



Modélisation géologique et estimation d'un gisement de Fer de Bekisopa, Madagascar [Geological modeling and estimation of a Bekisopa iron deposit, Madagascar]

Rakotonirina M. D. L.¹, Razakamanana T.², Razafindrazanakolona A. D.³, Ramanampisoa V. E.⁴, Pius Tshimankinda Mpiana⁵, Koto-Te-Nyiwa Ngbolua⁶, Robijaona Rahelivololoniaina B.^{7,8*}

¹Université de Fianarantsoa, Institut Supérieur des Sciences et Technologies, Fianarantsoa, Madagascar

²Université de Toliara, Ecole Doctorale Géosciences, Physique, Chimie de l'Environnement et Systèmes Hôtes-Pathogènes (GPCEHP), Toliara, Madagascar

³Université de Fianarantsoa, Ecole Doctorale Géochimie et Chimie Médicinale (Géochimed), Fianarantsoa Madagascar

⁴Faculté des Sciences, Université de Fianarantsoa, Fianarantsoa Madagascar

⁵Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Département de Chimie, Kinshasa, République Démocratique du Congo

⁶Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Kinshasa, République Démocratique de Congo

⁷Université d'Antananarivo, Ecole Doctorale, Génie des Procédés et des Systèmes Industriels, Agricoles et Alimentaires (GPSIAA), Antananarivo, Madagascar

⁸Laboratoire de Valorisation des Ressources Naturelles, Antananarivo, Madagascar

Résumé

Cette étude a pour objectif de réaliser une analyse approfondie de la géologie du gisement de fer en question et d'explorer son potentiel d'exploitation. En combinant des observations sur le terrain, des opérations de forage, des analyses géologiques et l'utilisation d'outils de modélisation, notre intention est de parvenir à une compréhension approfondie de la composition, de la distribution et des caractéristiques géologiques du gisement de fer de Bekisopa découvert par H. Besairie en 1933. L'évaluation des réserves de fer a été menée en appliquant des méthodes géostatistiques, notamment le krigeage. Les données issues des forages, conjointement avec les informations géologiques provenant des modèles tridimensionnels, ont servi à établir des variogrammes et des modèles de continuité spatiale. Cette démarche a permis d'aboutir à une estimation quantitative des réserves de fer présentes dans le gisement. Un total de trente forages a été réalisé sur une superficie d'un kilomètre carré. Ces données de forages ont été cruciales pour calculer un volume du gisement de l'ordre de 25 000 000 de mètres cubes, compte tenu d'une densité moyenne du gisement de 4 500 kg/m³ et d'une teneur moyenne de 40%. Cette estimation a conduit à une valeur de ressources ferreuses avoisinant les quarante millions (40 000 000) de tonnes. Étant donné que le minerai se trouve à une profondeur relativement accessible en surface, l'option d'une exploitation à ciel ouvert se présente comme une alternative envisageable et attrayante. Ce type d'exploitation implique l'extraction du minerai à partir de vastes fosses découvertes, une approche économiquement viable lorsque les ressources minérales sont situées près de la surface.

Mots clés : Modélisation, caractéristiques géologiques, Bekisopa, krigeage, variogramme.

Abstract

This study aims to carry out an in-depth analysis of the geology of the iron deposit in question and to explore its exploitation potential. By combining field observations, drilling operations, geological analyzes and the use of modeling tools, our intention is to achieve an in-depth understanding of the composition, distribution and geological characteristics of the iron deposit of Bekisopa discovered by H. Besairie in 1933. The evaluation of iron reserves was carried out by applying geostatistical methods, in particular kriging. Data from drilling, together with geological information from three-dimensional models, were used to establish variograms and spatial continuity models. This approach made it possible to arrive at a quantitative estimate of the iron reserves present in the deposit. A total of thirty boreholes were carried out over an area of one square kilometer. These drilling data were crucial to calculate a volume of the deposit of around 25,000,000 cubic meters, taking into account an average density of the deposit of 4,500 kg/m³ and an average grade of 40%. This estimate led to a value of ferrous resources of around forty million (40,000,000) tonnes. Given that the ore is at a relatively accessible depth on the surface, the option of open pit mining presents itself as a feasible and attractive alternative. This type of mining involves extracting ore from large open pits, an economically viable approach when mineral resources are located near the surface.

