

Evaluation Des Impacts Socio-Environnementaux De L'orpaillage À Kimuela En République Démocratique Du Congo [Assessment Of The Socio-Environmental Impacts Of Artisanal Gold Mining In Kimuela, Democratic Republic Of The Congo]

Emmanuel-Junior NONA MANI-A-VITA¹, Tcheq LOTANA MORRY¹, Jean Nestor KIMOLE-NE-KIMOLE¹, Emmanuel NONA KIBILA¹, Jean – Pierre KIMBUYA¹ et Elisée BAKATULA NSIMBA¹

¹Département de chimie, Faculté de Sciences et Technologies, Université Pédagogique Nationale, Kinshasa
République Démocratique du Congo

Auteur Correspondant : Emmanuel-Junior NONA MANI-A-VITA



Résumé: La localité de Kimwela, située dans la province du Kongo-central en République Démocratique du Congo, regorge d'une centaine de sites d'orpaillage étendus de part et d'autre de la rivière Ntombe, dont quatre sites font l'objet de cette étude. Bien que cette activité contribue à l'économie locale, elle engendre de sérieuses préoccupations quant à ses impacts sur l'environnement et la santé publique. L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts socio-environnementaux de l'orpaillage dans cette localité.

L'approche méthodologique a consisté en une combinaison des observations de terrain, des entretiens (entrevues) avec les habitants ainsi que des analyses physico-chimiques.

Les échantillons sont constitués d'eau de surface, d'eau souterraine et des résidus de sol obtenus après lavage. Les échantillons d'eaux de surface ont été collectés, respectivement en amont (Ee2), en aval (Ee3) et au point source (Ee4) de la rivière Ntombe. L'échantillon d'eau souterraine a été prélevé au lieu aménagé pour recueillir l'eau de consommation (Ee1). Le pH, la conductivité électrique (CE), la température, les solides totaux dissouts (TDS), l'arsenic, l'or (Au) et les éléments traces métalliques (ETM) tels que le mercure, le nickel, le plomb, le zinc ont été analysés. L'humidité, les matières organiques (MO), et le carbone organique total (COT) ont été déterminés dans les échantillons du sol.

Les résultats des eaux de surface présentent un pH légèrement acide de 5,91 pouvant favoriser la mobilité des métaux lourds. Alors que les concentrations de plomb et d'or se situent dans les limites fixées par les normes internationales (OMS, AFNOR) et ne présentent pas de risque pour la santé humaine ni pour les écosystèmes locaux, des métaux tels que l'arsenic et le nickel atteignent des concentrations dépassant les seuils de l'OMS (0,09 mg L⁻¹ pour l'As et 1,03 mg L⁻¹ pour le Ni), indiquant une contamination potentielle due à l'activité minière artisanale.

L'eau souterraine de la source Nkelo (Ee1), utilisée pour la boisson contient des niveaux préoccupants de nickel (0,24 mg L⁻¹) et de mercure (0,01 mg L⁻¹), susceptible de contribuer à la résurgence de certaines maladies hydriques rapportées dans la région.

Les sols sont acides avec des valeurs de pH variant entre 5,13 et 5,93. Les concentrations supérieures aux normes ont été obtenus pour les métaux suivants : mercure (0,12 mg kg⁻¹), nickel (2,51 mg kg⁻¹), zinc (4,00 mg kg⁻¹) et arsenic (0,11 mg kg⁻¹). La présence d'or résiduel de 0,15 mg kg⁻¹, suggère une inefficacité des méthodes de traitement artisanal utilisée.

Sur le plan social, l'orpaillage affecte négativement les conditions sanitaires, l'éducation et le mode de vie des communautés. L'implication des enfants dans les activités minières, au détriment de leur scolarisation, est particulièrement alarmante. En plus, l'absence des mesures de sécurité expose les travailleurs à divers risques d'accidents et de maladies professionnelles.

Mots clés: orpaillage, pollution socio environnementale, ETM, Kimwela, dégradation des sols, Kimuela.

Abstract: The locality of Kimwela, situated in the Kongo-Central province of the Democratic Republic of the Congo, possesses to around a hundred artisanal gold mining sites spread along both banks of the Ntombe River. Four of these sites are the focus of this study. Although this activity contributes to the local economy, it raises serious concerns regarding its impact on the environment and public health. The aim of this study is to assess the socio-environmental impacts of artisanal gold mining in the area.

The Kongo Central province, rich in natural resources, is the site of intensive artisanal gold mining. Although this activity contributes to the local economy, it raises serious concerns regarding its impact on the environment and public health.

The aim of this study is to assess the socio-environmental impacts of artisanal gold mining in the locality of Kimwela, situated in the Kongo Central province of the Democratic Republic of the Congo. The methodological approach combined field observations, interviews with local residents, and physicochemical analyses.

The samples consisted of surface water, groundwater, and soil residues obtained after washing. Surface water samples were collected from the Ntombe River at upstream (Ee2) and downstream (Ee3) locations, as well as at the point source (Ee4). The groundwater sample was taken from the site designated for collecting drinking water (Ee1). Analyses were performed for pH, electrical conductivity (EC), temperature, total dissolved solids (TDS), arsenic, gold (Au), and trace metal elements (TME) such as mercury, nickel, lead, and zinc. Moisture content, organic matter (OM), and total organic carbon (TOC) were also determined in the soil samples.

Surface waters exhibit a slightly acidic pH of 5.91, which may promote the mobility of heavy metals. While lead and gold concentrations fall within the limits set by international standards (WHO, AFNOR) and do not pose risks to human health and local ecosystems, metals such as arsenic and nickel reach concentrations exceeding WHO limits (0.09 mg L⁻¹ for As and 1.03 mg L⁻¹ for Ni).

