux rivières, aux zones d'accessibilité et aux contraintes logistiques. L'approche cartographique permet ainsi de croiser les données minières avec les caractéristiques spatiales du territoire afin de mieux évaluer les zones favorables à une éventuelle valorisation. Les systèmes d'information géographique constituent, dans ce sens, des outils pertinents pour organiser, comparer et interpréter des données localisées [4]. L'objectif principal de cette étude est donc d'évaluer les potentialités minières de la région Melaky à travers une lecture spatiale et comparative. Plus précisément, elle cherche à localiser les principaux indices miniers, à comparer les substances selon leur score d'exploitation, à analyser l'influence de l'accessibilité routière et de la proximité hydrographique, puis à mettre en évidence les contraintes susceptibles d'influencer la faisabilité d'une exploitation. Cette démarche s'inscrit dans une logique d'aide à la décision, car elle permet de distinguer les zones à fort intérêt minier des zones où les contraintes d'accès, de transport ou d'environnement peuvent limiter les perspectives d'exploitation. L'intérêt de cette étude repose sur sa capacité à relier la géologie, la cartographie et l'aménagement du territoire. Une ressource minière ne peut être considérée comme exploitable uniquement parce qu'elle existe dans le sous-sol ; elle doit aussi être située dans un espace accessible, techniquement aménageable, économiquement viable et écologiquement maîtrisable. Les travaux de synthèse géologique et minière réalisés à Madagascar soulignent d'ailleurs l'importance de mieux connaître les potentialités minières du pays afin d'orienter les investissements et les politiques de développement [3]. Cette recherche est également importante pour les acteurs publics, les collectivités territoriales, les investisseurs, les services techniques et les populations locales. Une évaluation spatiale des potentialités minières peut contribuer à une meilleure planification des infrastructures, à l'identification des zones prioritaires pour les études de terrain, à la prévention des conflits d'usage et à l'intégration des enjeux environnementaux dans les décisions d'exploitation. Dans les industries extractives, la bonne gouvernance, la transparence des permis et la gestion responsable des retombées économiques sont des conditions essentielles pour que les ressources naturelles contribuent réellement au développement durable [5] [6].

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

Les matériels utilisés pour la réalisation de cette étude reposent principalement sur des données géographiques, des données minières et des outils informatiques de traitement spatial. Les données de base ont été constituées à partir des couches SIG issues du Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara, notamment les fichiers au format Shapefile relatifs aux limites administratives, aux districts, au réseau routier, au réseau hydrographique et aux principaux éléments de repérage territorial. Le FTM est reconnu comme l'institution nationale chargée de la cartographie, de la télédétection et de l'information géographique à Madagascar, ce qui justifie l'utilisation de ses données comme base cartographique de référence [7]. Les données thématiques minières ont été obtenues à partir des cartographies des potentialités minières issues de la base FTMS, puis intégrées dans l'environnement SIG afin de localiser les indices miniers, d'identifier les substances présentes et de les comparer selon plusieurs critères spatiaux. Ces informations ont permis de produire des couches ponctuelles ou zonales relatives aux substances minières, puis de les croiser avec les routes et les rivières afin de calculer les distances, les scores d'accessibilité, les scores de proximité hydrographique, les coûts logistiques indicatifs et les scores moyens d'exploitation. Le traitement des données a été réalisé dans un environnement Python, à partir de scripts développés pour assurer la reproductibilité des analyses cartographiques et statistiques. La bibliothèque GeoPandas a été utilisée pour importer, lire, nettoyer et manipuler les fichiers géospatiaux, car elle permet de travailler avec des données géographiques dans Python en prolongeant les structures de données de Pandas [8]. Elle a servi notamment à gérer les couches vectorielles, à harmoniser les systèmes de coordonnées, à effectuer les jointures spatiales et à préparer les données nécessaires

aux cartes d'analyse. La production des cartes, des graphiques statistiques, des diagrammes radars, des matrices de corrélation et des courbes comparatives a été réalisée à l'aide de Matplotlib, qui constitue une bibliothèque de référence pour la génération de figures scientifiques en Python [9]. Les tableaux de données ont été organisés avec Pandas, utilisé pour structurer les informations sous forme de DataFrame, calculer les valeurs moyennes, classer les substances et préparer les résultats statistiques [10]. Les calculs numériques, les normalisations, les corrélations et certaines opérations matricielles ont été appuyés par NumPy, qui fournit les structures de calcul nécessaires au traitement scientifique des données quantitatives [11].

2.2 Méthodes

Pour réaliser la cartographie et l'analyse spatiale des potentialités minières de la région Melaky, la méthode adoptée s'est appuyée sur une approche SIG intégrée, combinant le traitement des couches vectorielles, l'analyse de proximité, la normalisation des indicateurs, la modélisation multicritère et l'analyse statistique. Les données relatives aux indices miniers, aux routes, aux rivières et aux limites administratives ont d'abord été harmonisées dans un même système de coordonnées afin d'assurer la cohérence des calculs spatiaux. Cette étape est essentielle, car les systèmes d'information géographique permettent d'organiser, de croiser et d'interpréter des données localisées dans le but de produire une information territoriale utile à l'analyse et à la décision [12]. La première méthode utilisée concerne la superposition cartographique des couches. Les indices miniers ont été représentés sous forme de points géographiques, puis croisés avec les limites des districts, le réseau routier et le réseau hydrographique. Cette méthode permet de comprendre la distribution spatiale des substances minières et d'identifier les secteurs où les potentialités sont les plus concentrées. Son utilité scientifique est de transformer des données dispersées en une lecture territoriale cohérente, capable de montrer les relations entre les ressources minérales, l'organisation administrative et les infrastructures existantes. La deuxième méthode repose sur l'algorithme du plus proche voisin spatial. Ce principe consiste à rechercher, pour chaque indice minier, l'entité géographique la plus proche, par exemple la route ou la rivière la plus proche. Son utilité est de mesurer l'accessibilité des sites miniers et d'apprécier les contraintes liées à leur éloignement. Dans cette étude, cet algorithme a permis d'évaluer la distance des indices miniers par rapport aux routes, afin d'estimer les conditions logistiques, et par rapport aux rivières, afin d'apprécier la proximité hydrographique et les éventuels enjeux environnementaux. La troisième méthode utilisée est le principe de normalisation min-max. Ce principe consiste à ramener des données de nature différente sur une même échelle de comparaison, généralement comprise entre une valeur faible et une valeur forte. Son utilité est de rendre comparables des variables qui n'ont pas les mêmes unités, comme les distances, les occurrences, les poids relatifs des substances ou les scores d'accessibilité. Grâce à cette méthode, les différents indicateurs ont pu être transformés en valeurs comparables, ce qui a facilité la hiérarchisation des substances minières et des zones favorables à l'exploitation [13]. La quatrième méthode correspond au modèle de combinaison linéaire pondérée, utilisé dans les analyses multicritères en SIG. Ce modèle repose sur le principe selon lequel plusieurs critères peuvent être combinés pour produire un score synthétique d'évaluation. Chaque critère reçoit une importance relative selon son rôle dans l'exploitation minière, par exemple l'accessibilité routière, la proximité hydrographique, le poids de la substance, les occurrences et le coût logistique. Son utilité est de produire un score global d'exploitation permettant de comparer les substances et les sites miniers selon plusieurs dimensions à la fois. Cette méthode est particulièrement adaptée aux études territoriales, car elle permet de passer d'une simple localisation des ressources à une évaluation raisonnée de leur potentiel d'exploitation [14]. La cinquième méthode utilisée est l'analyse de corrélation de Pearson. Ce principe statistique permet de mesurer le degré de relation entre deux variables quantitatives. Son utilité est d'identifier les variables qui évoluent ensemble ou, au contraire, en sens opposé. Dans cette étude, la corrélation de Pearson a permis d'analyser les relations entre la distance aux routes, le coût logistique, le score d'accessibilité, la proximité des rivières, le poids des substances et le score d'exploitation. Elle a donc servi à vérifier scientifiquement l'influence de certains facteurs, notamment le rôle déterminant de l'accessibilité routière dans la faisabilité minière [15]. Enfin, les résultats ont été représentés à travers plusieurs formes graphiques complémentaires. Les cartes ont permis de visualiser la répartition spatiale des indices miniers ; le diagramme radar a facilité la comparaison des substances selon plusieurs critères ; la matrice de corrélation a permis d'identifier les relations statistiques entre les variables ; le nuage de points a montré l'influence de la distance aux routes et aux rivières sur le score d'exploitation ; et la courbe comparative a permis de hiérarchiser les substances selon leur niveau moyen d'exploitabilité. L'ensemble

