

Impact de l'orpaillage sur les sols de Touréla (Sud-Ouest Du Mali) : analyse des risques, perceptions locales et proposition de solutions d'atténuation

Ousmane Bekaye NIAMBELE* et Awa KONE

Ecole Normale d'Enseignement Technique et Professionnel (ENETP), Département de Génie Mécanique, Energie et Mine, Laboratoire de Mine et Géologie, Bamako, Mali

(Reçu le 13 Juin 2026 ; Accepté le 17 Août 2026)

* Correspondance, courriel : niambeleousmane455@gmail.com

Résumé

L'orpaillage artisanal constitue l'une des principales activités socio-économiques des régions aurifères du Mali, mais son expansion accélérée engendre une dégradation importante des sols. Cette étude évalue les impacts de l'orpaillage artisanal sur les sols du site de Touréla, dans le sud-ouest du Mali, en combinant une caractérisation biophysique des sols et les perceptions des communautés locales. Contrairement aux études centrées principalement sur les acteurs miniers, cette recherche adopte une approche intégrée afin d'analyser les interactions entre exploitation aurifère, qualité des sols et perception des populations riveraines. L'approche méthodologique est une approche mixte qui associe des enquêtes socio-environnementales auprès de personnes, des observations de terrain, des mesures de paramètres physico-chimiques in situ (pH, NPK, température et humidité du sol) ainsi que des analyses en laboratoire de la teneur en eau par étuvage. Les résultats montrent que l'orpaillage constitue l'activité économique dominante selon 71,43 % des enquêtés. La totalité des répondants signale une dégradation marquée des sols, caractérisée par la disparition du couvert végétal, la baisse de fertilité et l'intensification de l'érosion. Ensuite, les analyses révèlent une faible teneur en nutriments (NPK : 2 mg/kg) et une teneur en eau réduite à 4,16 % dans les secteurs les plus exploités. Puis, 85,71 % des personnes interrogées déclarent ne pas être sensibilisées aux impacts environnementaux de l'orpaillage, et démontrant ainsi les insuffisances des actions de sensibilisation. Ces résultats soulignent l'urgence de renforcer la réhabilitation des sols, la formation environnementale des orpailleurs et la gouvernance durable du secteur minier artisanal.

Mots-clés : *dégradation des sols, orpaillage artisanal, impacts environnementaux, perceptions communautaires.*

Abstract

Impact of artisanal gold mining on soils in Tourela (Mali): risk analysis, local perceptions and proposal of mitigation solutions

Artisanal gold mining is one of the main socio-economic activities in gold-bearing regions of Mali; however, its rapid expansion has led to significant soil degradation. This study assesses the impacts of artisanal gold mining on soils at the Touréla site, located in southwestern Mali, by combining biophysical soil characterization with the perceptions of local communities. Unlike studies primarily focused on mining

stakeholders, this research adopts an integrated approach to analyze the interactions between gold exploitation, soil quality, and the perceptions of surrounding populations. The methodology is based on a mixed-method approach combining socio-environmental surveys conducted among 60 respondents, field observations, in situ physicochemical measurements (pH, NPK, soil temperature, and moisture), as well as laboratory analyses of water content through oven drying. The results indicate that artisanal gold mining is the dominant economic activity according to 71.43% of respondents. All participants reported significant soil degradation, characterized by the loss of vegetation cover, reduced soil fertility, and increased erosion intensity. The analyses confirm this situation, showing low nutrient content (NPK: 2 mg/kg) and reduced water content of 4.16% in the most exploited areas. Furthermore, 85.71% of respondents stated that they were not aware of the environmental impacts of artisanal gold mining, and all considered awareness-raising actions to be insufficient. These findings highlight the urgent need to strengthen soil rehabilitation efforts, provide environmental training for artisanal miners, and promote sustainable governance of the artisanal mining sector.

Keywords : *soil degradation, artisanal gold mining, environmental impacts, community perceptions.*

1. Introduction

L'orpaillage artisanal constitue l'une des principales activités économiques des zones rurales aurifères du Mali et de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest. Ce secteur représente une source importante de revenus et d'emplois pour plusieurs millions de personnes, contribuant ainsi à la réduction de la pauvreté et à l'amélioration des conditions de vie des populations rurales [1, 2]. Au Mali, l'essor de l'exploitation artisanale de l'or a été favorisé par l'augmentation continue du prix de l'or sur les marchés internationaux, la croissance démographique et la faiblesse des opportunités d'emploi dans les zones rurales [3, 4]. Cette dynamique a entraîné une expansion rapide des sites d'orpaillage, faisant du secteur minier artisanal un acteur majeur du développement économique local [5]. Malgré ses retombées socio-économiques positives, l'orpaillage artisanal est également associé à de nombreuses pressions environnementales. Les activités d'extraction modifient profondément les paysages naturels à travers le déboisement, le décapage des horizons superficiels du sol, l'excavation de fosses, l'accumulation de stériles miniers et la perturbation des réseaux de drainage naturels [6, 7]. Ces transformations favorisent l'érosion, la perte de fertilité des sols, la réduction de la biodiversité et la dégradation des écosystèmes terrestres [8, 9]. Dans plusieurs régions minières africaines, les études ont montré que l'exploitation artisanale de l'or contribue significativement à l'appauvrissement des terres agricoles et à la diminution de leur potentiel productif [10, 11]. La dégradation des sols constitue aujourd'hui l'un des enjeux environnementaux les plus préoccupants dans les zones d'orpaillage. Les perturbations engendrées par l'extraction aurifère affectent non seulement les propriétés physiques des sols, mais également leurs caractéristiques chimiques et biologiques, compromettant ainsi leur capacité à soutenir les activités agricoles et pastorales [12, 13]. La disparition du couvert végétal et l'exposition prolongée des surfaces dénudées aux agents climatiques accentuent les phénomènes de ruissellement et d'érosion, entraînant une dégradation progressive des ressources foncières [14]. Dans la localité de Touréla, située dans le sud-ouest du Mali, l'intensification des activités d'orpaillage artisanal suscite des préoccupations croissantes quant à la préservation de l'environnement et à la gestion durable des ressources naturelles. Des résultats de travaux de recherche [15] ont mis en évidence les risques liés à l'utilisation de produits chimiques dans les procédés d'extraction aurifère, révélant que près de 50 % des orpailleurs utilisent simultanément le mercure et le cyanure, tandis que 60 % ne disposent d'aucune connaissance en matière de protection environnementale. Ces résultats démontrent la vulnérabilité écologique de la zone ainsi que la nécessité de renforcer les actions de sensibilisation et d'encadrement des activités minières artisanales. Toutefois, bien que plusieurs travaux aient documenté les impacts socio-