Keywords: Modeling, geological characteristics, Bekisopa, kriging, variogram.

*Auteur correspondant : Robijaona Rahelivololoniaina Baholy, (robijob11@gmail.com), Tél. : +261331508959 ;

Reçu le 12/10/2023; Révisé le 18/11/2023 ; Accepté le 26/12/2023

<https://doi.org/10.59228/rcst.023.v2.i4.56>

Copyright: ©2023 Rakotonirina et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

L'exploration et la caractérisation des gisements minéraux revêtent une importance cruciale dans le développement économique et industriel d'une région. Les ressources minérales, telles que les dépôts de fer, constituent des atouts essentiels pour les secteurs de l'industrie sidérurgique et de la production d'énergie. Dans ce contexte, notre étude se concentre sur la modélisation géologique et l'estimation des réserves d'un gisement de fer prometteur situé dans la commune de Tanamarina, Fokotany Bekisopa, au cœur du District d'Ikalamavony, Région Haute Matsiatra.

Découvert par H. Besairie en 1933 lors des premiers levés de reconnaissance, le gîte de Bekisopa a suscité un intérêt précoce pour ses riches ressources minérales. Cependant, ce n'est qu'en 1955 qu'une première étude détaillée du site a été entreprise par A. Emberger, jetant ainsi les bases de la compréhension géologique du gisement (Fournie, 1962).

L'importance de cette étude réside dans sa capacité à fournir des données géologiques précises et à valoriser les ressources minérales disponibles. Les résultats de la modélisation géologique ont un impact significatif sur la planification de l'exploitation minière, la gestion des réserves et l'optimisation des opérations. En combinant des données géologiques détaillées, des techniques de modélisation avancées et une analyse économique, nous aspirons à contribuer aux efforts de développement durable de la région en exploitant au mieux les ressources minérales tout en minimisant les impacts environnementaux (Dowd, 2015; Jaotombo, 2007; Golden Software, 2002).

Cette étude est structurée en plusieurs sections clés, chacune visant à fournir une vision holistique du gisement de fer à Bekisopa. Dans la section suivante, nous explorerons les méthodologies utilisées. Suivi de l'analyse des données de forage et des caractéristiques géologiques du gisement. Nous discuterons ensuite des résultats obtenus lors de la collecte de donnée, les forages et la modélisation du gisement (Rasolomanana & Rambolamanana, 2006). Enfin, nous discuterons ces résultats en soulignant l'impact potentiel de cette recherche sur l'industrie minière et le développement économique local.

2. Méthodologies

La caractérisation approfondie du gîte de fer à Bekisopa repose sur l'application rigoureuse de méthodologies scientifiques et techniques avancées. Cette section détaille les principales méthodes

utilisées pour collecter, analyser et interpréter les données géologiques, ainsi que pour modéliser le gîte en trois dimensions.

2.1. Collecte des données de terrain

La première étape de notre méthodologie a impliqué une collecte approfondie de données de terrain. Des observations géologiques directes ont été menées pour identifier les caractéristiques minéralogiques et structurales du gîte (Rasoamahenina, 1971).

2.2. Forages

Trente (30) forages ont été réalisés dans la zone d'étude, divisée en quatre profils distincts. Chaque forage a permis de recueillir des échantillons de sol et de roche à différentes profondeurs. Les informations obtenues à partir de ces forages ont fourni des données essentielles sur la distribution verticale des formations géologiques et des concentrations minérales.

2.3. Modélisation géologique

Les données de terrain et de forage ont été intégrées dans des logiciels de modélisation géologique avancés. QGIS a été utilisé pour la cartographie géologique et spatiale, tandis que Google Earth a servi à la visualisation et à l'interprétation des images satellitaires. Le logiciel Surfer a joué un rôle central dans la modélisation en trois dimensions du gîte (Porwal & Carranza, 2011 ; Nirianarijaona, 2016). La modélisation géologique en 3D permis de construire une représentation visuelle et détaillée du gîte de fer à Bekisopa (Golden Software, 2002).

