

PROBLÉMATIQUE DE LA RÉHABILITATION DES SOLS POST-MINE AU MALI : CAS DE LA COMMUNE RURALE DE MORILA

Moussa Bocoum, Doctorant, Institut de Pédagogie Universitaire de Bamako (Mali).

Hamadoun Traoré, Bouramadiè Coulibaly

Résumé

le Mali possède d'abondantes ressources minérales. Depuis 1992, il connaît une forte progression de l'exploitation d'or de type industriel qui le classe au 3^e rang producteur africain après l'Afrique du Sud et le Ghana, avec une production estimée en 2023 à 67,7 tonnes. La Commune rurale de Morila est située à 310 km de Bamako avec une population estimée à 26100 habitants en 2022 et abrite une des plus grandes mines industrielles du pays à savoir Firefinch Limited. La présente étude a pour objectif d'analyser les implications environnementales (sol) et sociales associées à la cessation des activités minières aurifères au Mali en vue de formuler des approches de gestion durable après la fermeture, favorisant un développement local inclusif et respectueux de l'environnement. La méthodologie repose sur des enquêtes qualitatives et quantitatives menées auprès des représentants de la population, des élus locaux, des chefs de villages, des travailleurs de la mine et autres acteurs de la société civile aussi les analyses d'échantillons de sol et des cartographies de la dynamique d'occupation des sols ont été élaborées. Les résultats obtenus nous ont permis de savoir que d'importantes actions sont menées dans le cadre de la restauration des sols. Le choix des plantes a porté sur des espèces locales. Les griefs enregistrés sont entre autres une faible implication des populations locales dans le but de pérenniser les actions initiées.

Mots clés : Morila, or, pollutions Réhabilitation, sols

Abstract:

Mali has abundant mineral resources. Since 1992, the country has seen strong growth in industrial gold mining, making it Africa's 3rd largest producer after South Africa and Ghana, with production estimated at 67.7 tonnes in 2023. The rural municipality of Morila is located 310 km from Bamako, with an estimated population of 26,100 in 2022, and is home to one of the country's largest industrial mines, Firefinch Limited. The purpose of this study is to analyse the environmental (soil) and social implications associated with the cessation of gold mining activities in Mali, with a view to formulating sustainable post-closure management approaches that promote inclusive, environmentally-friendly local development. The methodology is based on qualitative and quantitative surveys of representatives of the population, local elected representatives, village chiefs, mine workers and other civil society players, as well as analyses of soil samples and maps of land use dynamics. The results show that significant action is being

taken to restore the soil. The choice of plants was based on local species. One of the complaints was that local people were not sufficiently involved to ensure the sustainability of the measures taken.

Keywords : gold, Morila, pollution, rehabilitation, soil.

REVUE TOGUNA-USAGE RESTREINT

INTRODUCTION

L'exploitation aurifère est une activité économiquement lucrative qui, malheureusement est associée à plusieurs défis environnementaux et sociaux à relever. Au Mali, un État situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest dispose d'importantes réserves aurifères dont l'exploitation joue un rôle crucial dans l'économie. L'environnement en général et les sols en particulier sont toujours fortement endommagés à cause de cette exploitation minière. Les activités minières, bien que vitales pour l'économie malienne, entraînent souvent une dégradation des paysages, un affaiblissement des écosystèmes et des risques environnementaux persistants. L'élaboration de plans de relance post-extraction aurifère efficaces et appropriés est donc essentielle pour réhabiliter les sites miniers abandonnés, minimiser les impacts négatifs sur l'environnement et faciliter la transition vers une utilisation durable des terres.

L'or est le premier produit d'exportation du Mali depuis 1999, date à laquelle il a dépassé le coton.

En 2021, on comptait 339 titres de recherche en cours de validité dans le pays, 14 autorisations d'exploration ont été approuvées, mais aucun de ces permis n'est accompagné d'investissements ou d'activités significatives sur le terrain. Si la production d'or représentait moins de 10% du produit intérieur brut en 2021, elle compte pour presque un quart du revenu de l'État (564,5 milliards de francs CFA) soit en environ 920 millions de dollars et 70% des exportations du pays (Rapport annuel sur la production aurifère 2022). En matière de politique aurifère, le Gouvernement du Mali se concentre essentiellement sur l'activité industrielle, qui représente une partie importante de ses revenus, et vise essentiellement à attirer les investisseurs internationaux.

Plusieurs pays, surtout situés en Afrique ont reçu comme héritage de fermetures non planifiées, des travaux non sécuritaires et des sites non remis en état. Cette situation se produit dans les pays en développement surtout lorsqu'il y a un manque de financement disponible au moment de la fermeture (Banque mondiale et Société financière internationale, 2002).

Dans plusieurs cas, où les mines sont situées dans les régions éloignées des centres urbains, l'entreprise minière est le principal fournisseur économique de la région en procurant de l'emploi, des revenus et des services aux habitants locaux. Lorsqu'une mine est appelée à fermer ses portes, les impacts sur le bien-être des communautés situées aux proximités sont encore plus significatifs. Ses impacts sont d'ailleurs visibles dans les pays en développement où il y a peu ou pas d'économie alternative et où les gouvernements et les communautés manquent de ressources afin de les mettre en place.

La restauration et la fermeture responsable d'un site minier impliquent le retrait de tous les équipements et produits dangereux, le nivellement des terres et les mesures nécessaires pour éviter toutes sources de pollution possibles.

Au cœur de la problématique de cet article est d'analyser les pratiques mises en place par les sociétés minières pour restaurer les sols après la phase d'exploitation aurifère. Il s'agit pour nous de contribuer à l'amélioration des choix opérés après avoir clairement identifier des difficultés.