de ces méthodes constitue une démarche intégrée permettant d'associer cartographie, analyse spatiale, comparaison multicritère et interprétation scientifique des potentialités minières de la région Melaky.

3 Résultats et discussions

3.1 Résultats

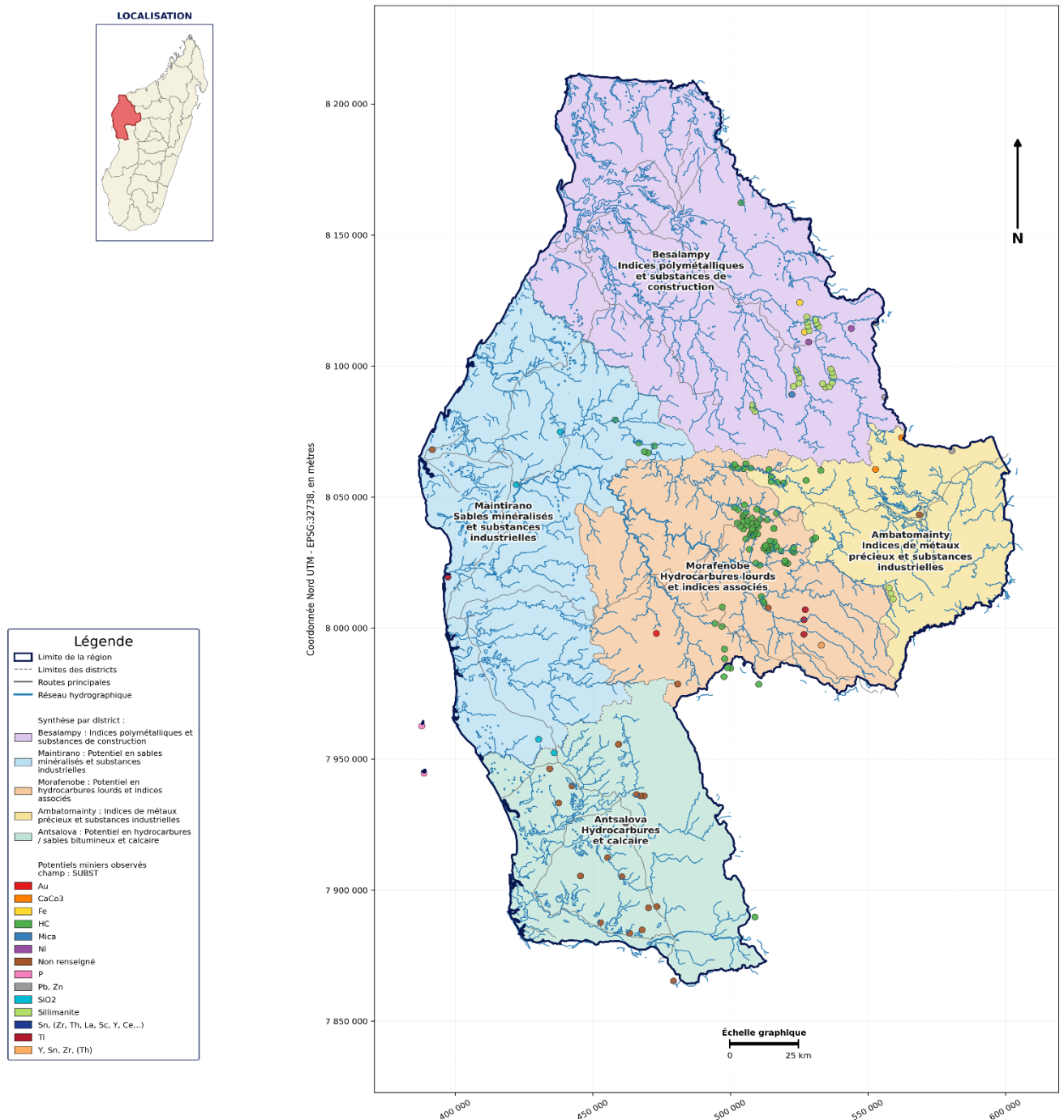
3.1.1 Répartition spatiale des indices miniers et des substances dominantes dans la région Melaky