2.4. Estimation du gisement

Les échantillons collectés ont soumis à des analyses géochimiques pour déterminer la teneur en fer. Ces données ont été essentielles pour évaluer le potentiel économique du gîte et pour estimer les réserves minérales. La variation de la teneur en fer à travers les forages a fourni des informations clés sur la distribution du minerai.

En combinant ces méthodologies, notre étude a pu fournir une compréhension complète et détaillée du gîte de fer à Bekisopa. Les informations obtenues ont un impact direct sur la planification de l'exploitation, la gestion des réserves et les décisions économiques liées à l'exploitation minière (IRME, 2020 ; Jaotombo, 2007 ; Golden Software, 2002).

3. Résultats

Les trente (30) forages réalisés dans la zone d'étude et les données collectés ont fourni des

données géologiques précieuses, révélant des informations cruciales sur la composition, la distribution et les caractéristiques du dépôt minéral. Cette section présente un aperçu des principaux résultats obtenus.

3.1. Caractéristiques des formations géologiques

Dans l'ensemble, la zone du gisement est constituée par deux séries paramétamorphiques (série gneissico-alumineux et la série calco-magnésienne), des roches granitoïdes, des roches filoniennes parmi lesquelles les plus fréquentes les pegmatites, roches basiques et ultrabasique serpentinisées, et des formations superficielles (latérites, éluvions, alluvions). Notant que la série gneissico-alumineux appartient au système Androyen, groupe d'Ampandranda. La série calco-magnésienne est attribuée au Vohiboryen, groupe du Vohimena (Rasoamahena, 1971; Besairie, 1959; Rasetraharison, 2010).

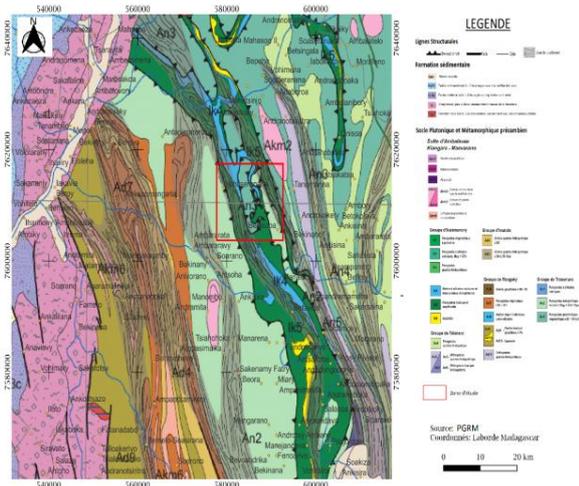


Figure 1. Carte géologique de Bekisopa

Source : PRGM (2012)

Les échantillons recueillis à différentes profondeurs ont révélé une variété de formations géologiques dans le gîte de fer à Bekisopa. Parmi celles-ci, les gneiss à biotite, sillimanite, cordiérite, les cipolins, les quartzites, les amphibolites et les pyroxénites (Fournie, 1961 ; Rasetraharison, 2010).

3.2. Forages

La zone d'étude s'étend entre les coordonnées géographiques suivantes : longitude 586400 E à 587000 E et latitude 7608600 N à 7608000 N. Elle englobe une superficie d'environ 900 000 m², soit à peu près de 1 km² de territoire exploré en profondeur

pour révéler les secrets de son potentiel minéral (AKO Resource, 2022).

Voici sur la figure 2 les trente (30) forages réalisés divisés en quatre (4) profils.

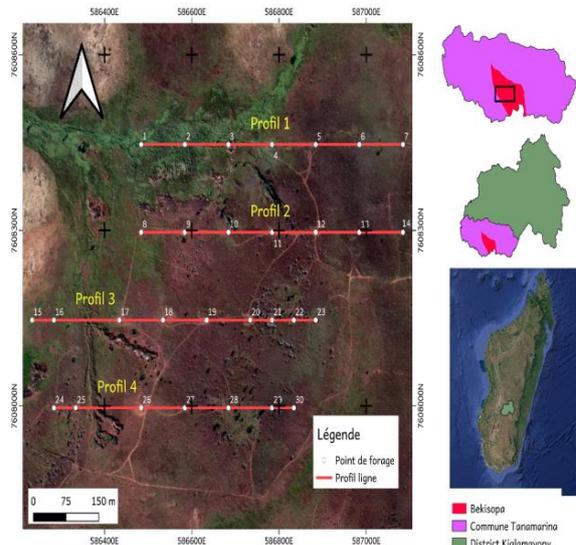


Figure 2. Localisation des forages

Source : Akora Resources (2022)

Chaque forage a été réalisé à une profondeur de 200 mètres, permettant d'explorer les strates géologiques sous la surface et de déterminer la variation des formations minérales en fonction de la profondeur.