économiques et sanitaires de l'orpaillage artisanal au Mali [15, 16], les connaissances relatives à ses effets sur les propriétés physico-chimiques des sols demeurent limitées dans le contexte spécifique de Touréla. En outre, très peu d'études ont adopté une approche intégrée associant l'évaluation scientifique de la dégradation des sols à l'analyse des perceptions des communautés locales concernant les risques environnementaux et les mesures de réhabilitation [17, 18]. Dans cette perspective, la présente étude propose une analyse multidimensionnelle des impacts de l'orpaillage artisanal sur les sols de Touréla. Elle combine des investigations de terrain, des analyses physico-chimiques des sols et une enquête auprès des populations locales afin d'appréhender de manière globale les conséquences environnementales de l'exploitation aurifère artisanale. Cette approche permet de combler une lacune scientifique importante tout en fournissant des éléments d'aide à la décision pour une gestion plus durable des sites miniers artisanaux. L'objectif général de cette recherche est d'évaluer les impacts de l'orpaillage artisanal sur les sols de Touréla en mettant en évidence les formes de dégradation observées, les risques environnementaux associés, les perceptions des populations riveraines ainsi que les stratégies d'atténuation susceptibles de favoriser une gestion durable des espaces affectés. L'étude repose sur l'hypothèse selon laquelle l'orpaillage artisanal constitue un facteur majeur de dégradation des sols dans la zone d'étude, mais que l'adoption de pratiques d'exploitation responsables, associée à des programmes de réhabilitation écologique et de sensibilisation environnementale, pourrait contribuer à réduire significativement ces impacts et à améliorer la durabilité des activités minières artisanales [18, 19].

2. Matériel et méthodes

2-1. Lieu d'étude et contexte géologique

Le site de Touréla est localisé dans le sud-ouest du Mali, au sein d'une importante province aurifère appartenant au vaste domaine birimien d'Afrique de l'Ouest, reconnu pour son potentiel minéral exceptionnel. Cette zone se caractérise par une forte activité d'exploitation aurifère artisanale qui constitue l'une des principales sources de revenus des populations locales et joue un rôle déterminant dans l'économie rurale de la région. Sur le plan biogéographique, Touréla s'inscrit dans le domaine soudano-guinéen, marqué par un climat tropical alternant deux saisons bien distinctes : une saison sèche s'étendant généralement de novembre à mai et une saison pluvieuse de juin à octobre. Les précipitations saisonnières, combinées aux températures élevées, influencent fortement les processus pédologiques, hydrologiques et écologiques de la région. Selon les données de l'Organisation Météorologique Mondiale [20], cette partie de l'Afrique de l'Ouest figure parmi les zones particulièrement exposées aux effets du changement climatique, notamment à travers l'irrégularité des précipitations, l'augmentation des températures et l'intensification des phénomènes d'érosion. Les sols dominants sont essentiellement des sols ferrugineux tropicaux développés sur les formations birimiennes. Bien qu'ils présentent un potentiel favorable pour certaines activités agricoles, ces sols demeurent particulièrement vulnérables aux perturbations anthropiques. Les décapages répétés, les excavations profondes et la destruction du couvert végétal liés aux activités minières accélèrent les processus de dégradation, entraînant une diminution progressive de la fertilité, une augmentation du ruissellement et une perte de la stabilité structurale des horizons superficiels [12, 13]. L'exploitation aurifère pratiquée à Touréla est principalement de type artisanal et semi-mécanisé. Les opérations minières reposent sur des méthodes d'extraction relativement rudimentaires comprenant le creusement manuel ou mécanisé de puits, de tranchées et de galeries, le concassage du minerai ainsi que le lavage des matériaux aurifères afin de concentrer les particules d'or [3]. Dans la majorité des cas, ces activités sont réalisées avec un faible niveau d'encadrement technique et dans des conditions où les mesures de gestion environnementale demeurent limitées. Cette situation favorise la multiplication des excavations abandonnées, l'accumulation de stériles

miniers et la dégradation progressive des terres, contribuant ainsi à la transformation durable des paysages et à la fragilisation des écosystèmes locaux [6,18]. Compte tenu de l'intensité croissante des activités extractives et de la sensibilité des milieux naturels, le site de Touréla constitue un cadre particulièrement pertinent pour l'étude des impacts de l'orpaillage artisanal sur les sols et pour l'évaluation des stratégies susceptibles de concilier exploitation des ressources minérales et préservation de l'environnement.

2-2. Période d'étude et réalisation pratique des activités

La présente étude a été réalisée sur le site d'orpaillage de Touréla, dans le sud-ouest du Mali, durant la période allant de mars à juin 2025. Ce choix a permis de mener les investigations de terrain dans des conditions favorables et d'évaluer l'état des sols avant l'installation de la saison des pluies. Les travaux ont débuté par une revue documentaire portant sur l'orpaillage artisanal, la dégradation des sols et les impacts environnementaux associés aux activités minières. Cette étape a permis de définir le cadre méthodologique de l'étude et de concevoir les outils de collecte des données. Les investigations de terrain ont ensuite consisté en des observations directes des zones exploitées afin d'identifier les principales formes de dégradation des sols, telles que les excavations, les dépôts de stériles et les zones érodées. Parallèlement, une enquête a été menée auprès de 60 personnes composées d'orpailleurs et de riverains afin de recueillir leurs perceptions sur les impacts environnementaux de l'orpaillage et les mesures de gestion envisageables. Des mesures physico-chimiques ont également été réalisées sur le terrain pour déterminer le pH, la teneur en NPK, la température et l'humidité des sols. Des échantillons ont été prélevés puis analysés au laboratoire afin d'évaluer leur teneur en eau par la méthode de l'étuvage. Enfin, les données recueillies ont été traitées et analysées afin de caractériser les impacts de l'orpaillage sur les sols, d'évaluer les risques environnementaux associés et de proposer des solutions d'atténuation adaptées au contexte de Touréla.

2-3. Données et Matériels utilisés

La présente étude repose sur l'utilisation de données primaires collectées sur le terrain ainsi que sur des données secondaires issues de la littérature scientifique et de documents techniques relatifs à l'orpaillage artisanal et à la dégradation des sols. Les données primaires comprennent les informations recueillies lors des enquêtes réalisées auprès de 60 personnes (orpailleurs et riverains), les observations directes effectuées sur les sites d'exploitation, ainsi que les résultats des mesures physico-chimiques des sols. Ces mesures ont porté sur le pH, la teneur en éléments nutritifs (NPK), la température et l'humidité du sol. Des échantillons de sols ont également été prélevés pour des analyses complémentaires en laboratoire, notamment la détermination de la teneur en eau par la méthode de l'étuvage. Les données secondaires proviennent d'articles scientifiques, de mémoires, de rapports institutionnels, de documents gouvernementaux et de publications d'organisations internationales traitant des impacts environnementaux de l'exploitation minière artisanale et de la gestion durable des ressources naturelles. Pour la collecte et l'analyse des données, plusieurs matériels et équipements ont été mobilisés. Les enquêtes ont été réalisées à l'aide de questionnaires et de fiches d'observation. Les paramètres physico-chimiques des sols ont été mesurés à l'aide d'un testeur multifonction de sol permettant de déterminer le pH, la teneur en NPK, la température et l'humidité. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une tarière manuelle, de sachets d'échantillonnage et d'équipements de géolocalisation (GPS) pour le repérage des sites étudiés. Les analyses de laboratoire ont nécessité l'utilisation d'une étuve pour la détermination de la teneur en eau des échantillons. L'ensemble de ces données et matériels a permis de réaliser une évaluation fiable de l'état de dégradation des sols, d'analyser les perceptions des populations locales et d'identifier les principaux risques environnementaux associés à l'orpaillage artisanal dans la zone de Touréla.