La figure suivante présente une cartographie synthétique des potentialités minières de la région Melaky, réparties selon les différents districts. Elle met en relation les limites administratives, le réseau hydrographique, les routes principales ainsi que les indices de substances minérales observés. Cette représentation permet de visualiser la répartition spatiale des ressources minières potentielles et de comprendre leur organisation territoriale à l'échelle régionale. Elle constitue ainsi un outil d'analyse important pour identifier les zones à fort intérêt minier, mais aussi pour apprécier les contraintes liées à l'accessibilité, à l'environnement et à l'aménagement du territoire. L'analyse de la carte montre une différenciation nette des potentialités minières selon les districts. Au nord, le district de Besalampy se distingue par la présence d'indices polymétalliques et de substances de construction, ce qui suggère un potentiel diversifié pouvant être lié à la nature géologique du secteur. À l'ouest, le district de Maintirano présente surtout un potentiel en sables minéralisés et en substances industrielles, probablement associé aux formations littorales et sédimentaires. Dans la partie centrale, Morafenobe apparaît comme une zone importante pour les hydrocarbures lourds et les indices associés, tandis qu'à l'est, Ambatomainy est marqué par des indices de métaux précieux et de substances industrielles. Enfin, le district d'Antsalova, situé au sud, se caractérise par un potentiel en hydrocarbures et en calcaire, ce qui traduit l'importance des formations sédimentaires dans cette partie de la région. La concentration des points d'indices miniers dans certains secteurs, notamment autour de Morafenobe et d'Ambatomainy, montre que les potentialités ne sont pas réparties de manière homogène sur l'ensemble du territoire régional. Cette organisation spatiale peut s'expliquer par la diversité des formations géologiques, mais aussi par le niveau d'exploration déjà réalisé dans chaque district. Les zones où les indices sont nombreux ne correspondent donc pas nécessairement à des gisements directement exploitables, mais plutôt à des espaces nécessitant des études géologiques, géochimiques et économiques plus approfondies. La présence d'un réseau hydrographique dense dans plusieurs zones minières potentielles constitue également un élément important d'interprétation. Elle indique que toute activité d'exploitation devra prendre en compte les risques environnementaux liés à l'eau, notamment l'érosion, la pollution des cours d'eau, la modification des écoulements et les impacts possibles sur les usages locaux. De même, la proximité ou l'éloignement des routes principales influence fortement la faisabilité économique de l'exploitation, car les ressources situées dans des zones enclavées peuvent nécessiter des investissements importants en infrastructures.

Figure 1: Répartition spatiale des indices miniers et des substances dominantes dans la région Melaky

Cartographie des potentiels miniers par district de la région Melaky

Carte générale de synthèse territoriale



NB : cette carte présente des potentiels miniers indicatifs à des fins de synthèse territoriale.

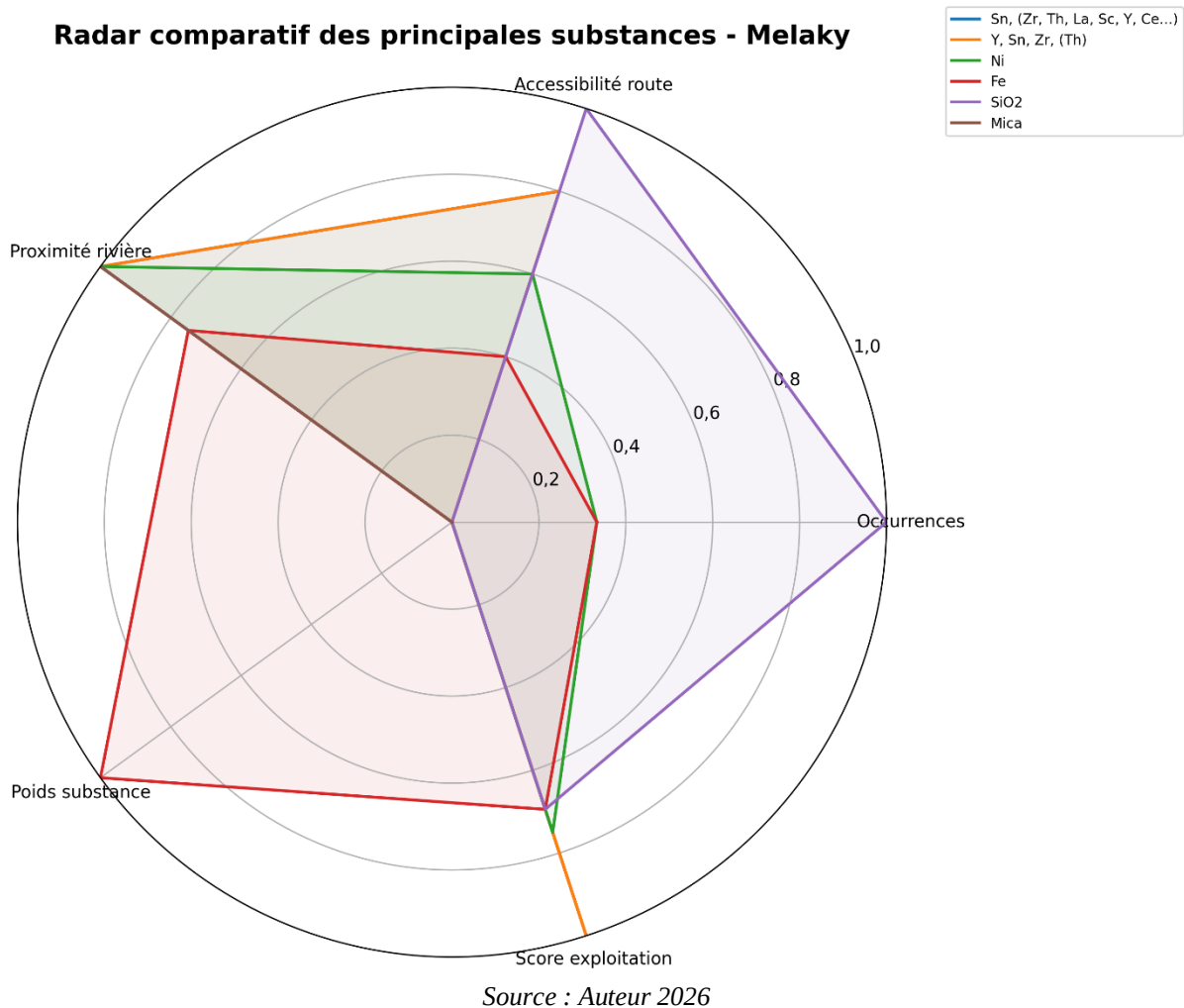
Source : Auteur 2026

3.1.2 Radar comparatif des principales substances minières selon les critères d'exploitation dans la région Melaky

La figure ci-après présente une comparaison synthétique des principales substances minières identifiées dans la région Melaky à partir de cinq critères d'analyse : les occurrences, l'accessibilité routière, la proximité des rivières, le poids relatif de la substance et le score d'exploitation. Les valeurs sont normalisées entre 0 et 1, ce

qui permet de comparer des substances de nature différente sur une même échelle. Plus la valeur se rapproche de 1, plus le critère est favorable ou fortement représenté ; à l'inverse, une valeur proche de 0 traduit une faiblesse relative du critère considéré.