3.3. Distribution de la Magnétite

La minéralisation stratiforme à magnétite a été identifiée dans plusieurs échantillons de forage. La présence de magnétite dans les formations géologiques indique un potentiel de concentration en fer significatif, ouvrant la voie à des réserves minérales potentiellement importantes (Fournie, 1961 ; Rasetraharison, 2010).

3.4. Variation de la teneur en Fer

Les analyses géochimiques des échantillons ont révélé une variation de la teneur en fer à travers les forages (figure 3).

Les valeurs de teneur en fer ont été enregistrées dans une fourchette allant de 5 % à 65 % (AKO Resource, 2022), mettant en évidence la diversité des concentrations minérales dans différentes parties du gîte.

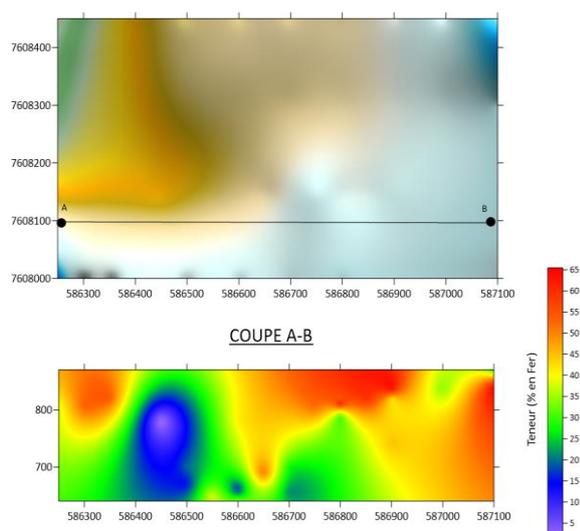


Figure 3. Coupe montrant la variation du teneur du gisement

3.5. Profil stratigraphique

Les données des forages ont permis de construire un profil stratigraphique du gîte de fer à Bekisopa (figure 4) (AKO Resource, 2022).

Cette séquence stratigraphique offre un aperçu visuel des différentes couches de roche et des variations géologiques verticales, ce qui est essentiel pour comprendre la structure géologique du gîte.

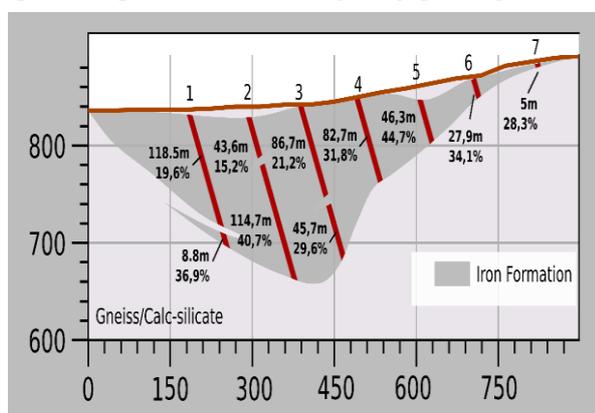


Figure 4. Coupe lithographique du profil 1

3.6. Modélisation géologique

Nous avons utilisé le logiciel Surfer pour créer notre modèle géologique en 3D. Surfer est un outil puissant qui permet de générer des représentations visuelles réalistes à partir de données géologiques et géospatiales (Golden Software, 2002).

Une étape cruciale de la modélisation en 3D a été l'interpolation spatiale des données. Pour obtenir une distribution continue des propriétés géologiques entre les points de forage, une interpolation par kriging a été utilisée dans le logiciel Surfer. Cette

technique géostatistique a permis d'estimer les valeurs inconnues en se basant sur la variabilité spatiale des données mesurées (Jaotombo, 2007; Golden Software, 2002).