I. MATERIELS ET METHODES

La conduite d'une recherche sur les pratiques de restauration des sols des sites miniers aurifères après la clôture au Mali nécessite une méthodologie rigoureuse et des outils appropriés pour garantir une collecte de données précises et fiables. Dans le sous-titre dédié aux "Matériels et méthodes", une description exhaustive des différentes approches et techniques utilisées pour mener à bien cette étude est fournie. En effet, il a été mené une analyse documentaire approfondie dans un premier temps. Des visites de terrain, des entretiens, des analyses d'échantillons au laboratoire et le traitement des images satellitaires ont été réalisés. Dans ce cadre des entretiens semi-directifs ont été menés avec une diversité d'acteurs engagés dans les activités minières au Mali, notamment la direction environnementale de la mine (1), les ONG, les communautés locales (50) et les autres agents (40) de la mine de Morila.

Pour la population locale estimée en 2022 à 26100 habitants à Sanso, nous avons appliqué la formule $n = (z^2 * p * (1-p)) / (e^2)$ pour les plus 18 ans à l'implantation de la mine en 2000 soit plus de 42 ans à nos jours $n = (1.96^2 * 0.3 * (1-0.3)) / (0.05^2) \approx 176$

- **n** est la taille de l'échantillon
- **z** est le niveau de confiance (exprimé en écart-type)
- **p** est la proportion de la population cible estimée possédant les caractéristiques recherchées
- **(1-p)** est la proportion de la population cible estimée ne possédant pas les caractéristiques recherchées
- **e** est la marge d'erreur maximale souhaitée

Nous avons eu un total 176 locaux dans les résultats pour l'enquête, mais en tenant compte des décès, migrations et autres nous sommes allés sur la base des (63) enquêtés sur le terrain seul (51) personnes ont bien voulu répondre à notre questionnaire

Ces entretiens ont permis de recueillir des données quantitatives sur les pratiques habituelles de clôture et de restauration, ainsi que sur les différents enjeux sociaux et environnementaux qui

y sont liés. En complément des entretiens, il sera envisageable de mener des enquêtes structurées auprès des populations locales vivant à proximité des sites miniers concernés.

Les données quantitatives collectées sont utilisées pour approfondir l'analyse des implications sociales liées à la cessation des opérations minières d'or. En plus des entretiens et des enquêtes, des observations directes sur le terrain ont été réalisées pour évaluer la situation actuelle des sites miniers, les pratiques de réhabilitation en cours et les impacts environnementaux des activités minières. Souvent les populations enquêtées sont dans la passion ce qui nous a poussés à procéder à des analyses d'échantillons de sol et de cartographies dynamique qui suit

La collecte et l'analyse de données spatiales sont essentielles pour la cartographie de la dynamique d'occupation des sols, ainsi que pour l'évaluation des impacts de l'activité minière sur les écosystèmes locaux, notamment en ce qui concerne des problématiques telles que la déforestation, la perte de biodiversité et la fragmentation des habitats. Plusieurs sources de données ont été mises à profit dans le cadre de cet article. Il s'agit des données satellitaires de Landsat collectées via Earth explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) sur le site web de United States Geological Survey. Pour les besoins de l'étude, des images de 1990, 2000, 2010 et 2020 ont été utilisées dans la perspective de mieux appréhender les changements intervenus dans le temps et dans l'espace. Elles ont été choisies en tenant compte de leur qualité et de leur période d'acquisition. La résolution spatiale de ces images est de 30 m pour les images de Landsat. Les scènes retenues ont été prises entre le mois de d'octobre, période correspondante à un faible taux de couverture nuageuse et avec une bonne expression de la végétation liée à la fin récente de la saison pluvieuse (Y.Y. Karembé, 2018). Les données de Landsat utilisées dans le cadre de cette étude sont présentées dans le tableau de la figure n°1.

Figure n°1 : Tableau des caractéristiques des images Landsat utilisées

Types	Format	Résolution	Date d'acquisition	Source
Landsat 4-5 (TM)	TIFF	30 m	11/10/1990	GLCF
Landsat 7 (ETM+)	TIFF	30 m	11/10/2000	GLCF
Landsat 5 (TM)	TIFF	30 m	11/10/2010	GLCF
Landsat 8 (OLI)	TIFF	30 m	11/10/2020	GLCF

Source : B. Coulibaly, 2024

La réalisation de cette étude a nécessité l'utilisation d'un certain nombre de matériels parmi lesquels :

- L'ordinateur PC, est utilisé durant toutes les étapes de l'élaboration de ce travail, notamment pour le traitement des données satellitaires.

- GPS Garmin 64 a été utilisé dans cadre de la validation des images classifiées. Ce GPS a permis de faire le repérage des coordonnées de points d'échantillon.

Le travail a été concrétisé avec utilisation de logiciels de traitement d'image satellitaire, de cartographie et de Système d'Information Géographique (SIG) :

- **ENVI**

ENVI (Environnement for Visualizing Images) est un logiciel professionnel de la société « EXELIS » permettant la visualisation, le traitement, l'analyse, et la présentation de nombreux types d'images numériques, dont les images satellitaires. Pour ce travail, il été utilisé pour traiter et classifier les images Landsat de 1990, 2000, 2010 et 2020.

- **ArcGIS**

ArcGIS est une suite de logiciels d'information géographique (ou logiciels SIG) développés par la société américaine Esri (Environmental Systems Research Institute). Il a été utilisé dans le cadre de ce travail pour la mise en page de la carte thématique.

La classification de l'occupation des sols à l'aide d'images satellites peut être considérée comme une combinaison entre le traitement d'image numérique et les techniques de classification pour analyser l'occupation des sols (B.A. Dembélé, 2019). Le traitement des images est réalisé pour l'amélioration de la qualité de celle-ci, tandis que la classification est un processus d'attribution des pixels d'une image à des classes d'occupation des sols (R.G. Pontius, 2000).