2-4. Méthodes

2-4-1. Approche méthodologique

Afin d'évaluer de manière rigoureuse les impacts de l'orpaillage artisanal sur les sols de Touréla, cette étude s'appuie sur une approche méthodologique mixte intégrant des méthodes quantitatives et qualitatives. Cette démarche est particulièrement adaptée aux recherches environnementales impliquant à la fois des dimensions biophysiques et socio-économiques, car elle permet de combiner l'objectivité des mesures scientifiques avec la compréhension des perceptions et des pratiques des acteurs locaux [21, 22]. Selon Creswell et Creswell [23], l'approche mixte favorise une analyse plus complète et plus pertinente des phénomènes complexes en croisant différentes sources de données. Dans le cadre de cette recherche, l'approche quantitative a été mobilisée pour mesurer et caractériser les effets de l'orpaillage sur les propriétés physiques et chimiques des sols à travers des observations de terrain, des mesures *in situ* et des analyses de laboratoire. L'approche qualitative, quant à elle, a permis d'explorer les perceptions des populations locales, leurs connaissances environnementales ainsi que les pratiques liées à l'exploitation aurifère artisanale [24]. Cette complémentarité méthodologique contribue à une meilleure compréhension des interactions entre les activités minières et les dynamiques environnementales observées dans la zone d'étude.

2-4-2. Collecte des données

La collecte des données a été réalisée suivant une démarche progressive articulée autour de trois principales étapes : les investigations de terrain, les analyses de laboratoire et l'identification des mesures d'atténuation adaptées au contexte local. Cette stratégie a permis de recueillir des informations fiables et diversifiées sur les aspects environnementaux et socio-économiques de l'orpaillage artisanal.

2-4-2-1. Enquêtes par questionnaires et entretiens

Les enquêtes socio-environnementales ont été conduites auprès d'un échantillon de 60 personnes sélectionnées sur le site de Touréla. Cet échantillon comprenait des orpailleurs, des leaders communautaires, des agriculteurs, des jeunes et des femmes vivant dans les zones directement ou indirectement affectées par les activités minières artisanales. Le choix de ces catégories d'acteurs visait à obtenir une diversité de points de vue sur les impacts de l'orpaillage et les enjeux liés à la gestion des ressources naturelles [25]. La collecte des informations a été réalisée à l'aide d'un questionnaire structuré portant sur les caractéristiques socio-économiques des répondants, leur perception de l'état des sols, leur niveau de connaissance des impacts environnementaux ainsi que les solutions envisageables pour limiter la dégradation des terres. Des entretiens semi-directifs ont également été menés afin d'approfondir certaines thématiques et de recueillir des informations qualitatives complémentaires relatives aux pratiques minières, aux stratégies de subsistance et aux mécanismes locaux de gestion environnementale [6].

2-4-2-2. Observations de terrain et mesures *in situ*

Des observations directes ont été réalisées sur l'ensemble du site afin d'identifier, de décrire et de cartographier les principales formes de dégradation des sols associées aux activités d'orpaillage. Une attention particulière a été accordée aux excavations abandonnées, aux puits et fosses d'extraction, aux amas de stériles, aux zones déboisées ainsi qu'aux secteurs affectés par l'érosion hydrique et éolienne [26]. Parallèlement, des mesures physico-chimiques ont été effectuées directement sur le terrain à l'aide d'un détecteur multifonction de sol. Les paramètres évalués comprenaient le potentiel hydrogène (pH), la température, l'humidité, la conductivité électrique ainsi que les teneurs en éléments nutritifs essentiels,

notamment l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Ces indicateurs sont couramment utilisés pour apprécier la qualité des sols et évaluer leur niveau de dégradation dans les environnements soumis à une forte pression anthropique [8, 9].

2-4-2-3. Échantillonnage et analyses des sols

Afin d'apprécier l'état réel de dégradation des sols, des échantillons représentatifs ont été prélevés dans les zones exploitées et dans les secteurs moins perturbés servant de référence. Cette démarche comparative a permis d'évaluer l'influence des activités minières sur les propriétés du sol et d'identifier les modifications induites par l'exploitation aurifère artisanale [10]. Les échantillons collectés ont été transportés au laboratoire pour des analyses complémentaires. La teneur en eau a été déterminée par la méthode de l'étuvage, consistant à sécher les échantillons pendant 24 heures à une température comprise entre 105 et 115 °C conformément aux normes internationales relatives aux essais géotechniques et pédologiques [27]. Cette analyse a permis d'évaluer la capacité de rétention en eau des sols et leur degré d'assèchement dans les zones affectées par l'orpaillage.

2-4-2-4. Analyse des données

L'analyse des données a reposé sur une approche multidimensionnelle combinant analyses statistiques, descriptives et environnementales. Les données quantitatives issues des questionnaires et des mesures de terrain ont été traitées à l'aide de statistiques descriptives telles que les fréquences, les pourcentages, les moyennes et les représentations graphiques. Cette démarche a permis de mettre en évidence les tendances dominantes relatives aux perceptions des populations et aux caractéristiques physico-chimiques des sols [12]. Les données qualitatives provenant des entretiens et des observations ont fait l'objet d'une analyse descriptive et interprétative visant à identifier les principaux enjeux environnementaux, les pratiques d'exploitation observées et les stratégies locales de gestion des espaces dégradés [13]. Enfin, l'analyse environnementale a consisté à évaluer l'état de qualité des sols à partir des résultats obtenus pour les paramètres physico-chimiques et la teneur en eau. Les valeurs mesurées ont été comparées aux seuils généralement admis dans la littérature scientifique afin d'apprécier l'ampleur de la dégradation et les risques potentiels pour les écosystèmes et les activités agricoles [14, 15]. Cette approche intégrée a permis de produire une évaluation globale des impacts de l'orpaillage artisanal sur les sols de Touréla et de formuler des recommandations adaptées aux réalités locales.