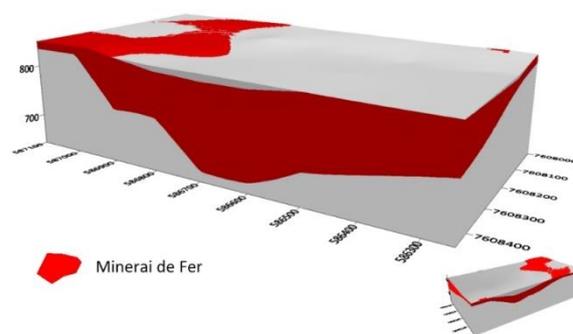


Figure 5. Modélisation géologique du gisement

3.7. Validation et utilisation

Le modèle géologique en 3D a été validé en le comparant avec les données de forage et les observations de terrain (Golden Software, 2002). Une fois validé, le modèle a été utilisé pour des analyses supplémentaires, telles que l'estimation des réserves minérales, la planification minière et la simulation de scénarios d'exploitation.

3.8. Volume du gisement

L'utilisation du logiciel Surfer a été fondamentale pour l'estimation du gisement de fer à Bekisopa, en particulier pour déterminer la distribution de la teneur en fer à travers la zone d'étude (Golden Software, 2002). En utilisant la teneur en fer interpolée et le modèle géologique en 3D généré dans Surfer, des calculs volumétriques ont été réalisés pour estimer la quantité totale de minerai de fer dans le gisement. Les calculs ont pris en compte les dimensions géométriques spécifiques de la zone d'étude.

Volumes	
Z Scale Factor:	1
Total Volumes by:	
Trapezoidal Rule:	25428645.879202
Simpson's Rule:	25429295.598622
Simpson's 3/8 Rule:	25429220.864542
Cut & Fill Volumes	
Positive Volume [Cut]:	25429056.062889
Negative Volume [Fill]:	0
Net Volume [Cut-Fill]:	25429056.062889

Figure 6. Volume du gisement

Grâce à cette méthode, nous avons pu obtenir une estimation précise du volume de minerai présent.

L'estimation du gisement de 25 000 000 mètres cubes de minerai de fer a été calculée. L'utilisation du logiciel Surfer pour l'interpolation de la teneur en fer a été un élément clé dans l'estimation du gisement de fer à Bekisopa. Cette méthodologie a permis de fournir une évaluation solide du volume de minerai présent dans le gîte, ce qui a des implications significatives pour la gestion et l'exploitation de cette ressource minérale stratégique.

3.9. Estimation du gisement

Pour estimer la quantité de tonnes de fer dans le gisement à Bekisopa, en utilisant une densité du minerai de 4500 kg/m³ (AKO Resource, 2022), un volume de gisement de 25 000 000 m³ et une teneur moyenne de 35% (Besairie, 1959), nous pouvons utiliser la formule suivante :

$$\text{Quantité de tonnes de fer} = \text{Volume du minerai (m}^3\text{)} \times \text{Teneur} \times \text{Densité du minerai (kg/m}^3\text{)} / 1000$$

En insérant les valeurs données :

$$\text{Quantité de tonnes de fer} = 25\,000\,000 \times (35/100) \times 4\,500 \text{ kg/m}^3 / 1\,000$$

Calcul :

$$\text{Quantité de tonnes de fer} = 196\,750\,000\,000 \text{ kg} / 1000 = 40\,000\,000 \text{ tonnes}$$

Donc, avec une densité de 4 500 kg/m³ et un volume de gisement de 25 000 000 m³, le gisement de fer à Bekisopa contiendrait environ 40 000 000 tonnes de fer.

4. Discussion

L'étude de la modélisation géologique et de l'estimation du gisement de fer à Bekisopa a fourni des informations précieuses sur la distribution, la composition et le potentiel économique de cette ressource minérale stratégique. Les résultats obtenus à partir des forages, de l'interpolation spatiale, de la modélisation en 3D et des calculs volumétriques ont jeté les bases d'une évaluation approfondie du gîte de fer. Dans cette section de discussion, nous abordons les principales conclusions de cette étude et leur importance pour l'exploitation minière et le développement régional.