Cependant, de nombreuses méthodes sont proposées et certaines telles que l'analyse des images et la reconnaissance des échantillonnages sont appliquées. En effet, il y a deux méthodes de classification couramment utilisées : la classification non supervisée et la classification supervisée. Dans ce travail, la classification supervisée a été utilisée.

Les images à l'état brut ont d'abord été importées dans le logiciel ENVI version 5.3 pour faire la composition colorée RVB (rouge, vert, bleu) avec trois (3) canaux différents. Pour les Landsat TM 1990, ETM+ 2000 et TM 2010, les canaux 4-3-2 ont été choisis. Par contre, les bandes 5-4-3 ont été retenues pour la composition colorée de Landsat OLI (2020).

Au niveau de chaque image, le choix a toujours porté sur la composition jugée fiable, susceptible de comporter distinctement les classes d'occupation des sols. Les objets, en fonction de la différence qui existe entre leurs réflectances. Par conséquent, ils apparaissent différemment sur la composition colorée. Le traitement et l'analyse de la composition colorée pour cartographier et suivre des objets géographiques requièrent l'emploi de techniques de traitement d'image. Plus particulièrement, on passe des données brutes ensembles de pixels à des données plus structurées appelées objets ou régions (B. Coulibaly, 2021). Ces régions sont

définies comme l'ensemble de pixels voisins formant des ensembles homogènes au sens d'un certain critère (même couleur, réponse spectrale, type d'occupation du sol, etc.).

Après la classification des images, viennent d'autres opérations qui rendent la classification beaucoup plus lisse. Il est important de noter, que la méthode supervisée a été utilisée lors de ce travail. Cette méthode permet au logiciel de rassembler tous les pixels qui ont les mêmes réflectances à travers un échantillonnage déterminé par l'utilisateur.

La méthode de classification superposée est la procédure la plus couramment utilisée pour l'analyse quantitative des données de télédétection. On identifie sur l'image des surfaces assez homogènes représentatives des thèmes qu'on souhaite discriminer. Les signatures spectrales de ces surfaces serviront comme références pour classer l'ensemble de l'image en utilisant des algorithmes de classification appropriés (P. G. Gbetkom, 2020). La classification supervisée est basée sur l'idée que l'utilisateur peut définir les pixels d'échantillon de chaque catégorie sur une image. Ces échantillons sont considérés comme les pixels de références pour la classification de tous les autres pixels de l'image (J. Oloukoi, 2012). L'avantage de cette méthode repose sur sa capacité à utiliser les connaissances de l'homme dans le processus de classification, ce qui laisse plus de souplesse pour l'amélioration des résultats. Cependant, elle a quelques inconvénients : un besoin humain important, et la précision du résultat dépend de la connaissance des personnes qui effectuent la classification ainsi que la vérité terrain.

Dans la méthode de classification supervisée, la précision des résultats obtenus dépend de l'algorithme de classification, car plusieurs algorithmes ont été développés et les données finales peuvent différer. Ainsi, le choix de l'algorithme dépend de chaque classification ou d'un domaine spécifique. Pour bien choisir un algorithme de classification, il est important d'évaluer la performance des différents algorithmes de classification. Pour ce travail, l'algorithme du maximum de vraisemblance est mis en évidence.

L'algorithme maximum de vraisemblance (MV) est basé sur la théorie des probabilités bayésiennes. Il est l'un des algorithmes les plus utilisés pour la classification supervisée (D. Traoré, 2019). Il utilise des échantillons pour déterminer les caractéristiques des classes d'occupation des sols, qui deviennent des centres dans l'espace multispectral. Autrement dit, au lieu d'affecter un vecteur spectral à la catégorie dont le centre de gravité est le plus proche, elle se base sur une analyse statistique de la distribution des vecteurs spectraux de l'échantillon pour définir des zones de probabilité équivalente autour de ces centres. La probabilité d'appartenance à chaque classe est calculée pour chaque vecteur spectral et le vecteur est affecté à la classe sur laquelle la probabilité est la plus élevée. Un avantage considérable de cette

méthode est qu'elle fournit pour chaque pixel, en plus de la classe à laquelle il a été affecté, un indice de certitude lié à ce choix.

L'opération de vectorisation de la classification permet une manipulation plus facile de la couche d'occupation des sols. En effet, suite à cette opération, le raster est converti en vecteur et exporté vers le logiciel SIG les opérations de post-traitement (correction des débordements entre les objets, calcul des superficies des classes d'occupation etc.)