Concentrations of arsenic (0.09 mg L⁻¹), mercury (0.04 mg L⁻¹), nickel (1.03 mg L⁻¹), and lead (0.33 mg L⁻¹) exceed international drinking water standards, indicating potential contamination resulting from artisanal mining activity.

Groundwater from the spring (Ee1), which is used for drinking, contains concerning levels of nickel (0.24 mg L⁻¹) and mercury (0.01 mg L⁻¹); these levels may contribute to the resurgence of certain waterborne diseases reported in the region.

Soil pH values are acidic, ranging from 5.13 to 5.93. Concentrations exceeding standards were recorded for the following metals: mercury (0.12 mg kg⁻¹), nickel (2.51 mg kg⁻¹), zinc (4.00 mg kg⁻¹), and arsenic (0.11 mg kg⁻¹). The presence of residual gold at 0.15 mg kg⁻¹ suggests that artisanal processing methods are inefficient, thereby exacerbating the negative environmental impact. From a social perspective, artisanal gold mining negatively affects health conditions, education, and community lifestyles. The involvement of children in mining activities—at the expense of their schooling—is particularly alarming. Furthermore, the lack of safety measures exposes workers to various risks of accidents and occupational diseases.

Keywords: artisanal gold mining, socio-environmental pollution, trace metal elements, soil degradation, Kimwela.

1.Introduction

L'exploitation artisanale des minerais, notamment l'or, est une activité génératrice des revenus pour des millions de personnes en République Démocratique du Congo (RDC) [1], bien qu'elle s'accompagne des pratiques non régulées aux conséquences environnementales et sanitaires alarmantes [2]. Dans la province du Kongo-central, la localité de Kimwela illustre ce paradoxe : l'orpaillage y est une source de subsistance mais entraîne un risque permanent de dégradation accélérée des écosystèmes [3].

La province du Kongo-central, bien que moins médiatisée que les régions de l'Est de la RDC, n'échappe pas au phénomène de pollution par l'exploitation artisanale. Des sites artisanaux prolifèrent, notamment dans la localité de Kimwela, où l'exploitation aurifère se pratique de manière informelle, sans encadrement réglementaire strict [3].

Le Code minier de 2018 encadre l'exploitation artisanale en RDC (Zones d'Exploitation Artisanale, coopératives agréées), mais son application reste limitée par le manque de moyens de contrôle étatique (SAEMAPE) et la persistance de l'informalité et des réseaux illicites [4].

La dégradation du couvert végétal, la pollution des eaux de surface et souterraines résultants des activités minières présentent de nombreux impacts négatifs, tant au niveau social, environnemental que biologique [5].

L'orpaillage telle qu'elle se pratique dans la localité de Kimwela affecte l'environnement naturel et les autres secteurs socioéconomiques de la région. Cette incidence est diversement appréciée par les différentes parties prenantes, soit l'État, les

chefs de localité et les exploitants (creuseurs, orpailleurs, etc). Ces acteurs apprécient son rôle dans le développement local et national, mais certains craignent la participation de cette activité dans le déséquilibre des facteurs sociaux et la dégradation de l'environnement. En 2021, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a réitéré son classement de la RDC parmi les pays fortement impliqués dans l'Extraction Minière Artisanale et à Petite Échelle de l'Or (EMAPE), avec des retombées sanitaires et environnementales alarmantes [2].

En effet, le secteur minier artisanal et à petite échelle de l'Or représente un segment important de l'industrie minière en RDC, non seulement parce qu'il produit le volume le plus important de substances minérales sur toute l'étendue de la République, spécialement dans la partie Est, mais aussi en raison du nombre de personnes qui en dépendent. L'exploitation minière artisanale de l'Or est une activité de survie à grande échelle qui touche des centaines de milliers de Congolais. Largement informels, l'exploitation et le commerce du secteur artisanal de l'Or échappent au contrôle de l'État, qui n'en tire que des faibles recettes fiscales, insuffisantes pour contribuer significativement aux finances publiques [6].

Au vu des multiples défis sanitaires et environnementaux générés par l'orpaillage, le présent travail s'est proposé d'évaluer l'étendue des pollutions par les analyses physico-chimiques des eaux/sols, de documenter les impacts sociaux en menant des enquêtes auprès des orpailleurs et communautés et enfin de proposer des solutions durables incluant la formalisation ainsi que les technologies alternatives.

2.Méthodologie

2.1. Description de la zone d'étude

La localité de Kimuela est située dans le secteur de Kinkenge dans la province du Kongo-central, à l'ouest de la République Démocratique du Congo. Cette zone rurale, caractérisée par un relief vallonné et traversée par la rivière Ntombe, présente des gisements aurifères alluvionnaires exploités artisanalement (*Figure 1*). Kimuela compte environ 1 000 à 2000 habitants, dont la majorité dépend de l'agriculture et de l'orpaillage. L'exploitation artisanale de l'or y est une activité économique clé, bien qu'informelle. Elle regorge une centaine de sites d'orpailleurs étendus de part et d'autre de la rivière Ntombe, dont quatre sites ont fait l'objet de notre étude.

Les activités d'orpaillage dans la contrée se limitent au basique en utilisant des techniques rudimentaires simples et nécessitant peu d'investissement économique.

La production artisanale de l'or repose à 90 % sur le traitement à la batée dans les gisements alluvionnaires, dans ou à proximité de la rivière Ntombe. L'utilisation du mercure est l'apanage de quelques artisans s'étant regroupés en coopérative.

Les principales étapes de l'exploitation artisanale de l'or à Kimuela consistent au creusement, concassage, broyage, tamisage et séparation de l'or sans ou avec des produits chimiques.