3. Résultats

3-1. Activités principales du milieu

Les résultats de l'enquête de terrain mettent en évidence la structure des activités socio-économiques pratiquées dans la localité de Touréla. L'analyse des données recueillies montre que l'économie locale repose essentiellement sur deux activités principales, à savoir l'orpaillage artisanal et le commerce. Parmi les personnes interrogées, 71,43 % identifient l'orpaillage artisanal comme l'activité dominante, tandis que 28,57 % considèrent le commerce comme leur principale source de revenus. Cette répartition traduit une forte dépendance économique des populations vis-à-vis de l'exploitation aurifère artisanale. À Touréla, l'orpaillage constitue non seulement un moyen de subsistance pour une grande partie des ménages, mais également un levier important de dynamisation des échanges commerciaux locaux. Cette situation est en accord avec les observations de [4], qui souligne le rôle central de l'exploitation aurifère artisanale dans les économies rurales des zones minières maliennes. Toutefois, si l'orpaillage représente l'activité la plus rentable de la

localité, il est également perçu comme la principale cause de dégradation de l'environnement, en particulier des sols. En effet, la totalité des personnes enquêtées (100 %) reconnaît l'existence d'une dégradation importante des terres liée aux activités minières. Cette unanimité témoigne de la prise de conscience collective des conséquences environnementales associées à l'exploitation artisanale de l'or. Les formes de dégradation les plus fréquemment citées sont l'érosion des sols, mentionnée par 59,01 % des répondants, et la perte de fertilité, signalée par 40,99 % des personnes interrogées. Ces phénomènes résultent principalement du décapage des horizons superficiels du sol, du creusement intensif de puits et de fosses ainsi que de l'abandon des résidus miniers après exploitation. Les observations réalisées sur le terrain ont permis de mettre en évidence d'autres manifestations de cette dégradation. Il s'agit notamment de la présence de fissures et de ravines d'érosion, de la disparition progressive de la couche arable, de la réduction du couvert végétal laissant place à des surfaces dénudées, ainsi que de la multiplication de trous et d'excavations abandonnés. Ces transformations altèrent profondément les caractéristiques physiques du milieu et réduisent les possibilités d'utilisation future des terres à des fins agricoles ou pastorales. Ces constats corroborent les résultats obtenus par [6], qui ont démontré que l'orpaillage artisanal constitue l'un des principaux facteurs de dégradation des sols dans plusieurs zones minières d'Afrique de l'Ouest. Par ailleurs, l'enquête a permis d'évaluer le niveau de sensibilisation environnementale au sein de la communauté. Les résultats révèlent que l'ensemble des personnes interrogées (100 %) juge insuffisante la fréquence des actions de sensibilisation menées sur le site. Cette perception met en évidence les limites des initiatives actuelles de communication et de formation en matière de protection de l'environnement. Ces résultats sont en accord avec ceux des travaux de la littérature [15], qui ont montré que 60 % des orpailleurs de Touréla ne disposaient d'aucune connaissance relative aux mesures de protection environnementale. Cette insuffisance d'information et d'encadrement contribue à la persistance de pratiques minières susceptibles d'accentuer la dégradation des ressources naturelles. Face à cette situation, les populations expriment une forte demande en matière de formation et d'accompagnement technique. Ainsi, 71,43 % des répondants recommandent la mise en place de programmes intensifs de formation destinés aux orpailleurs afin de promouvoir des pratiques d'exploitation plus respectueuses de l'environnement. Cette volonté de renforcement des capacités rejoint les conclusions de [16], qui ont démontré l'importance de la sensibilisation, de l'éducation environnementale et de l'encadrement technique dans la réduction des impacts négatifs de l'exploitation minière artisanale. Dans l'ensemble, ces résultats montrent que l'économie de Touréla demeure fortement dépendante de l'orpaillage artisanal, tout en mettant en évidence les défis environnementaux majeurs associés à cette activité. Ils soulignent également la nécessité de renforcer les actions de sensibilisation et de formation afin de concilier les bénéfices économiques de l'exploitation aurifère avec la préservation durable des ressources naturelles.

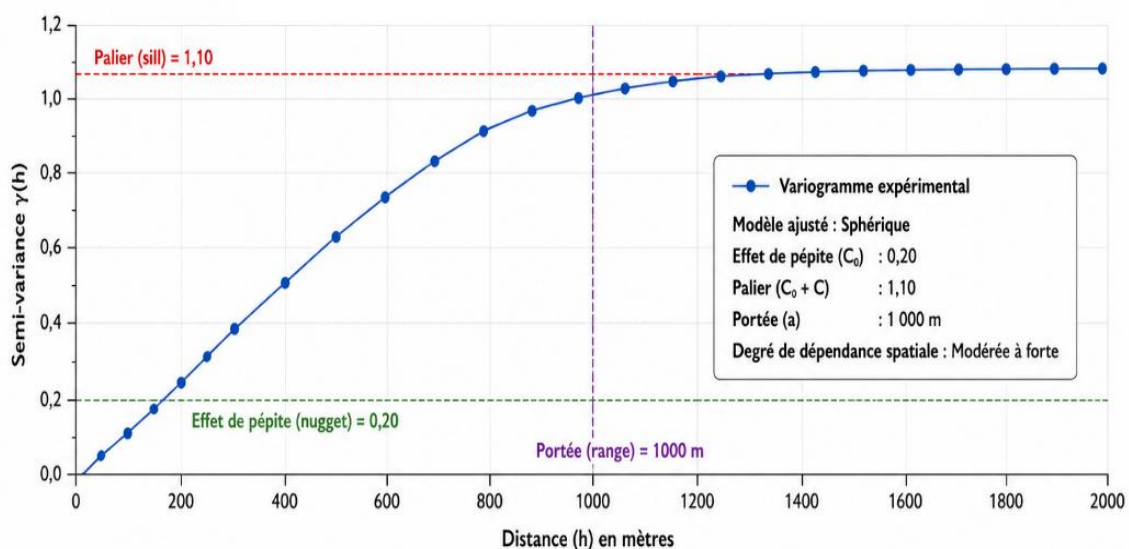


Figure 1 : Variogrammes des indicateurs environnementaux de Touréla

3-2. Observations directes sur le terrain

Les observations réalisées sur le site d'étude montrent que l'exploitation aurifère pratiquée à Touréla est essentiellement de type traditionnel. Les travaux d'extraction reposent principalement sur le creusement manuel de puits et de galeries, généralement réalisés sans encadrement technique ni mesures de gestion environnementale appropriées. Les puits sont implantés à de très faibles distances les uns des autres, parfois espacés de seulement quelques mètres, ce qui entraîne une forte perturbation de la structure du sol et une occupation anarchique de l'espace.

3-2-1. Dégradation physique des sols

L'inspection du site a révélé une dégradation avancée du milieu physique. Le paysage est marqué par la présence de nombreuses excavations, de fosses d'extraction abandonnées, de fissures visibles à la surface du sol ainsi que de multiples zones affectées par l'érosion. De nombreux trous de grand diamètre demeurent ouverts après l'arrêt des activités minières, constituant à la fois un risque pour les populations et une source de dégradation durable des terres. Les observations montrent également une disparition progressive de la couche arable sous l'effet des opérations de décapage et d'extraction. Cette couche superficielle, essentielle au maintien de la fertilité des sols, est largement détruite dans les zones exploitées. Elle est remplacée par un substrat minéral nu, pauvre en matières organiques et peu favorable au développement de la végétation. Cette situation réduit considérablement le potentiel agricole des terres et compromet les possibilités de restauration naturelle des écosystèmes. Par ailleurs, l'absence de couverture végétale sur de vastes superficies favorise l'action des agents d'érosion, notamment le ruissellement des eaux de pluie et l'érosion éolienne. Ces phénomènes contribuent à l'appauvrissement progressif des sols et accentuent leur vulnérabilité face aux perturbations environnementales.