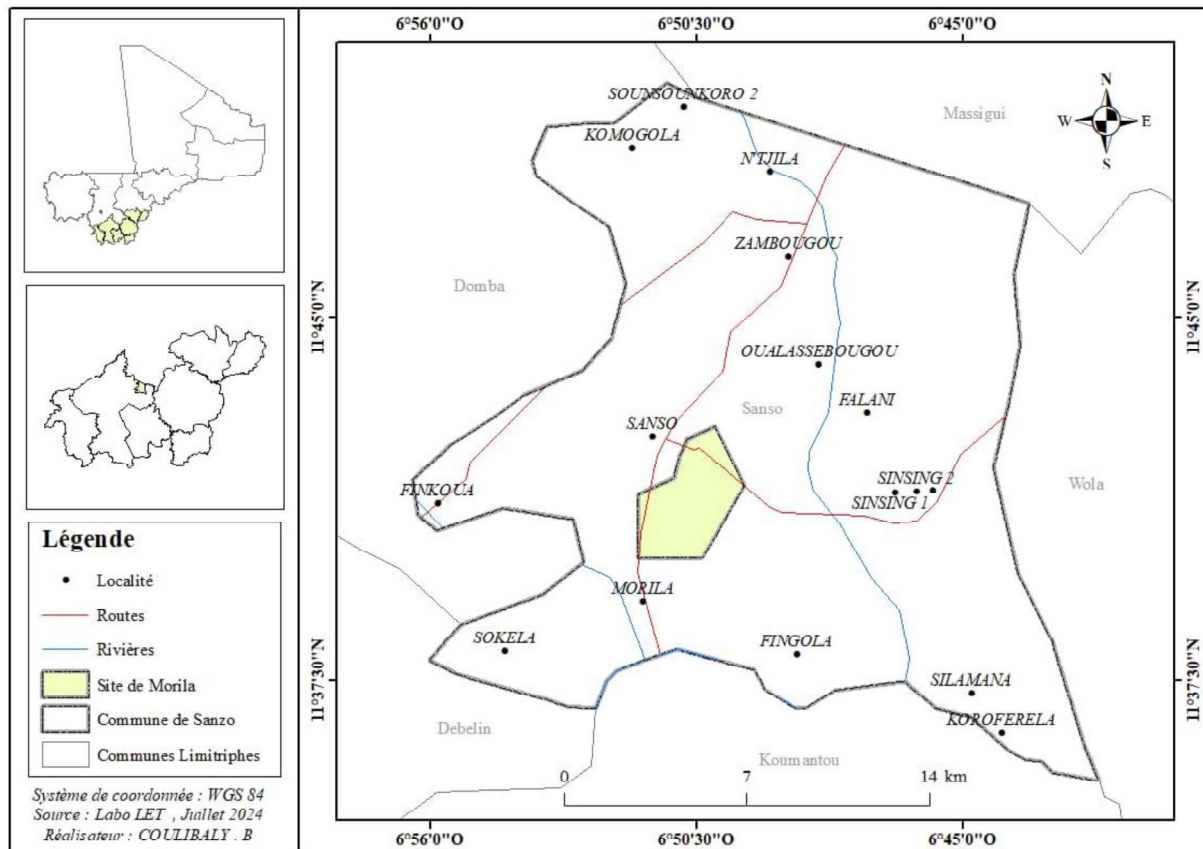
Toute classification d'images satellitaires, sans une réelle vérification sur le terrain, manque de véracité (R.G. Pontius, 2000). Ainsi, en plus de la matrice de confusion qu'offre le logiciel ENVI, une phase de vérité terrain a été faite. Lors de l'enquête sur le terrain, un échantillon de 10 points de chaque classe d'occupation est calculé et intégré dans le GPS de type Garmin 64 pour la vérification. Pour ce faire, l'image de référence a été celle de 2020.

II. RESULTATS

1. Présentation de la zone d'étude

Sanso est située à 310 kilomètres au sud-est de la capitale malienne, latitude ($11^{\circ}43'00''N$) et longitude ($-6^{\circ}51'00''W$), Bamako, avec une population estimée à 22.284 habitants lors du recensement officiel de 2009. En 2022 elle est d'environ 26.100 habitants. Elle dépend administrativement de la région de Bougouni. Elle est constituée de 16 villages : Falani, Fadia, Finkoa, Komogola, Zambougou, Sinsin 1, Sinsin 2, Finkola, N'tjila, Koroferela, Fadia, Sokela, Silamana, Sounbounkoro, Oualassebougou et Morila (figure n°2). Sanso, le chef-lieu de la commune, est le point d'ancrage de cette tradition orale. Selon les entretiens menés auprès des vieux du village sur le terrain, la fondation de Sanso est à rattacher à Samou Bagayoko, un dioula (commerçant) originaire du Kéléyadougou (à 60 km d'Ouélessébougou actuel, au sud de Bamako). Marchand ambulant, du groupe ethnique bambara, de bétail et de noix de kola, Samou s'arrêtait régulièrement à l'endroit de l'actuel quartier de Nérila. Un jour, les esprits lui conseillèrent d'y fonder un village, promis à un bel avenir. La famille des Mariko reste encore aujourd'hui détentrice de ces pouvoirs traditionnels. Le nom du premier quartier fut Nérila, faisant référence à Nérillacoro. Et en reconnaissance pour son ami Samou, Nérillacoro décida de nommer le village Sanso, raccourci du vocable bambara Sakahousseraso (les moutons sont arrivés à la maison). Ce récit est typique des histoires de fondation des villages ; on trouve ce genre de récits souvent dans les traditions orales au sahel (Amselle 1999, Hagberg 2004, Kuba & Lentz 2006). Actuellement, dans la commune de Sanso, la population est majoritairement Bamanan sédentaire. L'activité principale avant l'implantation de la mine était l'agriculture. Actuellement c'est toujours l'agriculture et le commerce qui prédominent les activités.

Figure n°2 : Carte de localisation du site minier de Morila dans la commune de Sanso