Cinq sites principaux d'orpaillage ont été sélectionnés en fonction de leur activité minière et de leur accessibilité (*Figure 2*).

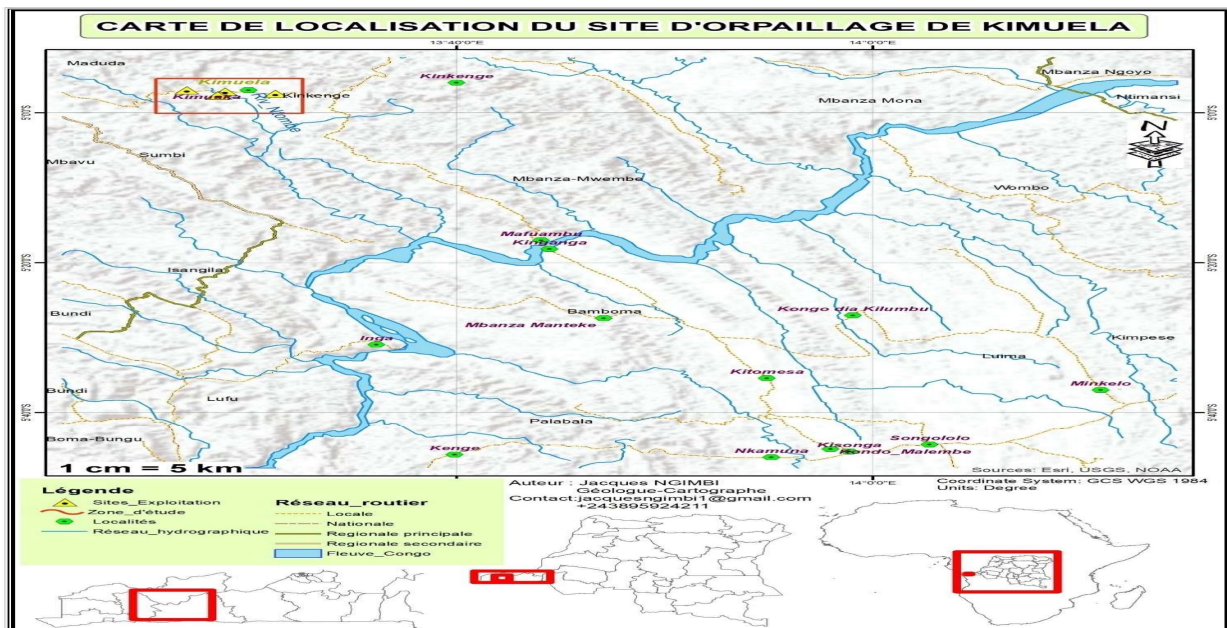


Figure 1 : Localisation des sites d'orpaillage de Kimuela



Figure 2 : Photos du site 1, l'un des sites d'exploitation artisanale de l'or à Kimuela

De haut en bas, de gauche en droite, a) Deux creuseurs artisanaux font le lavement d'un point d'accumulation boueux à l'aide d'un système de tamis en bois. La présence de sédiments noirs indique une zone potentiellement riche en alluvions aurifères. b) L'équipe d'enquête observe le site étant donné la difficulté d'accessibilité ainsi que le manque d'infrastructures rendant le travail artisanal pénible dans des conditions rudimentaires c) Un tuyau long et flexible, utilisé pour le pompage de l'eau ou du sable. Cette image met en évidence les systèmes improvisés d'irrigation ou de drainage dans les sites d'orpaillage. d) Vue sur une fosse d'extraction profonde avec des parois instables. Le site présente des risques évidents d'éboulement, soulignant l'insécurité des exploitations artisanales mal encadrées.

Les sites d'exploitation visités ont été localisés en utilisant le système d'information géographique, de récepteurs GPS Garmin du type eTrex 22x et les coordonnées géographiques (Tableau 1).

Tableau 1 : Les coordonnées géographiques et caractéristiques des sites étudiés

<i>Nom</i>	<i>Coordonnées géographiques</i>	<i>Altitudes</i>	<i>Observations</i>
Site 1	4° 57' 41" S	524 m	Site d'exploitation avec un bon rendement, on y observe plusieurs tranchées d'environ 4 m de largeur, 7 à 10 m de longueur et 5 m de profondeur.
	13° 28' 37" E		
Site 2	4° 57' 45" S	515 m	Site d'exploitation récent au rendement moyen.
	13° 28' 30" E		
Site 3	4° 57' 44" S	519 m	Ancien site d'exploitation mais qui garde un rendement moyen
	13° 28' 31" E		
Site 4	4° 57' 41" S	517 m	Le long de la rivière Ntombe à faible rendement
	13° 28' 37" E		
Site 5	4° 57' 11" S	531 m	La périphérie de la localité de Kimuela
	13° 28' 51" E		

2.2. Collecte de données et échantillonnage

2.2.1. Collecte des données

Deux principales techniques ont été utilisées pour collecter les données : l'observation directe et les entretiens avec les acteurs impliqués dans l'orpaillage. L'observation directe a permis d'identifier les impacts générés par l'exploitation minière artisanale sur l'environnement à l'aide d'une grille d'observation structurée.

Pendant les visites sur le terrain, une attention particulière a été portée à la description de la dégradation du sol, de l'état de la flore et des activités connexes. Chaque site visité a fait l'objet d'une documentation photographique. Les critères liés à la nature, à l'intensité, à la durée, à l'étendue et à la réversibilité des impacts environnementaux ont été privilégiés dans cette phase d'observation.