4.1. Importance de la modélisation géologique

La modélisation géologique en trois dimensions a permis de visualiser la morphologie, la stratigraphie et la distribution des formations géologiques dans le gîte de fer à Bekisopa. Cette représentation visuelle a fourni des informations cruciales pour la caractérisation précise du gisement, en identifiant les zones de haute teneur en fer et en facilitant la planification minière. La modélisation a également aidé à comprendre la structure géologique complexe du gîte, ce qui est essentiel pour une exploitation optimale (Jaotombo, 2007).

4.2. Précision de l'estimation du gisement

L'estimation du gisement, réalisée en utilisant des données de forage, des interpolations spatiales et des calculs volumétriques, a abouti à une estimation du volume de 25 000 000 m³ de minerai de fer à Bekisopa. Cette estimation a ensuite été convertie en tonnes de fer en utilisant la densité spécifique du minerai. Ces calculs ont fourni une base solide pour évaluer la quantité de fer disponible dans le gîte. Cependant, il est important de noter que toute estimation de gisement comporte un degré d'incertitude, qui doit être pris en compte dans la planification future (Dowd, 2015 ; Rasetraharison, 2010 ; Fournie, 1961).

4.3. Potentiel économique et implications

L'estimation du gisement de fer à Bekisopa, tant en volume qu'en tonnage, a des implications économiques significatives. Avec une estimation de près de 197 000 000 tonnes de minerai fer, le gîte présente un potentiel important pour l'exploitation minière. Cette ressource minérale peut jouer un rôle crucial dans le développement régional, en générant des revenus, en créant des emplois et en stimulant l'économie locale (IRME, 2020).

4.4. Planification minière et développement durable

Les résultats de cette étude fournissent des informations essentielles pour la planification minière future à Bekisopa. Une exploitation bien planifiée et durable peut maximiser la récupération du minerai tout en minimisant les impacts environnementaux et sociaux. La modélisation géologique en 3D offre une base solide pour concevoir des stratégies d'extraction, de traitement et de gestion des résidus (Daso, 1978).

4.5. Plan de gestion environnementale

L'exploitation minière, bien que porteuse d'opportunités économiques, doit être gérée avec responsabilité environnementale. Nos résultats de modélisation géologique peuvent également informer la mise en place d'un plan de gestion environnementale pour atténuer les impacts négatifs potentiels. Cela pourrait inclure des mesures de restauration du site, la réduction des émissions de poussière et des stratégies de préservation de l'écosystème local (Randriambao M., 2014).

4.6. Limitations et voies futures

Il convient de noter que cette étude présente certaines limitations, notamment en ce qui concerne l'incertitude inhérente aux estimations de gisement. Des études géotechniques plus approfondies, des tests métallurgiques et des évaluations économiques détaillées pourraient être envisagés pour affiner davantage les estimations et guider les décisions d'exploitation. De plus, l'extension de la zone de recherche pourrait potentiellement augmenter les réserves.

5. Conclusion

L'étude de la modélisation géologique et de l'estimation du gisement de fer à Bekisopa a fourni un aperçu approfondi de la distribution, de la composition et du potentiel économique de cette ressource minérale. Grâce à l'utilisation de données géologiques, d'analyses géochimiques et d'outils de modélisation avancés, nous avons pu caractériser avec précision le gîte de fer et évaluer sa viabilité pour une exploitation future. Les résultats de cette étude ont des implications significatives pour l'industrie minière, le développement régional et la gestion durable des ressources naturelles.

La modélisation géologique en trois dimensions a joué un rôle essentiel dans la visualisation et la compréhension de la structure géologique complexe du gisement de fer. Cette approche a permis d'analyser la distribution des formations géologiques, la morphologie du gîte et la variabilité de la teneur en fer. Grâce à cette modélisation, nous avons pu mieux caractériser le gîte, identifier les zones à haute teneur en fer et prendre des décisions éclairées pour la planification minière.

L'estimation du gisement, basée sur des données de forage, des interpolations spatiales et des calculs volumétriques, a abouti à une évaluation solide de la quantité de minerai de fer disponible à Bekisopa. Avec une estimation de près de 40 000 000 tonnes de

fer, le gîte présente un potentiel économique considérable. Cependant, il est important de garder à l'esprit les incertitudes inhérentes à toute estimation de réserves minérales.