Figure 2: Radar comparatif des principales substances minières selon les critères d'exploitation dans la région Melaky



Interprétation

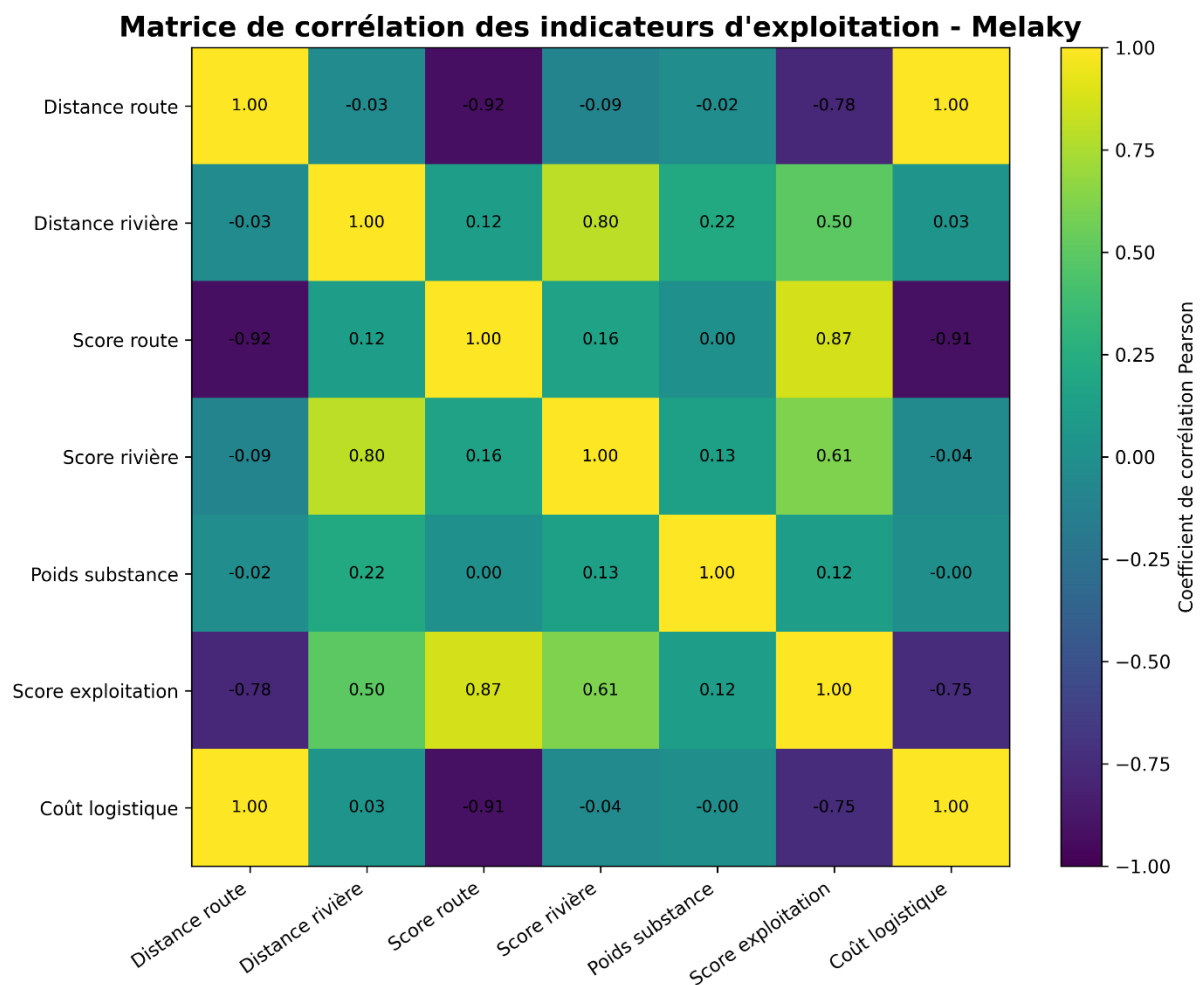
L'analyse du radar montre que le SiO₂ présente le profil le plus marqué en matière d'occurrences et d'accessibilité. Il atteint une valeur maximale de 1,0 pour les occurrences et de 1,0 pour l'accessibilité routière, ce qui indique une forte présence spatiale et une facilité d'accès relativement élevée. Son score d'exploitation est également important, autour de 0,7, mais sa proximité avec les rivières et son poids relatif apparaissent faibles, avec des valeurs proches de 0. Ce profil suggère que le SiO₂ constitue une substance bien distribuée et facilement accessible, mais dont l'intérêt économique doit être apprécié en fonction de la qualité du matériau, du volume réellement exploitable et de la demande industrielle. Les substances du groupe Y, Sn, Zr, Th présentent un profil différent. Elles atteignent une valeur élevée de 1,0 pour le score d'exploitation et également 1,0 pour la proximité rivière, avec une accessibilité routière estimée à environ 0,8. Ces valeurs traduisent un potentiel d'exploitation relativement favorable, notamment du point de vue de la localisation et de l'accès. Toutefois, les valeurs faibles ou non représentées pour les occurrences et le poids substance montrent que leur présence peut être plus localisée ou moins dominante par rapport aux autres substances. Cela signifie que ces indices peuvent avoir un intérêt minier important, mais nécessitent des études plus approfondies pour confirmer leur continuité géologique et leur rentabilité. Le fer, représenté par Fe, se distingue surtout par son poids relatif, qui atteint la valeur maximale de 1,0. Il présente également une proximité rivière assez élevée, autour de 0,75, un score d'exploitation d'environ 0,7, une accessibilité routière moyenne de 0,4 et une occurrence plus faible, autour de 0,3. Ce profil indique que le fer possède une importance matérielle notable lorsqu'il est présent, mais que sa distribution paraît moins fréquente et son accessibilité moins favorable que celle du SiO₂. D'un point de vue scientifique, cela peut traduire

un potentiel concentré dans certains secteurs, avec des contraintes logistiques plus importantes pour une éventuelle valorisation. Le nickel, ou Ni, montre un profil intermédiaire. Ses valeurs sont d'environ 0,3 pour les occurrences, 0,6 pour l'accessibilité routière, 1,0 pour la proximité rivière et environ 0,7 pour le score d'exploitation. Cette configuration suggère que le nickel se situe dans des zones relativement proches du réseau hydrographique et moyennement accessibles par route. Son score d'exploitation reste intéressant, mais son occurrence limitée indique que le potentiel pourrait être plus ponctuel que régional. La forte proximité avec les rivières implique aussi une attention particulière aux risques environnementaux, notamment en cas d'exploration ou d'exploitation future. Le mica présente un profil très spécifique, dominé presque uniquement par la proximité rivière, avec une valeur de 1,0, tandis que les autres critères restent proches de 0. Cela signifie que les indices de mica représentés sur cette figure semblent fortement associés aux zones proches des cours d'eau, mais qu'ils ne disposent pas d'un poids, d'une accessibilité ou d'un score d'exploitation suffisamment élevés dans cette comparaison. Ce résultat peut traduire soit une présence marginale, soit un potentiel encore insuffisamment documenté. Le groupe Sn, Zr, Th, La, Sc, Y, Ce apparaît peu marqué dans le radar, avec des valeurs faibles ou non dominantes sur les différents critères. Cette situation ne signifie pas nécessairement une absence de potentiel, mais plutôt une faible expression dans les critères retenus pour cette figure. Il peut s'agir d'indices encore dispersés, moins accessibles ou moins pondérés dans l'évaluation actuelle.