Des enquêtes socio-environnementales ont été réalisées auprès d'un échantillon de 50 acteurs clés impliqués dans l'orpaillage et la vie locale. Cette population cible était composée d'orpailleurs évoluant directement sur les sites d'extraction, du chef de localité en tant qu'autorité coutumière et de riverains habitant à proximité des zones d'exploitation. Les enquêtes ont été menées à l'aide de questionnaires et de guides d'entretien semi-structurés, administrés en face à face. Ces outils ont été spécifiquement conçus pour explorer plusieurs thématiques centrales, à savoir les techniques d'extraction employées, avec une attention particulière portée à l'usage potentiel du mercure et du cyanure, les impacts perçus par les populations sur leur santé, l'activité agricole et la dégradation des sols, ainsi que les conditions de travail prévalant sur les sites, notamment en ce qui concerne la sécurité des opérateurs et la question du travail des enfants. Les informations issues de ces entretiens individuels ont permis de cerner les réalités socio-économiques qui sous-tendent la pratique de l'orpaillage dans la zone d'étude.

2.2.2. Collecte des échantillons

L'échantillonnage ciblé [7] a été pratiqué et les échantillons ont été prélevés à des endroits précis selon les renseignements obtenus d'une potentielle contamination ou un impact sur le sol ou sur l'eau. Une phase préparatoire minutieuse a précédé la descente sur le terrain afin de garantir la fiabilité des prélèvements et d'éviter toute contamination exogène.

Des flacons de prélèvement (1 litre) en polypropylène ont été utilisés pour les échantillons d'eau. Les sacs plastiques du type ziploc ont servi pour les échantillons des sols. Ensuite, tous les échantillons ont été stockés dans des glacières à une température d'environ 4°.

Trois échantillons d'eaux de surface ont été collectés, respectivement en amont de la rivière Ntombe (Ee2), en aval (Ee3), au point source (Ee4) et un échantillon d'eau souterraine a été prélevé à la source Nkelo (Ee1), lieu aménagé pour recueillir l'eau destinée à la consommation. Cinq échantillons des résidus de sol ont été prélevés après traitement, dont quatre (Er1, Er2, Er3, Er4) provenant de quatre sites miniers actifs différents, et un échantillon (Er5) obtenu dans la périphérie de la localité pour servir de comparaison. Chaque échantillon prélevé a été décrit et identifié dans le *Tableau 2* ci-dessous.

Tableau 2 : Échantillons des eaux et des sols prélevés sur les différents sites

<i>Résidus de sols (après traitement)</i>			<i>Eaux de surface et souterraine</i>		
<i>Code</i>	<i>Provenance</i>	<i>Identité de l'échantillon</i>	<i>Code</i>	<i>Provenance</i>	<i>Identité de l'échantillon</i>
Er1	Site 1	Echantillon de résidus de sol après traitement	Ee1	A la source Nkelo (lieu aménagé pour recueillir l'eau souterraine pour consommation)	Echantillon d'eau souterraine
Er2	Site 2	Echantillon de résidus de sol après traitement	Ee2	En amont de la rivière Ntombe	Echantillon d'eau de surface
Er3	Site 3	Echantillon de résidus de sol après traitement	Ee3	En aval de la rivière Ntombe	Echantillon d'eau de surface
Er4	Site 4	Echantillon de résidus de sol après traitement	Ee4	Au point source (lieu à mi-chemin entre l'aval et l'amont de la rivière Ntombe)	Echantillon d'eau de surface
Er5	Site 5 : périphéries de la localité	Echantillon de sol dans la périphérie de la localité			

2.3. Détermination des paramètres physico-chimiques

Les analyses ont été réalisées en deux phases : des mesures in situ pour les eaux, et des analyses en laboratoire pour l'ensemble des échantillons d'eau et de sol au Laboratoire central du Centre de Recherches Géologiques et Minières (CRGM) de Kinshasa.

2.3.1. Analyse in situ des eaux

Les paramètres physico-chimiques suivants ont été mesurés directement sur le terrain à l'aide d'une sonde multi-paramètres HANNA – HI 98198 : la température, le pH, la conductivité électrique et les solides dissous totaux (TDS). L'appareil HANNA – HI 98198 utilise des capteurs spécifiques pour mesurer directement plusieurs paramètres physico-chimiques des eaux. La sonde intègre un capteur de température (thermistor) qui détecte les variations de température de l'eau et fournit une lecture directe en degrés Celsius (°C). Pour le pH, la sonde utilise un capteur constitué d'une électrode de verre sensible aux ions H_3O^+ , qui produit un signal électrique proportionnel à la concentration de ces ions, converti ensuite en valeur de pH. La conductivité électrique (CE) est mesurée à l'aide de deux électrodes qui appliquent une tension à l'eau et mesurent sa capacité à conduire l'électricité, les

résultats étant exprimés en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Les solides dissous totaux (TDS) sont calculés indirectement à partir de la conductivité électrique en appliquant un facteur de conversion, et sont exprimés en milligrammes par litre (mg L^{-1}).

2.3.2. Analyse au laboratoire

a. Détermination de métaux dans les échantillons d'eau

Les éléments suivants ont été déterminés dans les échantillons d'eau : l'arsenic (As), le mercure (Hg), le nickel (Ni), l'or (Au), le plomb (Pb) et le zinc (Zn).

Pour le dosage de l'arsenic, la méthode par spectrophotométrie d'absorption moléculaire après formation d'un complexe coloré avec le diéthylthiocarbamate d'argent a été utilisée [8]. Le mode opératoire a consisté à prélever 35 mL de l'échantillon auxquels on a ajouté successivement 5 mL d'acide chlorhydrique, 2 mL d'iodure de potassium et 8 gouttes de chlorure stanneux, puis attendre 15 minutes pour la réduction de l'arsenic. L'arsine (AsH_3) a été générée en ajoutant du zinc en grenaille, puis absorbée dans une solution de diéthylthiocarbamate d'argent, avant de mesurer l'absorbance à 535 nm.