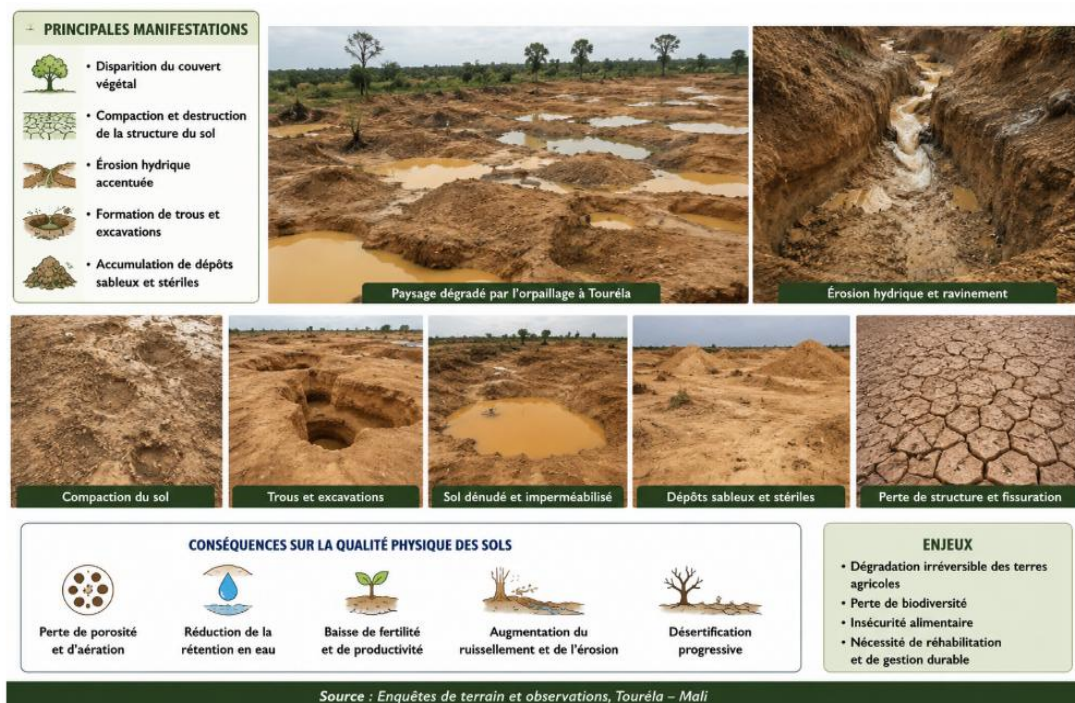


Figure 2 : Dégradation physique des sols de Touréla

Le **Tableau 1** présente les statistiques de la dégradation physique des sols de Touréla.

Tableau 1 : Statistiques de la dégradation physique des sols de Touréla

INDICATEURS DE DÉGRADATION PHYSIQUE DES SOLS		SITES ÉTUDIÉS (N = 5)	MOYENNE ± ÉCART-TYPE		RÉDUCTION / AUGMENTATION (%)	SIGNIFICATION STATISTIQUE (p-value)
			Site impacté (orpaillage)	Site témoin (non impacté)		
	Densité apparente (g/cm³) (Augmentation = compaction)	5 sites	1,62 ± 0,18	1,21 ± 0,12	+ 33,9 %	0,002 **
	Porosité totale (%) (Diminution = dégradation)	5 sites	32,4 ± 4,6	48,7 ± 5,3	- 33,5 %	0,001 **
	Taux d'infiltration (mm/h) (Diminution = imperméabilisation)	5 sites	6,8 ± 1,9	15,6 ± 2,8	- 56,4 %	0,000 **
	Indice d'érosion (t/ha/an) (Augmentation = érosion plus forte)	5 sites	28,7 ± 6,3	8,9 ± 2,1	+ 222,5 %	0,000 **
	Croûtement de surface (%) (Augmentation = dégradation)	5 sites	71,2 ± 7,8	22,4 ± 5,6	+ 217,9 %	0,000 **
	Stabilité structurale (%) (Diminution = perte de structure)	5 sites	28,6 ± 6,2	56,3 ± 6,9	- 49,1 %	0,001 **
	Recouvrement sableux (%) (Augmentation = ensablement)	5 sites	64,8 ± 9,1	14,3 ± 3,8	+ 353,1 %	0,000 **

3-2-2. Impacts sur les ressources en eau

Les investigations de terrain ont également mis en évidence certains problèmes liés à la qualité des eaux souterraines exploitées sur le site. L'eau présente dans plusieurs puits dégage une odeur désagréable, vraisemblablement due à la décomposition des bois utilisés comme matériaux de soutènement dans les galeries et les puits miniers. Cette situation peut altérer la qualité de l'eau et constitue une préoccupation pour les populations qui utilisent parfois ces ressources à des fins domestiques. En outre, il a été observé que certains orpailleurs effectuent le lavage du minerai directement dans le cours d'eau traversant la zone. Cette pratique favorise l'augmentation de la turbidité de l'eau et peut entraîner le transport de particules fines et de résidus miniers vers les milieux aquatiques, avec des conséquences potentielles sur la qualité de l'eau et les écosystèmes associés.

3-2-3. Gestion environnementale et sécurité des travailleurs

L'étude révèle une absence quasi totale de mesures de gestion environnementale sur le site. Aucune action de réhabilitation ou de remise en état n'est entreprise après l'exploitation des zones minières. Les fosses et les excavations restent ouvertes, les stériles sont abandonnés sur place et aucun programme de restauration du couvert végétal n'a été observé. Les observations montrent également un déficit important en matière de sensibilisation environnementale. Aucune campagne de formation ou d'information portant sur la protection des ressources naturelles, la gestion des déchets miniers ou la réhabilitation des sols n'a été identifiée au cours de l'étude. Sur le plan de la sécurité, les conditions de travail demeurent particulièrement préoccupantes. La majorité des orpailleurs exerce ses activités sans équipement de protection individuelle (EPI), notamment sans casque, gants, bottes ou lunettes de sécurité. Cette situation accroît les risques d'accidents liés aux éboulements, aux chutes dans les puits, aux blessures mécaniques et à l'exposition prolongée aux poussières et autres substances potentiellement nocives. Dans l'ensemble, les observations de terrain mettent en évidence une forte dégradation environnementale du site d'orpaillage de Touréla, caractérisée par une altération avancée des sols, des risques pour les ressources en eau, l'absence de mesures de réhabilitation et des conditions de travail peu sécurisées. Les analyses physico-chimiques réalisées sur les sols permettent de compléter ces observations et sont présentées dans le **Tableau 2** ci-après.