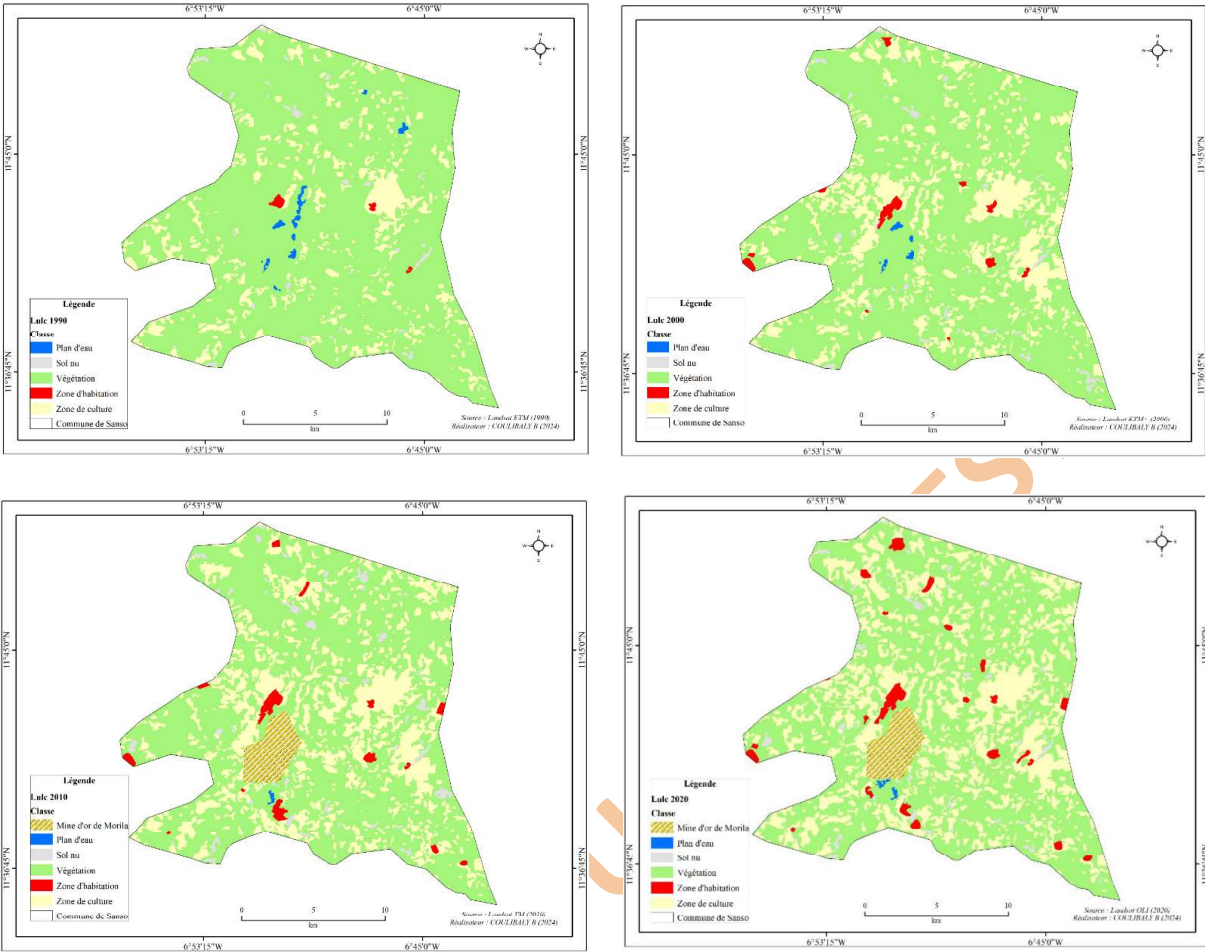
Source : B. Coulibaly, 2024

Il est important de traiter dans cette partie, les dynamiques d'occupation des sols dans l'aire d'étude (figure n°3), les ressentis des populations et les mesures de réhabilitation posées.

2. Dynamique d'occupation des sols de la commune rurale de Sanso entre 1990 et 2020

Les données cartographiques se révèlent précieuses pour notre étude, car elles permettent une comparaison des fluctuations liées à notre analyse.

Figure n°3 : Situation d'occupation des sols dans la commune de Sanso de 1990 à 2020



Source : B. Coulibaly, 2024

Figure n°4 : Tableau de la statistique de la situation d'occupation des sols de Sanso de 1990 à 2020

N°)	Classe	Lulc 1990		Lulc 2000		Lulc 2010		Lulc 2020	
		Sup km²	P%	Sup km²	P%	Sup km²	P%	Sup km²	P%
1	Mine d'or de Morila	0	0.00	0	0.00	12.77	3.26	12.77	3.26
2	Plan d'eau	2.07	0.53	0.84	0.21	0.24	0.06	0.48	0.12
3	Sol nu	3.44	0.88	4.75	1.21	7.43	1.90	5.43	1.39
4	Végétation	335.72	85.75	298.69	76.29	261.51	66.79	241.53	61.69
5	Zone d'habitation	0.94	0.24	3.51	0.90	5.37	1.37	7.92	2.02
6	Zone de culture	49.34	12.60	83.73	21.39	104.21	26.62	123.39	31.51
Total		391.52	100.00	391.52	100.00	391.52	100.00	391.52	100.00

Source : Images Landsat 1990 et 2020

L'analyse des données sur la dynamique d'occupation des sols dans la zone de Morila de 1990 à 2020 a montré plusieurs tendances (figure n°3). En effet, la végétation dominait en 1990, couvrant 335,72 km² ou 85,75% de l'ensemble de la zone. Cependant, au fil des ans, une diminution progressive de la végétation de la région a été observée, car en 2020, elle couvrait 241,53 km², ce qui signifiait une baisse de 24,06% par rapport au début de la période. Parallèlement, la zone de culture a augmenté et a représenté 49,34 km² ou 12,60% de la zone totale en 1990 et 123,39 km² ou 31,51% en 2020. Cette tendance témoigne de la croissance agricole (figure n°4).

La mine d'or de Morila (figure n°5) a été clairement visible dans les données à partir de 2010, occupant une superficie de 12,77 km² et maintenue à un niveau constant de 3,26 % jusqu'en 2020. Cela pourrait refléter le développement de l'exploitation minière dans la région à partir de cette période. On observe également des fluctuations de couverture du sol nu, avec une augmentation jusqu'en 2010 suivie d'une diminution en 2020. Les plans d'eau ont connu une diminution constante de la superficie entre 1990 et 2020, passant de 2.07 km² à 0.48 km² soit de 0.53% à 0.12%.

On observe une croissance continue des zones résidentielles, qui sont passées de 0,94 km² en 1990 à 7,92 km² en 2020. Ce phénomène est attribuable à l'expansion urbaine et à l'accroissement démographique. Ces évolutions dans l'exploitation des sols reflètent les dynamiques socio-économiques et environnementales de la région, notamment l'urbanisation, l'agriculture et l'exploitation minière, qui influent sur l'écosystème régional et la disponibilité des ressources naturelles.