Le dosage du mercure total a été réalisé par spectrométrie d'absorption atomique avec génération de vapeur froide [9]. Le mode opératoire inclut l'oxydation de l'échantillon avec du permanganate de potassium et du persulfate, la réduction du mercure avec du chlorure stanneux, puis la libération du mercure sous forme de vapeur froide et la mesure à 253,7 nm.

Le nickel a été dosé par spectrophotométrie après formation d'un complexe coloré avec la diméthylglyoxime [10]. Après ajustement du pH de l'échantillon, de la diméthylglyoxime a été ajoutée, le complexe a été extrait avec du chloroforme, et l'absorbance a été mesurée à 445 nm.

L'or a été analysé en utilisant la méthode par précipitation avec l'acide ascorbique et quantification par gravimétrie [11]. L'acide ascorbique a été ajouté à l'échantillon et le précipité d'or obtenu a été filtré, séché puis pesé.

Le plomb a été déterminé par précipitation sous forme de sulfure de plomb en présence de sulfure de sodium [12]. Après ajustement du pH de l'échantillon et ajout de cyanure de potassium pour complexer les interférents, le plomb a été précipité avec du sulfure de sodium sous forme d'une poudre noire (PbS).

Enfin, le zinc a été analysé par spectrophotométrie après formation d'un complexe coloré avec la dithizone [13]. Le pH de l'échantillon a été ajusté à 8,3 puis le zinc a été extrait avec une solution de dithizone dans le chloroforme, et l'absorbance a été mesurée à 530 nm.

b. Détermination des paramètres physico-chimique et des métaux dans les échantillons des sols

Les échantillons de sol ont été analysés pour les paramètres suivants : pH (H_2O et KCl), humidité à 105°C , matières organiques (MO), carbone organique total (COT) et les métaux lourds (As, Hg, Ni, Pb, Zn, Au).

Deux types de mesures du pH ont été effectués : le pH H_2O et le pH KCl , conformément à la norme NF ISO 10390 [14]. Pour le pH H_2O , 10 g de l'échantillon de sol ont été pesés dans un bécher, 50 mL d'eau distillée ont été ajoutés, le mélange a été agité sur un agitateur magnétique pendant 20 minutes. Le mélange a été filtré à l'aide d'un papier filtre de 0.45 mm après repos, puis le pH a été prélevé. La procédure est la même pour le pH KCl , sauf l'utilisation de la solution de KCl à 1 mol/L à la place de l'eau distillée.

La teneur en eau du sol a été déterminée par la perte de masse après séchage à 105°C dans une étuve jusqu'au poids constant (NF ISO 11465) [15]. 10 grammes de l'échantillon de sol humide (P_1) ont été pesés dans un creuset, placés à l'étuve à 105°C pendant 2 heures, puis refroidis dans un dessiccateur avant d'être pesés (P_2). La teneur en humidité a été calculée selon la formule : $(\%) \text{H}_2\text{O} = [(P_1 - P_2) / P_1] \times 100$.

La teneur en matières organiques a été déterminée par calcination à 450°C (NF XP P94-047) [16]. Dix grammes de l'échantillon de sol sec (préalablement séché à 105°C) ont été pesés dans un creuset en porcelaine, placés dans un four à 450°C pendant 3 heures, puis refroidis dans un dessiccateur avant pesée du résidu. La teneur en matières organiques a été calculée suivant

l'expression : (%) MO = $(m_1 - m_2) / (m_1 - m_0)$, où m_0 est la masse du creuset vide, m_1 la masse du creuset avec l'échantillon avant calcination, et m_2 la masse du creuset avec l'échantillon calciné.

Le carbone organique total a été estimé à partir de la teneur en matières organiques en utilisant le facteur de Van Bemmelen, qui stipule que la matière organique contient en moyenne 58 % de carbone [17]. Le COT a donc été calculé suivant l'expression : COT = MO x 0,58.

Pour le dosage des métaux (As, Hg, Ni, Pb, Zn, Au) dans les sols, les méthodes utilisées sont similaires à celles employées pour l'eau, avec une étape supplémentaire de digestion acide pour détruire les matières organiques du sol [18]. Un gramme de sol a été pesé dans un bécher, 15 mL d'eau régale (HCl : HNO₃, 3:1) ont été ajoutés, et le mélange a été chauffé à ébullition douce pendant 30 minutes sur une plaque chauffante. Après refroidissement, la solution a été filtrée sur papier filtre sans cendres, et le résidu a été rincé à l'eau chaude jusqu'à l'absence d'ions chlorure. Le filtrat a été conservé pour les dosages spécifiques des métaux, selon les modes opératoires décrits pour les analyses des eaux.

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats des analyses d'échantillons d'eaux

Les mesures des paramètres (température, pH, conductivité et TdS) effectuées sur les échantillons d'eau sont données dans le *Tableau 3* ci-dessous.

Tableau 3 : Résultats des paramètres in - situ

<i>Sites de prélèvement</i>	<i>Température en °C</i>	<i>pH</i>	<i>Conductivité électrique µS/cm</i>	<i>TdS en ppm</i>
Point source (lieu de référence, le long de la rivière Ntombe) - Ee1	24,1	5,91	300	91
Amont de la Rivière Ntombe - Ee2	24,2	6,23	250	65
En aval de la Rivière Ntombe - Ee3	25,3	6,35	280	68
Nkelo (lieu aménagé pour recueillir l'eau de boisson provenant d'une source souterraine) - Ee4	25,5	6,88	300	102
Norme	25 - 30	6.5 - 8.5	≤ 400	500

Les mesures montrent que le point source, situé le long de la rivière Ntombe, sert de lieu de référence. L'eau y est légèrement acide avec un pH de 5,91. Cette acidité peut être due à la présence de matières organiques dans l'eau ou à la nature des sols environnants. La température de 24,1°C est relativement fraîche. La conductivité de 300 µS et les solides dissous totaux (TDS) de 91 ppm indiquent une quantité modérée de sels minéraux.