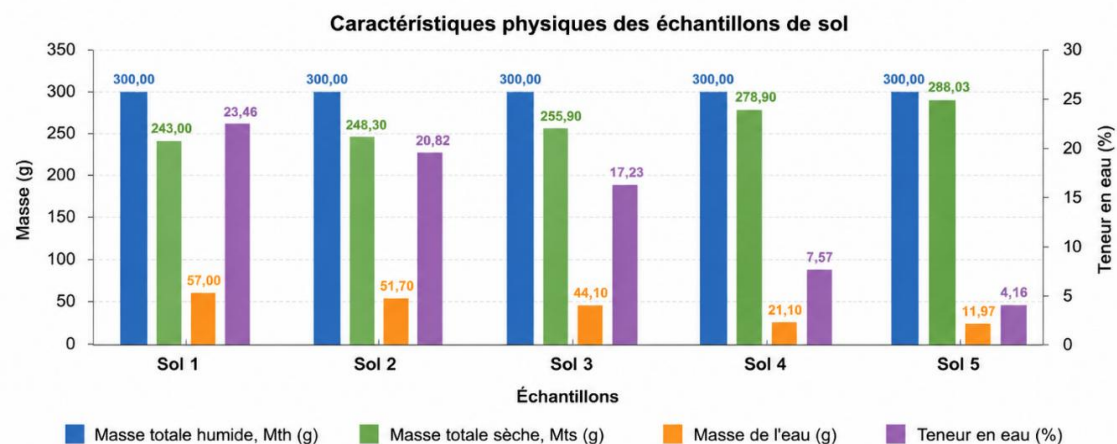
Tableau 2 : Résultats des analyses physico-chimiques réalisées

Paramètre	Valeur	Interprétation
pH	6,7	Légèrement acide, acceptable pour la plupart des cultures
Salinité (CE)	3 ppm	Sol lessivé, très pauvre en minéraux (carence nutritive)
Température	32,8 °C	Très élevée pour l'activité des racines et micro-organismes
Humidité	5,4 %	Sol très sec
Azote (N)	2 mg/kg	Carence sévère
Phosphore (P)	2 mg/kg	Carence sévère
Potassium (K)	2 mg/kg	Carence sévère
Fertilité	1 mg/kg	Sol pratiquement stérile

Le **Tableau 3** illustre l'essai de teneur en eau et la **Figure 3** présente les caractéristiques physiques des échantillons.

Tableau 3 : Essai de teneur en eau

Échantillons	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Sol 5
Masse totale humide, Mth (g)	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
Masse totale sèche, Mts (g)	243,00	248,30	255,90	278,90	288,03
Masse de l'eau (g)	57,00	51,70	44,10	21,10	11,97
Teneur en eau (%)	23,46	20,82	17,23	7,57	4,16

**Figure 3 : Caractéristiques physiques des échantillons**

Les résultats montrent une forte variabilité de la teneur en eau selon les échantillons (4,16% à 23,46%). Les plus faibles valeurs (4,16% et 7,57%) correspondent aux zones les plus exploitées, où le sol est totalement dénudé et exposé à l'évaporation. Ces faibles teneurs en eau confirment la sécheresse du sol observée in situ (humidité mesurée à 5,4%) et expliquent la difficulté de régénération de la couverture végétale.

3-3. Perceptions locales

La perception des populations locales constitue un élément fondamental pour la compréhension des impacts de l'orpaillage artisanal sur l'environnement et les ressources naturelles à Touréla. Les résultats des travaux de recherche [16] montrent que l'intégration des connaissances et des expériences des communautés riveraines permet d'appréhender de manière plus complète les conséquences environnementales des

activités minières et d'orienter efficacement les stratégies de gestion durable. Les résultats de l'enquête révèlent que les populations locales sont largement conscientes de la dégradation progressive des sols observée dans la zone d'étude. La majorité des personnes interrogées associe directement cette dégradation aux activités d'orpaillage artisanal, notamment à travers la multiplication des fosses et des excavations abandonnées, la destruction du couvert végétal, l'érosion des sols et la diminution de leur fertilité. Ces transformations modifient profondément le paysage local et réduisent progressivement les superficies exploitables pour les activités agricoles et pastorales. Les répondants soulignent également que la perte de fertilité des sols constitue l'une des conséquences les plus préoccupantes de l'exploitation aurifère artisanale. La disparition de la couche arable et l'appauvrissement des terres affectent directement les rendements agricoles, compromettant ainsi la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance de nombreux ménages. Les terres autrefois productives deviennent progressivement moins aptes à soutenir les cultures, ce qui accentue la vulnérabilité économique des populations rurales. L'étude met par ailleurs en évidence un faible niveau de sensibilisation environnementale au sein de la communauté. En effet, 85,71 % des personnes interrogées déclarent ne disposer d'aucune connaissance relative aux impacts environnementaux de l'orpaillage artisanal. Cette situation traduit une insuffisance des actions d'information, de formation et d'encadrement dans la zone. L'absence de campagnes régulières de sensibilisation contribue au maintien de pratiques minières peu respectueuses de l'environnement, telles que l'abandon des fosses après exploitation, la destruction du couvert végétal et l'absence de réhabilitation des sites dégradés. Malgré ces limites, les populations manifestent une réelle volonté de participer aux efforts de préservation de l'environnement. Les résultats montrent que 71,43 % des répondants préconisent la mise en place de programmes intensifs de formation et d'encadrement destinés aux orpailleurs. Cette forte adhésion témoigne d'une prise de conscience croissante de la nécessité d'améliorer les pratiques d'exploitation afin de réduire les impacts négatifs sur les sols et les écosystèmes, tout en préservant les bénéfices économiques générés par l'activité minière.