3.1.3 Matrice de corrélation des indicateurs d'exploitation minière dans la région Melaky

La figure ci-dessous présente la matrice de corrélation de Pearson entre les principaux indicateurs utilisés pour évaluer les conditions d'exploitation minière dans la région Melaky. Elle met en relation la distance aux routes, la distance aux rivières, le score d'accessibilité routière, le score de proximité hydrographique, le poids des substances, le score global d'exploitation et le coût logistique. Les coefficients varient de -1 à +1 : une valeur proche de +1 indique une forte relation positive entre deux variables, une valeur proche de -1 traduit une forte relation inverse, tandis qu'une valeur proche de 0 indique une relation faible ou presque inexistante.

Figure 3: Matrice de corrélation des indicateurs d'exploitation minière dans la région Melaky



Source : Auteur 2026

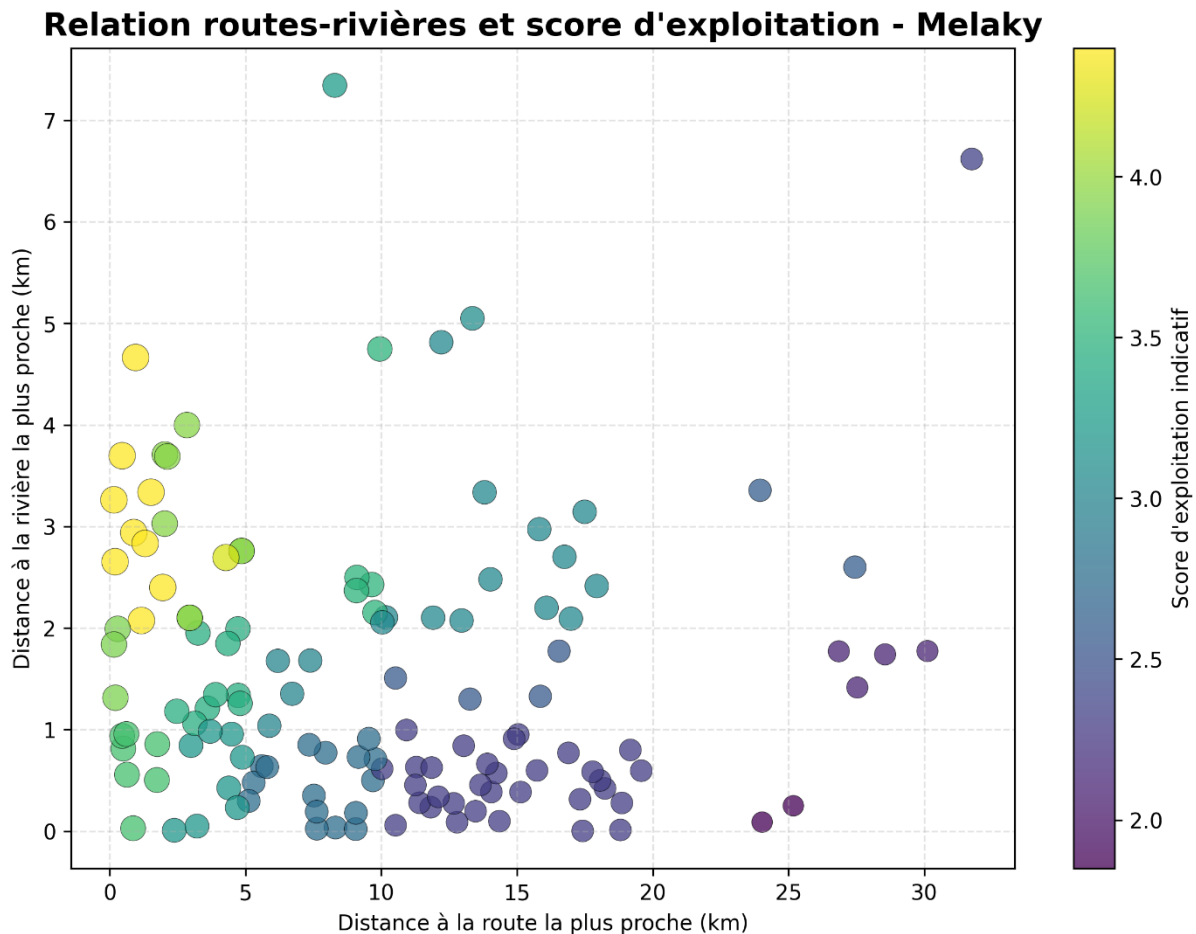
Interprétation

L'analyse de la matrice montre d'abord une très forte corrélation positive entre la distance à la route et le coût logistique, avec un coefficient de 1,00. Cela signifie que plus les indices miniers sont éloignés des axes routiers, plus le coût logistique augmente. Cette relation est scientifiquement cohérente, car l'éloignement des infrastructures de transport entraîne généralement des dépenses supplémentaires liées à l'acheminement des équipements, au transport des matériaux, à l'ouverture de pistes et à la mobilisation de la main-d'œuvre. La relation entre la distance à la route et le score route est fortement négative, avec une corrélation de -0,92. Cela indique que lorsque la distance par rapport aux routes augmente, le score d'accessibilité routière diminue fortement. De manière similaire, le coût logistique est fortement corrélé négativement avec le score route, avec une valeur de -0,91. Ces résultats confirment que l'accessibilité routière constitue un facteur déterminant dans l'évaluation du potentiel d'exploitation. Les zones proches des routes sont donc plus favorables à une exploitation éventuelle, tandis que les zones éloignées présentent des contraintes techniques et financières plus importantes. Le score d'exploitation présente une forte corrélation positive avec le score route, soit 0,87. Cette valeur montre que l'accessibilité routière influence fortement la faisabilité globale de l'exploitation minière dans la région. Autrement dit, les sites mieux desservis par les routes tendent à obtenir un meilleur score d'exploitation. Cette relation souligne l'importance des infrastructures de transport dans la valorisation des ressources minières, car même une substance intéressante peut rester difficilement exploitable si elle se situe dans une zone enclavée. La corrélation entre le score d'exploitation et la distance à la route est négative, avec une valeur de -0,78, tandis que celle entre le score d'exploitation et le coût logistique est également négative, avec -0,75. Ces deux résultats montrent que l'éloignement routier et les coûts de transport réduisent directement l'attractivité minière des sites. Ainsi, les secteurs les plus éloignés des routes principales peuvent présenter un potentiel géologique, mais leur rentabilité reste limitée si les infrastructures d'accès sont insuffisantes. La relation entre la distance rivière et le score rivière est fortement positive, avec un coefficient de 0,80. Cette valeur indique une association importante entre les deux variables hydrographiques utilisées dans l'analyse. Le score rivière est aussi positivement corrélé au score d'exploitation, avec une valeur de 0,61, ce qui signifie que le facteur hydrographique intervient également dans l'évaluation du potentiel minier. La présence ou la proximité du réseau hydrographique peut faciliter certaines activités, notamment l'approvisionnement en eau, mais elle peut aussi renforcer les exigences environnementales, surtout en matière de pollution, d'érosion, de sédimentation et de protection des cours d'eau. La corrélation entre la distance rivière et le score d'exploitation est modérée, avec une valeur de 0,50. Cela montre que le facteur hydrographique contribue à l'évaluation de l'exploitation, mais de façon moins déterminante que l'accessibilité routière. En comparaison, le score route présente une corrélation beaucoup plus forte avec le score d'exploitation, soit 0,87. On peut donc considérer que, dans cette matrice, la route apparaît comme le facteur structurant principal, tandis que le réseau hydrographique joue un rôle secondaire mais non négligeable. Le poids des substances montre des corrélations faibles avec les autres indicateurs. Sa relation avec le score d'exploitation est de seulement 0,12, avec le score rivière de 0,13, avec la distance rivière de 0,22, et avec la distance route de -0,02. Ces valeurs très faibles indiquent que la masse ou l'importance relative des substances n'est pas directement liée aux conditions d'accessibilité ou au score global d'exploitation. Autrement dit, une substance peut être importante en quantité ou en intérêt minéral, mais cela ne garantit pas automatiquement sa facilité d'exploitation si elle est située dans un espace difficile d'accès.