Le site en amont de la rivière Ntombe se trouve avant les zones où se pratique l'orpaillage. L'eau y est moins acide qu'au point source, avec un pH de 6,23. La température est presque la même (24,2°C). La conductivité de 250 µS et les TDS de 65 ppm sont les plus faibles de tous les sites mesurés. Cela signifie que cette eau contient moins de sels minéraux dissous et qu'elle est peu influencée par les activités humaines. Ce point représente donc l'état naturel de la rivière avant qu'elle ne traverse les zones minières.

Le site en aval de la rivière Ntombe se trouve après les zones d'exploitation minière. La température y est plus élevée (25,3°C), soit une augmentation d'environ 1°C par rapport à l'amont. Cette hausse peut s'expliquer par le fait que les arbres ont été coupés pour l'exploitation minière, laissant la rivière plus exposée au soleil, ou par des rejets d'eau chaude venant des activités d'orpaillage. Le pH est de 6,35, proche de celui de l'amont. La conductivité (280 µS) et les TDS (68 ppm) sont légèrement plus

élevés qu'en amont, ce qui suggère que l'eau reçoit des apports supplémentaires en minéraux provenant probablement des sites miniers situés juste avant ce point.

Le site Nkelo est une source souterraine aménagée pour recueillir l'eau de boisson des habitants. L'eau a un pH de 6,88 avec une température de 25,5°C, la plus élevée. La conductivité de 300 μS et les TDS de 102 ppm sont les plus élevés de tous les sites. Cette eau est donc plus riche en sels minéraux que les eaux de surface, car elle a séjourné longtemps dans le sol et s'est chargée en minéraux au contact des roches. Ce site est important car il permet de connaître la qualité de l'eau que les populations boivent réellement.

Les résultats des métaux obtenus dans les différents échantillons d'eaux sont donnés dans le *Tableau 4* ci-dessous.

Tableau 4 : Résultats des analyses des métaux dans les échantillons d'eau

Paramètres	Normes OMS(mg L^{-1})	Source (Nkelo)	En Amont	En Aval	Au Point Source
Arsenic (mg L^{-1})	0.01	0,01	0,05	0,09	0,03
Mercuré (mg L^{-1})	0.01	0,01	0,04	0,04	0,02
Au (mg L^{-1})	-	0,00	0,00	0,00	0,00
Nickel (mg L^{-1})	0.07	0,24	0,51	1,03	0,43
Plomb (mg L^{-1})	0.01	0,03	0,11	0,30	0,33
Zinc (mg L^{-1})	3.0	0,34	1,22	1,54	1,01

Les résultats indiquent que l'arsenic est présent dans tous les échantillons, mais à des concentrations variables. La source Nkelo, qui fournit l'eau de boisson, a la plus faible teneur avec 0,01 mg L^{-1} . En remontant vers l'amont, on trouve 0,05 mg L^{-1} , puis 0,03 mg L^{-1} au point source. C'est en aval que la concentration est la plus élevée avec 0,09 mg L^{-1} , soit neuf fois plus qu'à Nkelo. Cette augmentation en aval pourrait être liée aux rejets des déchets miniers situés en amont.

Le mercure est présent dans tous les échantillons. La source Nkelo a la plus faible concentration (0,01 mg L^{-1}). Les sites en amont et en aval présentent des teneurs élevées de 0,04 mg L^{-1} , soit quatre fois plus que celle de Nkelo. Le point source a une valeur assez faible de 0,02 mg L^{-1} . La présence de mercure, même à faible dose, est préoccupante car il est souvent utilisé dans l'orpaillage pour amalgamer l'or. Les concentrations les plus élevées en amont et en aval indiquent probablement l'utilisation de mercure sur les sites d'exploitation.

L'or n'a pas été détecté dans les échantillons d'eau pour la méthode utilisée, avec des limites de détection faible. D'autres techniques pourraient être proposées dans les prochaines études.

Le nickel montre une nette progression de l'amont vers l'aval. À la source Nkelo, la concentration est de 0,24 mg L^{-1} . En amont, elle augmente à 0,51 mg L^{-1} , puis à 0,43 mg L^{-1} au point source. C'est en aval qu'elle atteint son maximum avec 1,03 mg/L , soit plus du double de la valeur de Nkelo. Cette forte concentration en aval suggère un apport important de nickel par les activités minières.

Le plomb présente des concentrations faibles à Nkelo (0,03 mg L^{-1}) et plus élevées sur les autres sites. En amont, on trouve 0,11 mg L^{-1} , mais c'est au point source (0,33 mg L^{-1}) et en aval (0,30 mg L^{-1}) que les valeurs sont les plus fortes, soit environ dix fois plus qu'à Nkelo. Ces teneurs élevées en plomb, surtout au point source et en aval, pourraient être liées aux rejets miniers ou à la nature géologique du terrain traversé.

Le zinc est présent dans tous les échantillons d'eau analysés dans des proportions variables. La source Nkelo a la plus faible teneur (0,34 mg L^{-1}). Le point source (1,01 mg L^{-1}) et l'amont (1,22 mg L^{-1}) ont des concentrations élevées. C'est en aval que le

zinc atteint le maximum de 1,54 mg L⁻¹, soit plus de quatre fois la valeur de Nkelo. Cette forte concentration en aval indique un apport important de zinc par les activités situées en amont.