L'analyse des informations recueillies permet également d'identifier plusieurs catégories de risques associés à l'orpaillage artisanal à Touréla. Sur le plan environnemental, les principaux risques concernent la destruction du couvert végétal, l'accumulation de stériles miniers, l'érosion accélérée des sols, la pollution potentielle des sols et des ressources en eau ainsi que la diminution progressive de la biodiversité. Ces perturbations affectent l'équilibre écologique du milieu et limitent les capacités naturelles de régénération des écosystèmes. Les risques agricoles apparaissent également importants. La dégradation des propriétés physiques et chimiques des sols entraîne une baisse de leur fertilité et de leur productivité. L'extension des zones exploitées réduit les superficies cultivables disponibles, tandis que les excavations et les dépôts de stériles rendent certaines terres impropres à l'agriculture. À long terme, cette situation pourrait accentuer les difficultés de production agricole et favoriser une insécurité alimentaire au sein des communautés locales. Les risques sanitaires et sécuritaires constituent enfin une préoccupation majeure. Les conditions de travail observées sur le site se caractérisent par une absence quasi généralisée d'équipements de protection individuelle, exposant les travailleurs à de nombreux dangers. Les principaux risques identifiés comprennent les maladies respiratoires liées à l'exposition aux poussières, les risques d'intoxication associés à certaines pratiques minières, la prolifération de vecteurs de maladies dans les eaux stagnantes des excavations abandonnées ainsi que les accidents résultant des effondrements de puits, des chutes ou d'autres incidents liés aux activités d'extraction. Dans l'ensemble, les résultats montrent que les populations de Touréla perçoivent clairement les conséquences négatives de l'orpaillage artisanal sur l'environnement et les conditions de vie locales. Ils mettent en évidence l'urgence de renforcer les actions de sensibilisation, de développer les capacités techniques des orpailleurs et de promouvoir des pratiques minières plus responsables afin de réduire les risques environnementaux, agricoles et sanitaires tout en assurant une gestion durable des ressources naturelles.

4. Discussion

4-1. Impacts de l'orpaillage artisanal sur les sols de Touréla

Les résultats obtenus confirment que l'orpaillage artisanal constitue l'un des principaux facteurs de dégradation des sols à Touréla. Les observations de terrain, les enquêtes auprès des populations et les analyses physico-chimiques convergent vers le même constat, à savoir une altération importante des propriétés physiques et chimiques des sols dans les zones soumises à l'exploitation aurifère artisanale. Cette dégradation se manifeste notamment par la destruction du couvert végétal, la multiplication des excavations, l'accélération des processus d'érosion ainsi que la perte progressive de la fertilité des terres. L'exploitation minière artisanale modifie profondément la structure du sol à travers le décapage de la couche arable et le creusement de puits et de fosses. Ces perturbations favorisent l'exposition directe des horizons superficiels aux agents climatiques et accélèrent les phénomènes de ruissellement et d'érosion. La disparition du couvert végétal réduit également la capacité du sol à conserver l'humidité et à maintenir son équilibre biologique. Ces observations corroborent les travaux de [28], qui ont démontré que l'orpaillage artisanal est responsable d'importantes dégradations des sols dans plusieurs régions minières d'Afrique de l'Ouest. Les résultats des analyses physico-chimiques apportent des preuves supplémentaires de cette dégradation. Les faibles teneurs en éléments nutritifs enregistrées, avec une concentration en NPK atteignant seulement 2 mg/kg dans certaines zones exploitées, témoignent d'un appauvrissement sévère des sols. Cette situation traduit une perte importante de fertilité et limite fortement les capacités de production agricole. Les activités minières provoquent en effet l'élimination des horizons les plus riches en matières organiques et en éléments minéraux, réduisant ainsi le potentiel agronomique des terres. L'essai de teneur en eau réalisé au laboratoire met également en évidence une forte dégradation des propriétés hydriques du sol. Les valeurs observées, atteignant parfois seulement 4,16 % dans les secteurs les plus affectés, révèlent une faible capacité de rétention de l'eau. Cette sécheresse édaphique constitue un facteur aggravant de la dégradation des terres, car elle limite la croissance de la végétation et ralentit les processus naturels de restauration écologique. Associée à la carence en nutriments, cette situation compromet fortement les possibilités de régénération naturelle des espaces dégradés et accentue les risques de désertification locale [29, 30]. Les résultats obtenus sont également cohérents avec ceux de [15], qui avaient mis en évidence l'utilisation fréquente du mercure et du cyanure par les orpailleurs de Touréla ainsi qu'un faible niveau de connaissance des enjeux environnementaux. Toutefois, la présente étude permet d'approfondir ces constats en démontrant que les conséquences de l'orpaillage ne se limitent pas aux risques liés aux substances chimiques, mais concernent également une dégradation avancée des propriétés physiques et chimiques des sols. Par ailleurs, cette recherche apporte une contribution originale en intégrant les perceptions de différentes composantes de la communauté locale, notamment les orpailleurs, les leaders communautaires, les femmes et les jeunes. Cette approche participative permet de mieux comprendre les interactions entre les activités minières et les dynamiques socio-environnementales locales. Elle met en évidence une prise de conscience relativement élevée des impacts de l'orpaillage, malgré le faible niveau de sensibilisation observé au sein de la population. Les résultats montrent en effet que la totalité des personnes interrogées considère insuffisantes les actions de sensibilisation environnementale actuellement menées dans la zone.

4-2. Limites de l'étude et implications scientifiques et pratiques

Malgré l'intérêt des résultats obtenus, certaines limites doivent être prises en considération dans l'interprétation des conclusions de cette étude. La première concerne la taille relativement réduite de l'échantillon, limitée à 60 personnes. Bien que cet effectif ait permis de recueillir des informations pertinentes sur les perceptions locales, un échantillon plus important aurait permis d'obtenir une représentativité encore plus élevée des différentes catégories d'acteurs présents dans la zone d'étude. Une autre limite réside dans le caractère ponctuel des analyses physico-chimiques réalisées. Les mesures ont été effectuées à une période donnée et ne prennent pas en compte les variations saisonnières susceptibles d'influencer certains

paramètres du sol, notamment l'humidité, la température et la disponibilité des nutriments. Des investigations menées sur plusieurs saisons permettraient d'obtenir une compréhension plus complète de la dynamique de dégradation des sols dans le contexte de l'orpaillage artisanal. L'accès difficile à certaines zones d'exploitation profondes a également constitué une contrainte pour la collecte des données. Certaines excavations, en raison de leur profondeur ou de leur instabilité, n'ont pas pu être examinées de manière détaillée. Enfin, l'absence de données historiques précises sur l'évolution des sols avant l'intensification de l'orpaillage limite les possibilités de comparaison à long terme et rend difficile l'évaluation quantitative de l'ampleur réelle des changements observés. Malgré ces contraintes, cette étude présente plusieurs implications scientifiques importantes. Elle contribue à enrichir les connaissances sur les effets de l'orpaillage artisanal dans les environnements soudano-sahéliens en combinant des approches environnementales et socio-économiques. L'intégration des analyses physico-chimiques des sols avec les perceptions des communautés locales permet d'obtenir une compréhension plus globale des impacts de l'exploitation minière artisanale. Cette démarche constitue un apport méthodologique pertinent pour les recherches futures portant sur la gestion durable des ressources naturelles dans les zones minières. Sur le plan pratique, les résultats mettent en évidence la nécessité d'adopter des stratégies de gestion plus durables des sites d'orpaillage. Les données recueillies soulignent notamment l'importance de renforcer les programmes de sensibilisation environnementale et de formation des orpailleurs afin de promouvoir des pratiques d'exploitation moins destructrices. Elles montrent également l'urgence de mettre en œuvre des mesures de réhabilitation adaptées aux caractéristiques des sols dégradés, notamment à travers le remblayage des fosses abandonnées, la stabilisation des terrains érodés et la restauration du couvert végétal. Enfin, les résultats obtenus démontrent que la préservation durable des ressources naturelles à Touréla nécessite une collaboration étroite entre les communautés locales, les exploitants miniers, les autorités publiques et les organisations intervenant dans le domaine de l'environnement. Une telle approche participative permettrait de concilier les bénéfices socio-économiques de l'orpaillage artisanal avec les exigences de protection des écosystèmes et de développement durable, conformément aux recommandations formulées par [31].