Cette analyse met en évidence la transformation de l'usage des sols à Morila qui depuis l'implantation de la mine a connu un boom économique et démographique, chose qui souligne la nécessité de mettre en place une planification et une gestion durables afin d'harmoniser le progrès économique et la préservation de l'environnement.

Les zones touchées par la réhabilitation sont entre 500 et 1 000 hectares, comprenant des fosses minières, des bassins de résidus et d'autres infrastructures. La revégétalisation est d'environ 300 à 700 hectares.

Figure n°5 : Mine ou carrière d'or de Morila à ciel ouvert



Source : cliché S. Ilboudo, Août 2022

La mine d'or de Morila s'est engagée par écrit dans la protection de la flore et de la faune à travers ses politiques. Elle est également certifiée OSHAS 18001 (Santé, hygiène et sécurité au travail).

3. Les appréciations de la population de Morila

Les populations locales de Morila ont exprimé des opinions diverses sur les actions de réhabilitation des sols entreprises par la mine. Certaines initiatives, comme la création d'une zone agricole post-réhabilitation (agripôle) couvrant 3 000 hectares et visant à soutenir 50 000

habitants, ont été bien accueillies. Ce projet a été mené en partenariat avec le groupe Songhaï et a pour but de favoriser un développement économique durable après la fermeture de la mine. Cependant, des critiques persistent sur la manière dont les ressources générées par la mine ont été utilisées. Certains estiment que les efforts n'ont pas suffisamment répondu aux attentes communautaires en matière de développement socio-économique

Figure n°6 : Tableau de l'appréhension des locaux sur les effets de l'exploitation minière sur l'environnement

Environnement	OUI		NON	
Qualité et quantité eau	42	82,35%	9	17,65%
Qualité air	37	72,55%	14	27,45%
Qualité sol	46	90,2%	5	9,8%
Quantité végétation	47	92,16%	4	7,84%
Quantité faune	38	74,51%	13	25,49%

Source : M.F Bocoum 2024

Les locaux ont laissé libre court à leur pensée sans langue de bois, en exprimant leurs inquiétudes face au départ de la mine, mais surtout les dommages que cette dernière aurait potentiellement causée sur l'écosystème naturel.

La qualité du sol est altérée par la diminution de la fertilité des sols causée par la déforestation et les résidus miniers pour 90,2% de nos cibles. Pour 92,16% il y'a eu dégradation de la végétation naturelle et déboisement même si beaucoup de terrains ont été revégétalisés. La contamination des sols et des eaux souterraines est un problème environnemental majeur (figure n°6).

4. Les différentes opérations de restauration des sols

Dans le cadre de la réhabilitation des sols, plusieurs phases sont à suivre.

- *Reprofilage et stabilisation des sols*

Le volume de sols déplacés se situe entre 2 et 5 millions de m³. Le coût est estimé environ à 4 000 USD/ha, soit 1,5 à 3 millions USD pour les zones reprofilées (Firefinch, 2021).

Figure n°7 : Dépôt de terre végétale sur la halde à terrils nivelée



Source : Cliché N. Diakité, Juin 2017

Les zones critiques stabilisées notamment les pentes représentent environ 30 % de la superficie affectée.

- Amélioration des sols

Les matières organiques sont préconisées (figure n°7) à savoir le compost/fumier avec une utilisation d'environ 20 à 30 tonnes/ha pour enrichir les sols. Le total pour 500 hectares est estimé entre 10 000 et 15 000 tonnes.

Le coût des amendements est de 50 à 100 USD/tonne, soit 500 000 à 1,5 million USD.

Dans le traitement chimique la chaux est appliquée sur 2 à 5 tonnes/ha pour neutraliser l'acidité, ce qui nous ramène à 1 000 ou 2 500 tonnes au total.

Le coût de traitement du traitement est de 500 000 USD selon la mine.

Figure n°8 : Cellule de colonne contenant les roches de la halde à terril, les rejets du parc à boue, la terre végétale, etc. pour analyse au laboratoire.



Source : Cliché S. Ilboudo, Juillet 2022

Des prélèvements sont effectués pour être situé sur l'état des sols afin de prendre les mesures idoines (figure n°8).

- *La revégétalisation*

Après le reprofilage à travers le nivellement, le dépôt de géotextile et de terre végétale ; l'étape suivante est la mise en terre des plantes (figure n°9).

Figure n°9 : Mise en terre de plants sur les roches recouvertes de terre végétale



Source : Cliché N. Diakité, mine d'or de Morila, Juin 2017

La mine à Morila a fait le choix de certaines plantes pour la régénéralisation. Il s'agit surtout de graminées. Parmi ces plantes on peut retenir entre autres l'*Andropogon gayanus*, native de la région, connue pour sa capacité à stabiliser les sols. La deuxième plante est le *Cenchrus ciliaris* (Herbe de buffle) résistante à la sécheresse, cette espèce favorise la couverture végétale rapide. En fin, la troisième plante est le *Panicum maximum* (Herbe géante). Cette plante est réputée être idéale pour le pâturage et la restauration des sols dégradés.

Aussi, les arbustes tels qu'*Acacia* spp. (ex. *Acacia senegal* ou *Acacia nilotica*) sont utilisés pour fixer l'azote et stabiliser les sols. La *Leucaena leucocephala* fixateur d'azote, bénéfique pour améliorer la fertilité des sols et la *Sesbania sesban* qui a une croissance rapide, souvent utilisé pour les projets de restauration écologique sont prioritaires pour la régénéralisation du site.

La densité de plantation est de l'ordre de 5 000 à 10 000 plants/ha pour un total de 1,5 à 5 millions de plantes pour 500 hectares.