3.2. Résultats des analyses d'échantillons de sols

Les résultats des analyses physico-chimiques des échantillons de sol sont donnés dans le *Tableau 5* ci-dessous.

Tableau 5 : Résultats des analyses des sols (sédiments après lavage) des sites de Kimuela et de sa périphérie

Paramètres		Normes OMS	SITE1 Er1	SITE 2 Er2	SITE 3 Er3	SITE 4 Er4	Site 5 Er5
pH	H ₂ O	6,0 -7,0	5,93	5,16	5,3	5,55	5,22
	KCl		5,11	4,36	4,51	4,80	4,44
Humidité à 105°C (%)		50	2,22	5,80	6,11	2,01	3,21
MO (%)		5	1.80	2.05	2.15	1,55	1.85
COT (%)		-	1,04	1,18	1,24	0,89	1,07
Arsenic (mg Kg ⁻¹)		0.01-0.05	0,11	0,05	0,02	0,07	0.08
Mercure (mg Kg ⁻¹)		2.10-5 – 0.05	0,02	0,12	0,09	0,01	0.12
Nickel (mg Kg ⁻¹)		0.02 – 0.05	2,51	1,51	0,32	0,35	0,92
Au (mg Kg ⁻¹)		0.02 – 0.05	0,08	0,00	0,00	0,15	0,00
Plomb (mg Kg ⁻¹)		0.1 – 0.05	0,24	0,11	0,01	0,05	0,21
Zinc (mg Kg ⁻¹)		≤5,0	4,00	3,53	2,00	3,01	2,59

Les résultats révèlent que le pH des sols est acide sur tous les sites, avec des valeurs qui varient (entre 5,16 et 5,93) pour les mesures effectuées avec l'eau. Ces valeurs sont plus basses, entre (4,36 et 5,11) avec le KCl. L'acidité de ces sols peut favoriser la mobilité des métaux dans l'environnement en les rendant bio disponibles [20]. L'humidité varie fortement, avec des valeurs élevées sur les sites 2 (5,80%) et 3 (6,11%), probablement en raison de leur proximité avec les zones de lavage, tandis que les sites 1 (2,22%) et 4 (2,01%) sont plus secs. Le sol de la périphérie présente un taux d'humidité intermédiaire de 3,21%. Les teneurs en matières organiques sont faibles sur tous les sites (1,55% à 2,15%), ce qui est normal pour des sols perturbés par l'activité minière [21]. Le carbone organique total est faible avec des valeurs entre 0,89% (site 4) et 1,24% (site 3).

Concernant les métaux dans les sols, chaque site présente un profil distinct. Le site 1 se caractérise par les concentrations élevées en nickel (2,51 mg Kg⁻¹), en plomb (0,24 mg Kg⁻¹), en zinc (4,00 mg Kg⁻¹) et en arsenic (0,11 mg Kg⁻¹). Il contient également de l'or (0,08 mg Kg⁻¹) et du mercure (0,02 mg Kg⁻¹). Ce site apparaît comme le plus pollué avec des concentrations supérieures aux normes de UE-OMS [2].

Le site 2 est marqué par une forte teneur en mercure (0,12 mg Kg⁻¹), la plus élevée avec celle de la périphérie, et des concentrations notables en zinc (3,53 mg Kg⁻¹), nickel (1,51 mg Kg⁻¹) et arsenic (0,05 mg Kg⁻¹). L'or n'a pas été détecté dans les échantillons du site 2 pour la méthode utilisée.

Le site 3 présente des concentrations élevées en mercure (0,09 mg Kg⁻¹), comparativement aux normes. Il présente les plus faibles teneurs en arsenic (0,02 mg Kg⁻¹), nickel (0,32 mg Kg⁻¹) et plomb (0,01 mg Kg⁻¹), mais des concentrations relativement élevées en mercure (0,09 mg Kg⁻¹).

L'arsenic est présent sur tous les sites à des concentrations faibles ($0,02$ à $0,11 \text{ mg Kg}^{-1}$). Le site 1 a la teneur la plus élevée ($0,11 \text{ mg Kg}^{-1}$), suivie par la périphérie ($0,08 \text{ mg Kg}^{-1}$) et le site 4 ($0,07 \text{ mg Kg}^{-1}$).

Le mercure montre des valeurs plus élevées sur les sites 2 ($0,12 \text{ mg Kg}^{-1}$) et 3 ($0,09 \text{ mg Kg}^{-1}$), ainsi que dans la périphérie ($0,12 \text{ mg Kg}^{-1}$). Ces concentrations sont préoccupantes car le mercure est un métal toxique utilisé dans l'orpaillage. Les sites 1 et 4 ont des teneurs très faibles ($0,02$ et $0,01 \text{ mg Kg}^{-1}$).

Le nickel est très présent sur le site 1 avec $2,51 \text{ mg Kg}^{-1}$, soit bien plus que sur les autres sites. Le site 2 ($1,51 \text{ mg Kg}^{-1}$) et la périphérie ($0,92 \text{ mg Kg}^{-1}$) viennent ensuite. Les sites 3 et 4 ont les plus faibles teneurs ($0,32$ et $0,35 \text{ mg Kg}^{-1}$).

L'or a été détecté uniquement sur deux sites miniers : le site 1 avec $0,08 \text{ mg Kg}^{-1}$ et surtout le site 4 avec $0,15 \text{ mg Kg}^{-1}$. Ces résultats confirment que ces sites sont effectivement exploités pour l'extraction aurifère. Aucun or n'a été trouvé sur les sites 2, 3 et dans la périphérie.