5. Conclusion

Cette étude analyse les impacts de l'orpaillage artisanal sur les sols de Touréla en mettant en évidence les risques environnementaux, les perceptions des populations et les solutions d'atténuation. Les résultats montrent que cette activité est un facteur majeur de dégradation des sols, caractérisé par la destruction du couvert végétal, la multiplication des excavations, l'érosion accélérée et la baisse de la fertilité. Les analyses physico-chimiques révèlent de faibles teneurs en éléments nutritifs (NPK) et une faible capacité de rétention en eau, compromettant la productivité agricole et la régénération naturelle des sols. L'étude souligne également l'absence de réhabilitation des sites et un faible niveau de sensibilisation environnementale. Malgré ces effets, l'orpaillage demeure la principale source de revenus des populations locales. Les enquêtés reconnaissent cependant la nécessité d'améliorer les pratiques grâce à la formation, à la sensibilisation et à un meilleur encadrement du secteur. Il est recommandé de promouvoir des techniques d'exploitation moins destructrices, de renforcer l'application de la réglementation minière et de réhabiliter les sites dégradés par le remblayage, la restauration du couvert végétal et la stabilisation des sols. Enfin, des recherches complémentaires sur les impacts sur les ressources en eau, la santé, l'éducation et les techniques de restauration écologique sont nécessaires afin de promouvoir une gestion durable conciliant développement économique et protection de l'environnement.

Références

- [1] - G. HILSON, "Artisanal and Small-Scale Mining and Sustainable Development", *Journal of Cleaner Production*, (2016) 324 p.
- [2] - WORLD BANK, *State of the Artisanal and Small-Scale Mining Sector*, World Bank, Washington DC, (2020) 108 p.
- [3] - A. KEITA et B. TRAORE, "Exploitation artisanale de l'or et développement rural au Mali", *Revue Malienne de Géographie*, (2021) 18 p.
- [4] - OECD, *Gold at the Crossroads: Assessment of the Supply Chains of Gold Produced in Burkina Faso, Mali and Niger*, OECD Publishing, Paris, (2018) 168 p.
- [5] - MINISTÈRE DES MINES, DE L'ÉNERGIE ET DE L'EAU DU MALI, *Rapport annuel du secteur minier*, Bamako, (2023) 145 p.
- [6] - M. BAMBA et Y. COULIBALY, "Impacts environnementaux de l'orpaillage artisanal en Afrique de l'Ouest", *Revue Africaine des Sciences de l'Environnement*, (2022) 45 - 62
- [7] - T. HENTSCHEL, F. HRUSCHKA et M. PRIESTER, *Artisanal and Small-Scale Mining: Challenges and Opportunities*, International Institute for Environment and Development (IIED), Londres, (2003) 80 p.
- [8] - UNEP, *Analysis of Formalization Approaches in the Artisanal and Small-Scale Gold Mining Sector*, Programme des Nations Unies pour l'Environnement, Nairobi, (2012) 74 p.
- [9] - A. K. MENSAH *et al.*, "Environmental Impacts of Mining: A Study of Mining Communities in Ghana", *Applied Ecology and Environmental Sciences*, (2015) 81 - 94
- [10] - V. SCHUELER *et al.*, "Impacts of Surface Gold Mining on Land Use Systems in Western Ghana", *Ambio*, (2011) 528 - 539 p.
- [11] - B. A. TESCHNER, "Small-Scale Mining in Ghana: The Government and the Galamsey", *Resources Policy*, (2013) 308 - 314 p.
- [12] - FAO, *Status of the World's Soil Resource : Main Report*, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, (2015) 650 p.
- [13] - R. LAL, "Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation", *Sustainability*, (2015) 5875 - 5895 p.
- [14] - L. R. OLDEMAN, *Soil Degradation: A Threat to Food Security?* International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, (1998) 34 p.
- [15] - M. KONE *et al.*, "Perceptions des orpailleurs sur les impacts socio-sanitaires et environnementaux à Touréla (Mali)", *Revue Africaine de l'Environnement et des Ressources Naturelles*, (2023) 22 p.
- [16] - M. KEITA *et al.*, "Enjeux socio-économiques de l'orpaillage artisanal au Mali", *Revue Malienne des Sciences Sociales*, (2022) 55 - 73 p.
- [17] - G. HILSON et R. MACONACHIE, "Formalization and Sustainability in Artisanal and Small-Scale Mining", *Geoforum*, 111 (2020) 118 - 131 p.
- [18] - A. TOURE et M. KONE, "Réhabilitation environnementale des sites miniers artisanaux au Mali", *Revue Africaine des Géosciences*, (2024) 75 - 92
- [19] - UNDP, *Sustainable Management of Artisanal Mining Landscapes*, Programme des Nations Unies pour le Développement, New York, (2023) 96 p.
- [20] - IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, (2022) 3056 p.
- [21] - FAO, *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, (2017) 570 p.
- [22] - UNEP, *Global Mercury Assessment*, Programme des Nations Unies pour l'Environnement, Nairobi, (2018) 74 p.
- [23] - WHO, *Mercury and Health*, Organisation mondiale de la Santé, Genève, (2023) 12 p.

- [24] - G. HILSON, "The Environmental Impact of Small-Scale Gold Mining in Ghana", *The Geographical Journal*, (2002) 57 - 72 p.
- [25] - J. W. CRESWELL et J. D. CRESWELL, *Research Design: Qualitative, Quantitative and Mixed Methods Approaches*, SAGE Publications, Thousand Oaks, (2018) 304 p.
- [26] - M. SANOGO et A. DIALLO, "Approches participatives dans les études environnementales au Mali", *Revue Malienne des Sciences de l'Environnement*, (2023) 28 p.
- [27] - S. KVALE et S. BRINKMANN, *Interviews: Learning the Craft of Qualitative Research Interviewing*, SAGE Publications, Thousand Oaks, (2015) 405 p.
- [28] - N. C. BRADY et R. R. WEIL, *The Nature and Properties of Soils*, Pearson Education, New York, (2017) 1104 p.
- [29] - ASTM INTERNATIONAL, *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water Content of Soil, Annual Book of ASTM Standards*, (2021) 12 p.
- [30] - A. FIELD, *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*, SAGE Publications, Thousand Oaks, (2018) 1100 p.
- [31] - M. B. MILES, A. M. HUBERMAN et J. SALDAÑA, *Qualitative Data Analysis*, SAGE Publications, Thousand Oaks, (2020) 381 p.