3.1.4 Relation entre l'accessibilité routière, la proximité hydrographique et le score d'exploitation minière

La figure ci-dessous présente la relation entre la distance des indices miniers par rapport à la route la plus proche, la distance par rapport à la rivière la plus proche et le score d'exploitation indicatif dans la région Melaky. L'axe horizontal indique l'éloignement des sites miniers vis-à-vis du réseau routier, exprimé en kilomètres, tandis que l'axe vertical représente leur distance par rapport au réseau hydrographique. La couleur des points traduit le score d'exploitation : les teintes les plus claires correspondent aux scores les plus élevés, tandis que les teintes les plus foncées indiquent des scores plus faibles. Cette représentation permet donc d'évaluer simultanément l'effet de l'accessibilité routière et de la proximité des rivières sur la valorisation potentielle des indices miniers. dans la région Melaky

Figure 4: Relation entre l'accessibilité routière, la proximité hydrographique et le score d'exploitation minière



Source : Auteur 2026

Interprétation

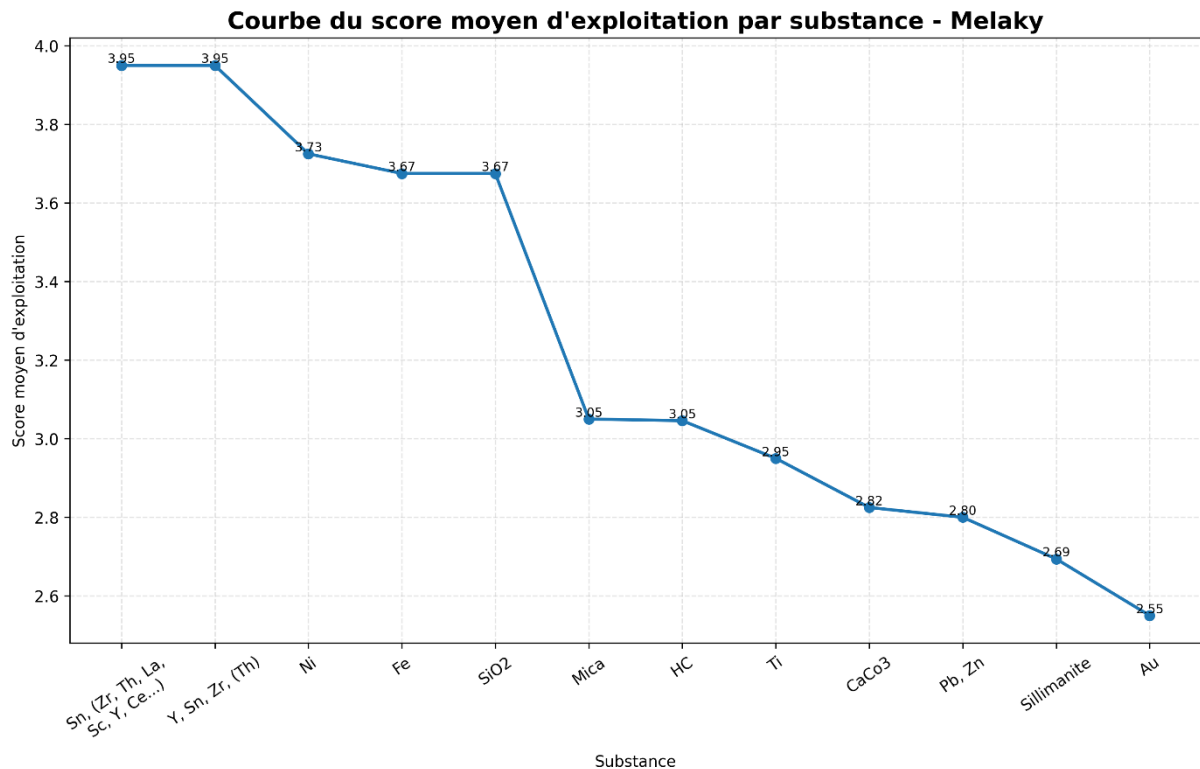
L'analyse du nuage de points montre que les meilleurs scores d'exploitation sont généralement associés aux sites situés à faible distance des routes. Les points les plus favorables, avec des scores proches de 4,0 à 4,4, se concentrent surtout entre 0 et 5 km de la route la plus proche. Cela signifie que l'accessibilité routière constitue un facteur majeur dans l'évaluation du potentiel d'exploitation. En effet, les sites proches des routes nécessitent moins d'investissements pour le transport des équipements, l'évacuation des substances extraites et la connexion avec les centres de consommation ou d'exportation. Les sites localisés à moins de 2 km des routes présentent souvent des scores élevés, compris approximativement entre 3,8 et 4,4, même lorsque leur distance aux rivières varie entre 1 km et plus de 4 km. Cette situation montre que la proximité routière semble avoir un poids plus déterminant que la proximité hydrographique dans le score global d'exploitation. Autrement dit, un indice minier relativement éloigné d'une rivière peut conserver un score favorable s'il est bien connecté au réseau routier. À l'inverse, lorsque la distance à la route augmente, le score d'exploitation tend à diminuer. Les points situés entre 15 et 30 km des routes présentent majoritairement des scores plus faibles, souvent compris entre 1,8 et 2,8. Cette baisse traduit l'effet de l'enclavement sur la faisabilité économique de l'exploitation. Un site éloigné de plus de 20 km d'un axe routier devient plus coûteux à exploiter, car il exige l'ouverture ou l'amélioration de pistes, l'augmentation des coûts de transport et une logistique plus complexe. La distance aux rivières montre une influence plus nuancée. Une grande partie des indices se situe à moins de 2 km des cours d'eau, ce qui indique une proximité hydrographique relativement forte dans plusieurs zones minières potentielles. Toutefois, les scores élevés ne sont pas uniquement associés aux sites proches des rivières. Certains points situés entre 2 et 4,5 km des rivières conservent des scores élevés lorsqu'ils sont proches des routes. Cela suggère que la rivière peut constituer un facteur complémentaire, notamment pour les besoins en eau ou l'organisation territoriale des sites, mais elle ne suffit pas à elle seule à garantir un bon niveau d'exploitabilité. Quelques points isolés montrent des situations particulières. Un site situé à environ 8 km de la route et à plus de 7 km de la rivière présente encore un score moyen à élevé, autour de 3,0 à 3,2, ce qui peut indiquer l'existence d'un indice minier intéressant malgré son éloignement hydrographique. À l'autre extrême, un point situé à environ 32 km de la route et 6,6 km de la rivière présente un score relativement faible, proche de 2,3 à 2,5, illustrant clairement les contraintes d'accessibilité pour les sites très