Le coût par plante est entre 0,1 à 0,5 USD/plant, soit 150 000 à 2,5 millions USD au total

Les arbres ont une densité de 200 à 500 arbres/ha avec un total de 100 000 à 200 000 arbres pour un coût total d'environ 500 000 USD avec une résultante de taux de survie après 3 ans d'environ 70 à 80 % avec les soins adéquats.

- *la Gestion des eaux*

Les bassins de rétention ont une capacité totale de 1 à 3 millions de m³ pour gérer le ruissellement et éviter l'érosion, dont le coût de construction est d'environ 1 million USD.

Les canaux de drainage ont une longueur 20 km avec un coût par kilomètre s'élevant à 30 000

Le coût total est estimé entre 3 et 7 millions USD. Les dépenses réelles concernent la revégétalisation (1 à 2 millions USD), l'amélioration des sols (0,5 à 1,5 million USD), la stabilisation et reprofilage (1 à 3 millions USD).

Au terme du processus de restauration des sols, tout laisse à croire que les objectifs ont été largement atteints. En effet, les paramètres permettant d'évaluer la fertilisation des sols sont acceptables.

- Taux de matière organique: Augmentation de 1 à 2 % après 3 à 5 ans.

- pH des sols: Plage acceptable de 6,0 à 7,5.

- Couverture végétale:

- Taux de couverture: 70 à 80 % dans les zones re-végétalisées après 5 ans.

- Réduction de l'érosion:

- Pertes de sols: Inférieures à 10 tonnes/ha/an, contre plus de 50 tonnes/ha/an initialement dans les zones dégradées.

- *Evaluation financière de la revégétalisation/restauration*

La SOREM, sous capitalisée (100 millions de FCFA environ 160.000\$) peine à financer les projets à long terme sans appui externes. La baisse des revenus miniers -23% (INSTAT, 2024), litige entre Firefinch et l'État ainsi qu'avec certains sous-traitants limitent les budgets alloués à la restauration et retardent les projets tout en augmentant les dépenses juridiques.

Cependant le traitement des résidus fait un budget de 5 millions \$, l'agropole Songhaï 3 millions \$ sont des activités visibles sur le site.

III. DISCUSSION

Dans le cadre de la réhabilitation post-mines des sols à Morila, les enseignements tirés des expériences similaires à travers le monde sont essentiels pour orienter les stratégies de restauration. Cette discussion examine des cas de réussites et d'échecs, en tenant compte des enjeux écologiques, sociaux et économiques. La réhabilitation des sols dans des contextes similaires montre que la conversion des terres en zones agricoles ou écosystèmes fonctionnels est un objectif fréquemment poursuivi. Par exemple, la mine de Geita en Tanzanie a consacré 600 hectares à la revégétalisation, aboutissant à une stabilisation des sols et une augmentation de la biodiversité locale (Jon Hall, James Dodds, 2004). Cette approche pourrait inspirer la

répartition prévue à Morila : 300 à 700 hectares pour la revégétalisation et 100 à 300 hectares pour des usages agricoles. En revanche, Vicente Rodriguez, 2004 présente un cas d'échec à cause de l'absence d'une planification adaptée au niveau de la mine de Rio Tinto en Espagne dans les zones où les sols fortement contaminés restent improductifs. Cela met en évidence la nécessité de choix judicieux des types d'usages et des approches de réhabilitation à Morila. Le reprofilage et la stabilisation des sols sont essentiels pour limiter l'érosion et préparer les terrains pour des usages futurs. Dans le cas de la mine de Century en Australie, 30 % de la superficie affectée a été stabilisée grâce à des techniques de reprofilage combinées à l'implantation de graminées locales. Le coût, estimé à environ 5 000 USD/ha, a été amorti par les résultats positifs à long terme (Mine Australia, 2023).

Cependant, l'échec de la mine de Mount Polley au Canada, où une mauvaise gestion des pentes a provoqué une rupture de digue et une érosion accrue (Mine Australia, 2023), souligne l'importance d'une conception rigoureuse des ouvrages de stabilisation à Morila, en particulier pour les zones critiques représentant environ 30 % de la superficie. L'ajout de matières organiques et de traitements chimiques est une pratique courante pour restaurer la fertilité des sols miniers. Par exemple, la mine de South Crofty au Royaume-Uni a utilisé de la chaux et des amendements organiques pour neutraliser l'acidité et améliorer la structure des sols. Les résultats montrent un pH stabilisé entre 6,5 et 7,0 (Cornwall Wildlife Trust), ce qui est conforme aux objectifs attendus à Morila (6,0 à 7,5). En revanche, l'expérience de la mine de Berkeley aux États-Unis met en garde contre l'insuffisance des amendements. Une application inadéquate a laissé les sols contaminés et inutilisables, soulignant l'importance de quantités optimales (par exemple, 20 à 30 tonnes/ha de compost) pour atteindre une amélioration durable (R. Ryals et al, 2014). La revégétalisation constitue un pilier central de la réhabilitation. La mine de Boddington en Australie a atteint une couverture de 75 % grâce à l'implantation de 5 000 à 10 000 plants/ha, associés à une densité de 300 à 500 arbres/ha. Un taux de survie de 80 % a été observé après 3 ans, notamment grâce à un entretien continu (W. McGrath, R. Bell, D.A. Jasper, C. Hinz, I. Struthers, J. Eastham et P. McNeil. 2003).