Le gîte de fer à Bekisopa offre des opportunités économiques substantielles pour la région. L'exploitation future de ces réserves pourrait stimuler l'économie locale, créer des emplois et générer des revenus. Cependant, il est essentiel d'adopter une approche de développement durable, en tenant compte des considérations environnementales, sociales et économiques pour assurer un bénéfice à long terme pour la communauté et l'environnement.

Les résultats de cette étude sont d'une grande importance pour la planification minière. La modélisation géologique en 3D fournit une base solide pour élaborer des stratégies d'extraction, de traitement et de gestion des résidus. Une planification minutieuse et responsable est essentielle pour maximiser la récupération du minerai tout en minimisant les impacts environnementaux et sociaux.

Les conclusions de cette étude offrent des pistes pour des recherches futures. Des études géotechniques plus approfondies, des tests métallurgiques et des analyses économiques plus détaillées pourraient contribuer à affiner davantage les estimations de gisement et à optimiser la planification minière.

En somme, l'étude de la modélisation géologique et de l'estimation du gisement de fer à Bekisopa ouvre la voie à un développement minier durable et éclairé. Les résultats obtenus constituent un socle solide pour guider les décisions futures en matière d'exploitation, de gestion des ressources et de développement économique, tout en respectant les valeurs environnementales et sociales de la région.

Références bibliographiques

- Bibby, P. (2022). *Raport Mineral Resource and Reserve*. Melbourne, Australasian Institute of Mining and Metallurgy (MAusIMM).
- Besairie, H. (1959). *Rapport annuel du service géologique pour 1959*.
- Dowd, P. A. (2015). *Mineral Resource and Reserve Estimation: Guide to Good Practice*. Melbourne. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Daso, A. A. H. (1978). *Le gisement de fer de Bekisopa*. Antananarivo, [Mémoire de fin d'études, Etablissement d'Enseignement Supérieur Polytechnique d'Antananarivo].

- Fournie, L. (1961). *Géologie de la région Ikalavony-Ampandramaika-Bekisopa, Centre-Sud de Madagascar*. Antananarivo, BRGM.
- Fournie, L. (1962). *Le gisement de fer de Bekisopa* [Rapport de fin de travaux]. Antananarivo, BRGM.
- Porwal, A. & Carranza, E. J. M. (2011). *GIS-based Analysis of Mineral Prospectivity*. New Delhi. CRC Press.
- Rasoamahanina, J.A. (1971). *Etudes complémentaires du gisement de fer de Bekisopa*. Antananarivo. Bulletin de l'Académie Malgache.
- Rasoamahanina, J.A. (1978). *Les ressources en fer de Madagascar et réflexions sur les aptitudes sidérurgiques des minerais*. Bulletin de l'Académie Malgache.
- Dubois, O. & Stenger, A. (2015). *L'évaluation des impacts environnementaux: Concepts et méthodes*. Versailles, Editions Quae.
- Jaotombo, N. (2007). *Utilisation de la Géostatistique dans l'évaluation des réserves du gisement de fer de Bekisopa* [Mémoire de fin d'études, Etablissement d'Enseignement Supérieur Polytechnique d'Antananarivo].
- Englund, E. & Sparks, A. (1988). *GEOEAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) User's Guide*. Las Vegas, NTRL.
- Fournie, L. (1962). *Le gisement de fer de Bekisopa* [Rapport de fin des travaux]. Antananarivo, BRGM.
- Rasolomanana, E. & Rambolamanana, G. (2006). *Concepts et méthodes de la géostatistique, Rappels théoriques sur la géostatistique, Application de l'outil géostatistique pour l'évaluation du gisement d'Ambatovy*. Antananarivo, IOGA.
- Golden Software. (2002) Surfer (Version 8.0) [Logiciel]. Golden Software. <https://www.goldensoftware.com/>
- Nirianarijaona, V. A. (2016). Hiérarchisation de gisements de fer de Madagascar par analyse multicritères Electre tri. [Mémoire de Master, Faculté des Science ANTANANARIVO].
- Rasetraharison, M. T. (2010). *Monographie des gisements de fer de Madagascar* [Mémoire de DEA, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo].
- Roig, J. Y. & Delor C. *Carte géologique de la république de Madagascar (1 :1000000)*. 2012, BRGM.