éloignés des infrastructures. La distribution générale montre donc une relation inverse entre la distance à la route et le score d'exploitation. Plus les indices miniers s'éloignent du réseau routier, plus leur score tend à diminuer. Cette observation confirme que, dans la région Melaky, la valorisation minière dépend non seulement de la présence de substances, mais aussi des conditions d'accès au territoire. Les zones proches des routes apparaissent comme les plus favorables pour une éventuelle exploitation, tandis que les zones éloignées nécessitent des investissements logistiques plus importants avant de pouvoir être considérées comme économiquement viables. Sur le plan environnemental, la forte concentration de plusieurs indices à moins de 1 à 2 km des rivières appelle également une attention particulière. Même si la proximité de l'eau peut être avantageuse pour certaines opérations, elle augmente aussi les risques de pollution, d'érosion, de sédimentation et de perturbation des usages locaux de l'eau. Ainsi, les sites présentant à la fois un bon score d'exploitation et une forte proximité hydrographique devraient faire l'objet d'études environnementales approfondies avant toute mise en exploitation.

3.1.5 Score moyen d'exploitation des principales substances minières

La figure suivante présente la variation du score moyen d'exploitation des principales substances minières identifiées dans la région Melaky. Ce score permet de comparer le niveau d'intérêt relatif de chaque substance en fonction des critères retenus dans l'analyse, notamment l'accessibilité, la position territoriale, les contraintes logistiques et les conditions favorables à une éventuelle valorisation. Les valeurs observées varient de 2,55 à 3,95, ce qui montre une hiérarchisation nette entre les substances à potentiel d'exploitation élevé, intermédiaire et plus faible.

Figure 5: Score moyen d'exploitation des principales substances minières



Source : Auteur 2026

Interprétation

L'analyse de la courbe montre que les meilleurs scores moyens d'exploitation sont enregistrés par le groupe Sn, Zr, Th, La, Sc, Y, Ce et le groupe Y, Sn, Zr, Th, qui atteignent chacun une valeur de 3,95. Ces substances apparaissent donc comme les plus favorables dans l'évaluation comparative. Leur position en tête de classement indique qu'elles combinent probablement plusieurs facteurs avantageux, comme une bonne accessibilité relative, une localisation plus favorable ou un intérêt minier plus marqué. D'un point de vue scientifique, ces groupes de substances peuvent être considérés comme prioritaires pour des études complémentaires, notamment des investigations géologiques, géochimiques et économiques plus précises. Le nickel, avec un score moyen de 3,73, occupe également une position favorable. Cette valeur, légèrement inférieure à celle des premiers groupes, montre que le nickel conserve un potentiel d'exploitation important dans la région Melaky. Il peut représenter une

substance stratégique, surtout si les indices observés sont associés à des concentrations suffisantes et à des conditions d'accès acceptables. Toutefois, son exploitation éventuelle devrait être accompagnée d'une analyse environnementale rigoureuse, car les substances métalliques peuvent entraîner des risques particuliers en matière de pollution des sols et des eaux. Le fer et le SiO_2 présentent tous deux un score moyen de 3,67. Cette valeur traduit un potentiel relativement élevé, mais légèrement inférieur à celui du nickel et des groupes polymétalliques. Le fer peut être intéressant en raison de son poids économique et industriel, tandis que le SiO_2 peut être valorisé comme substance industrielle, notamment dans les domaines liés aux matériaux, au verre ou à certaines utilisations techniques. Leur score identique montre qu'ils occupent une position comparable dans la hiérarchie des substances étudiées, même si leur nature géologique, leurs usages et leurs conditions d'exploitation peuvent être très différents. Une rupture nette apparaît ensuite avec le mica et les hydrocarbures lourds, notés HC, qui présentent chacun un score moyen de 3,05. Cette baisse par rapport au groupe précédent indique un potentiel intermédiaire. Ces substances ne sont pas dépourvues d'intérêt, mais elles semblent moins favorables selon les critères retenus. Pour les hydrocarbures lourds, le score de 3,05 peut traduire un potentiel existant mais soumis à de fortes contraintes techniques, économiques ou environnementales. Pour le mica, cette valeur peut indiquer une présence exploitable dans certains secteurs, mais probablement moins compétitive que les substances situées en tête du classement. Le titane, avec un score de 2,95, se situe juste en dessous du seuil de 3. Cette position traduit un potentiel modéré. Il ne s'agit pas d'une substance sans intérêt, mais son niveau d'exploitabilité apparaît moins favorable que celui du nickel, du fer, du SiO_2 ou des groupes à terres rares et métaux associés. Cette valeur peut s'expliquer par une distribution plus limitée, une accessibilité moins avantageuse ou un poids moindre dans les critères de comparaison. Le carbonate de calcium, ou CaCO_3 , affiche un score moyen de 2,82, tandis que le groupe Pb, Zn présente une valeur de 2,80. Ces deux valeurs sont proches et indiquent un potentiel relativement modéré. Le CaCO_3 peut conserver un intérêt pour les usages industriels ou les matériaux de construction, mais son score montre qu'il n'est pas parmi les substances les plus favorables dans cette analyse régionale. Le groupe plomb-zinc, quant à lui, pourrait présenter un intérêt métallifère, mais son score suggère que les conditions d'exploitation ou la distribution des indices sont moins avantageuses. La sillimanite présente un score moyen de 2,69, ce qui la place dans la partie basse du classement. Cette valeur indique un potentiel d'exploitation plus limité par rapport aux autres substances étudiées. Elle peut être présente localement, mais son intérêt régional semble moins marqué selon les critères utilisés. Enfin, l'or, avec un score moyen de 2,55, obtient la valeur la plus faible de la courbe. Ce résultat ne signifie pas nécessairement une absence d'or dans la région Melaky, mais il indique que, dans cette évaluation, les indices aurifères apparaissent moins favorables en termes d'exploitation moyenne. Cela peut être lié à une occurrence plus dispersée, à des contraintes d'accès ou à un poids plus faible dans les données analysées.