E. Kwaning et E. Atteh (2022) affirme que la mine de Obuasi au Ghana a enregistré un taux de survie des plantations inférieur à 50 % en raison d'un manque de suivi et d'entretien. Pour éviter un tel échec, Morila devra s'assurer d'une implication communautaire active et d'un suivi rigoureux des plantations. Une gestion efficace des eaux est cruciale pour prévenir l'érosion et limiter la dispersion des contaminants. Selon J. Hall et J Dodds (2004) la mine de Geita a construit des bassins de rétention d'une capacité de 3 millions de m³ et des canaux de drainage sur 15 km, réduisant les pertes de sols à moins de 10 tonnes/ha/an. Cette approche a permis de

contrôler efficacement le ruissellement. En revanche, l'échec de la mine de Ok Tedi en Papouasie-Nouvelle-Guinée illustre les conséquences d'une gestion inadéquate, avec une dispersion massive des contaminants dans les écosystèmes aquatiques (J. Hettler, G. Irion et B. Lehmann, 1997). À Morila, des infrastructures comme des bassins de rétention (1 à 3 millions de m³) et des canaux (10 à 20 km) seront indispensables.

CONCLUSION

La mine de Morila a indéniablement laissé une empreinte non négligeable dans la localité notamment en termes d'infrastructure de développement. Des routes, ponts, systèmes d'approvisionnements en eau potable et l'électricité ont été mis en place pour optimiser l'exploitation et faire profiter la population locale. Sans oublier les écoles, centres de santé, logements pour répondre aux besoins des travailleurs de la mine et de leur famille, mais ils ont également été accessibles aux locaux.

Il est évident que l'activité minière a profondément chamboulé la structure physique et chimique des sols et une intervention de réhabilitation était nécessaire pour corriger les dommages causés. Il est indéniable que l'association des locaux dans le processus de réhabilitation est primordiale, car la réussite de survie des plantes à hauteur de 80% fut largement garantie par ces acteurs, comme en témoigne les populations.

La cessation de l'exploitation minière de l'or au Mali offre l'opportunité de réexaminer le modèle de développement minier du pays en faveur d'une approche plus durable et responsable. En abordant de manière proactive les défis environnementaux et sociaux associés à la cessation des activités minières, le Mali a la possibilité de réduire les conséquences néfastes et d'optimiser les perspectives de promouvoir un avenir plus durable et prospère pour ses habitants.

En faisant le choix de prioriser les plantes locales dans le cadre de la restauration des sols, les compagnies minières ont non seulement réduit le coût de l'opération mais également ont favorisé une meilleure implication des populations locales. En effet, ces plantes sont mieux connues par elles et leur entretien devient plus facile.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Banque mondiale. (2021). *Rapport sur les ressources minérales au Mali*, 99 p. Inédit
- Emmanuel, Kwaning et Evans, Atteh. (2022). Review on Effects of Mining in Ghana: The Case of Obuasi Municipality, in, *Asian Research Journal of Arts & Social Sciences*, 18 (4), pp. 50-57.

- Géronimi, Vincent. & Mainguy, Claire. (2020). Exploitation minière et développement : des effets toujours controversés. Introduction. *Mondes en développement*, n° 189, pp. 7-29.
- Hall Jon; Dodds James. (2004). *Groundwater Management Planning at an East African Gold Mine*. [en ligne], disponible sur https://www.imwa.info/docs/imwa_2004/IMWA2004_10_Hall.pdf 18 p.
- Institut National de la Statistique du Mali. (2024). *Validation du rapport d'évaluation finale du troisième Schéma Directeur de la Statistique et du Rapport diagnostic du Système Statistique National du Mali*, 62 p. Inédit
- Karembé Yorombé dit Yoro. (2018). *Modélisation de l'impact de l'empreinte écologique et de la variabilité pluviométrique sur les galeries forestière dans le bassin Versant de la rivière Wassoulou-Ballé au Mali, Afrique de l'ouest*. Thèse de Doctorat. Université Bayero Kano, Nigeria, 169 p.
- Ministère des mines et du pétrole du Mali. (2003). *Rapport annuel sur la production aurifère*. 5 p. Inédit
- Modeste, Sauvette. (2022). *Quels sont les impacts de l'exploitation minière sur l'environnement. Rapport du guide Industries*. [en ligne], disponible sur <https://guide-industries.com/exploitation/2022/01/quels-sont-les-impacts-de-l'exploitation-mini%C3%A8re-sur-l'environnement/>, consulté le 7 mars 2025 , 4 p.
- Oloukoi Joseph. (2012). *Utilisation de la télédétection et des systèmes d'information géographique dans l'étude de la dynamique spatiale de l'occupation des terres au centre du Bénin*. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi 304 p.
- Ouattara, Issa ; Maiga, Fatoumata ; Touré, Abdoukadi Oumarou ; Diya, Ahamadou et Maiga Thierno. (2021). Environnement, économie locale et fermeture de la mine d'or de Morila, Mali. *Hommes – Peuplements - Environnements*, n°4, FHG-Bamako, pp. 1-12.
- Pontius Robert Gilmore Jr. (2000). Quantification error versus location in comparison of categorical maps, in, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 66, n° 8, pp. 1011-1016.

- Rebecca Ryals ; Kaiser Michael; Torn Margaret S.; Berhé, Asmeret Asefaw et Silver Whendee L.(2014). Impacts of organic matter amendments on carbon and nitrogen dynamics in grassland soils, in, *Soil Biology & Biochemistry* n°68, [en ligne], disponible sur www.elsevier.com/locate/soilbio, consulté le 07 mars 2025, pp. 52-61.
- Traoré Djibril. (2019). *Dynamique de la structure paysagère des forêts classées autour de Bamako : cas de la Faya et de Monts Mandingues*. Mémoire de Master en Géomatique. FHG/USSGB, Mali, 83 p
- Warren, McGrath; Richard, Bell; David, Jasper; Christoph, Hinz; Iain, Struthers; Judy, Eastham et Paul. McNeil (2003). Revegetation of gold residues in the eastern jarrah forest in the south-west of western Australia. *Journal of the American Society of Mining and Reclamation*, [en ligne], disponible sur https://www.researchgate.net/publication/237651132_revegetation_of_gold_residue_s_in_the_eastern_jarrah_forest_in_the_south-west_of_western_australia1 consulté le 07 mars 2025, pp. 513-531.