3.2 Discussions

Les résultats de cette étude montrent que les potentialités minières de la région Melaky sont diversifiées, mais leur niveau d'exploitabilité varie selon les substances et les conditions territoriales. Les groupes Sn, Zr, Th, La, Sc, Y, Ce et Y, Sn, Zr, Th présentent les meilleurs scores moyens d'exploitation, avec une valeur de 3,95, ce qui indique un potentiel relativement favorable. Ils sont suivis par le Ni avec 3,73, puis par le Fe et le SiO_2 , qui obtiennent chacun 3,67. Ces résultats suggèrent que les substances polymétalliques et certains métaux stratégiques constituent les principales ressources à considérer pour des études plus approfondies. L'analyse met également en évidence le rôle déterminant de l'accessibilité routière dans la valorisation des ressources. La corrélation de 1,00 entre la distance aux routes et le coût logistique montre que l'éloignement des infrastructures augmente directement les contraintes d'exploitation. De plus, la corrélation de 0,87 entre le score route et le score d'exploitation confirme que les sites proches des routes sont les plus favorables. Ainsi, une substance minière intéressante peut perdre de son attractivité lorsqu'elle se situe dans une zone enclavée. La proximité des rivières constitue un autre facteur important, mais son rôle est plus nuancé. Elle peut faciliter certaines opérations liées à l'exploitation, mais elle augmente aussi les risques environnementaux, notamment la pollution de l'eau, l'érosion et la perturbation des usages locaux. Les zones proches des cours d'eau doivent donc être considérées avec prudence dans toute perspective d'exploitation. Cette étude montre que le potentiel minier de Melaky ne dépend pas seulement de la présence des substances dans le sous-sol. Il dépend aussi de l'accessibilité, du coût logistique, de la proximité hydrographique et des contraintes environnementales. Les résultats obtenus permettent donc d'identifier les substances et les zones prioritaires pour les futures investigations, tout en soulignant la nécessité d'une exploitation planifiée, responsable et durable.

4 Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer de manière spatiale et comparative les potentialités minières de la région Melaky en tenant compte de plusieurs critères d'analyse, notamment la nature des substances, leur score moyen d'exploitation, l'accessibilité routière, la proximité hydrographique et les contraintes logistiques. Les résultats montrent que le potentiel minier régional est diversifié, mais inégalement réparti selon les substances et les

conditions territoriales. Les groupes Sn, Zr, Th, La, Sc, Y, Ce et Y, Sn, Zr, Th apparaissent comme les substances les plus favorables, avec un score moyen d'exploitation de 3,95. Ils sont suivis par le Ni avec 3,73, puis par le Fe et le SiO₂ avec 3,67. À l'inverse, la sillimanite avec 2,69 et l'or avec 2,55 présentent les scores les plus faibles, ce qui traduit une exploitabilité plus limitée dans les conditions analysées. L'étude a également mis en évidence le rôle essentiel des infrastructures routières dans la valorisation minière. La forte corrélation entre la distance aux routes et le coût logistique, évaluée à 1,00, montre que l'éloignement constitue une contrainte majeure pour l'exploitation. De même, la corrélation de 0,87 entre le score route et le score d'exploitation confirme que les sites les plus proches des routes sont généralement les plus favorables. Ainsi, l'exploitation minière dans la région Melaky ne peut être envisagée uniquement à partir de la présence des substances minérales. Elle doit intégrer les conditions d'accès, les coûts de transport, la proximité des cours d'eau et les risques environnementaux. Cette approche permet d'identifier les substances et les zones prioritaires pour les futures études de terrain, tout en soulignant la nécessité d'une gestion minière planifiée, responsable et durable.

REFERENCES

- [1] CREAM, 2013. Monographie de la Région Melaky. Antananarivo : Centre de Recherches, d'Études et d'Appui à l'Analyse Économique à Madagascar / INSTAT.
- [2] EITI, 2024. Madagascar: Extractive Industries Transparency Initiative Country Profile. Oslo : EITI International Secretariat.
- [3] BRGM, 2012. A Geological and Mining Synthesis for Madagascar. Orléans : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- [4] Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. and Rhind, D.W., 2015. Geographic Information Science and Systems. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons.
- [5] Mayorga Alba, E., 2009. Extractive Industries Value Chain: A Comprehensive Integrated Approach to Developing Extractive Industries. Washington, DC : World Bank.
- [6] Transparency International Australia, 2022. Madagascar: Mining Licence Process Map. Melbourne : Transparency International Australia.
- [7] Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara / Observatoire du Territoire, n.d. FTM : Institut National de Cartographie, Télédétection et Information Géographique. Antananarivo : FTM.
- [8] GeoPandas Developers, 2026. GeoPandas Documentation. Available as official documentation of the GeoPandas project.
- [9] Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. Computing in Science & Engineering, 9(3), pp.90–95.
- [10] McKinney, W., 2010. Data Structures for Statistical Computing in Python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, pp.56–61.
- [11] Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J., Gommers, R., Virtanen, P. et al., 2020. Array Programming with NumPy. Nature, 585, pp.357–362.
- [12] Burrough, P.A., McDonnell, R.A. and Lloyd, C.D., 2015. Principles of Geographical Information Systems. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press.
- [13] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B. et al., 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12, pp.2825–2830.
- [14] Malczewski, J., 2000. On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. Transactions in GIS, 4(1), pp.5–22.
- [15] Pearson, K., 1895. Notes on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents. Proceedings of the Royal Society of London, 58, pp.240–242.