Le plomb est présent surtout sur le site 1 ($0,24 \text{ mg Kg}^{-1}$) et dans la périphérie ($0,21 \text{ mg Kg}^{-1}$). Le site 2 a une teneur moyenne ($0,11 \text{ mg Kg}^{-1}$), tandis que les sites 3 et 4 ont des valeurs très faibles ($0,01$ et $0,05 \text{ mg Kg}^{-1}$).

Le zinc est le métal le plus abondant dans tous les échantillons. Le site 1 a la concentration la plus élevée avec $4,00 \text{ mg Kg}^{-1}$, suivi du site 2 ($3,53 \text{ mg Kg}^{-1}$) et du site 4 ($3,01 \text{ mg Kg}^{-1}$). La périphérie ($2,59 \text{ mg Kg}^{-1}$) et le site 3 ($2,00 \text{ mg Kg}^{-1}$) ont des teneurs plus faibles.

En résumé, les sols de ces sites miniers présentent une acidité marquée et des teneurs variables en métaux lourds et les ETM. Le site 1 se distingue par des concentrations élevées en nickel, plomb, zinc et arsenic, ainsi que par la présence d'or. Les sites 2 et 3 sont plus marqués par le mercure. Le site 4, bien que contenant le plus d'or, a des teneurs plus faibles en autres métaux. La périphérie, servant de point de comparaison, montre des concentrations notables en mercure et en plomb, ce qui pourrait indiquer une dispersion des polluants hors des zones d'exploitation.

3.3. Discussion

L'examen des paramètres physico-chimiques mesurés in situ sur les différents points de prélèvement révèle des variations notables entre les sites. Le point source, situé le long de la rivière Ntombe, présente une eau légèrement acide avec un pH de 5,91, tandis que la source Nkelo, utilisée pour l'eau de boisson, a un pH de 6,88, soit le moins acide de tous les échantillons. La température la plus basse est enregistrée au point source ($24,1^{\circ}\text{C}$) et la plus élevée à Nkelo ($25,5^{\circ}\text{C}$), cette dernière étant caractéristique d'une eau souterraine dont la température est stable. La conductivité et les solides dissous totaux (TDS) sont plus élevés à Nkelo et au point source ($300 \mu\text{S}$ et $91\text{-}102 \text{ ppm}$) qu'en amont ($250 \mu\text{S}$ et 65 ppm), indiquant une minéralisation plus forte de ces eaux.

En ce qui concerne les métaux lourds dans l'eau, les résultats montrent des tendances nettes selon la position des sites par rapport aux zones d'exploitation. La source Nkelo, qui alimente la population en eau de boisson, présente systématiquement les concentrations les plus faibles pour la plupart des métaux : arsenic ($0,01 \text{ mg L}^{-1}$), mercure ($0,01 \text{ mg L}^{-1}$), plomb ($0,03 \text{ mg L}^{-1}$) et zinc ($0,34 \text{ mg L}^{-1}$). Seul le nickel y est relativement présent avec $0,24 \text{ mg L}^{-1}$.

Le site situé en amont de la rivière Ntombe, avant les zones d'activité minière, montre des concentrations déjà plus élevées qu'à Nkelo, notamment pour l'arsenic ($0,05 \text{ mg L}^{-1}$), le mercure ($0,04 \text{ mg L}^{-1}$), le nickel ($0,51 \text{ mg L}^{-1}$), le plomb ($0,11 \text{ mg L}^{-1}$) et le zinc ($1,22 \text{ mg L}^{-1}$). Ces valeurs constituent une base de référence pour évaluer l'état de la rivière avant son entrée dans la zone d'exploitation.

Le site en aval, localisé après les zones minières, enregistre les concentrations les plus élevées pour plusieurs métaux : arsenic ($0,09 \text{ mg L}^{-1}$, soit neuf fois plus qu'à Nkelo), nickel ($1,03 \text{ mg L}^{-1}$, plus du double de l'amont) et zinc ($1,54 \text{ mg L}^{-1}$, soit quatre fois et demie plus qu'à Nkelo). Le mercure ($0,04 \text{ mg L}^{-1}$) reste au même niveau qu'en amont. Ces fortes concentrations en aval

suggèrent un apport important de métaux par les rejets des activités d'orpaillage situées entre l'amont et l'aval, comme cela a été observé dans d'autres contextes miniers en Afrique [19].

Le point source, qui sert de lieu de référence le long de la rivière, présente des concentrations intermédiaires pour l'arsenic ($0,03 \text{ mg L}^{-1}$), le mercure ($0,02 \text{ mg L}^{-1}$) et le nickel ($0,43 \text{ mg L}^{-1}$). Il se distingue toutefois par la plus forte teneur en plomb ($0,33 \text{ mg L}^{-1}$), comparable à celle de l'aval, et une teneur élevée en zinc ($1,01 \text{ mg L}^{-1}$). Cette situation particulière mérite une attention car ce site est également situé dans une zone influencée par les activités anthropiques.

L'or n'a été détecté dans aucun des échantillons d'eau, avec des valeurs nulles sur tous les sites. Cela signifie que ce métal, sous forme dissoute, n'est pas présent dans ces eaux ou alors à des concentrations trop faibles pour être détectées par les méthodes utilisées.

L'analyse des sols prélevés sur les quatre sites miniers et dans la périphérie du village révèle des caractéristiques physico-chimiques et des teneurs en métaux lourds variables selon les emplacements.

Concernant les propriétés physico-chimiques, tous les sols sont acides, avec des pH à l'eau compris entre 5,16 (site 2) et 5,93 (site 1). Les pH au KCl, toujours plus bas (4,36 à 5,11), confirment cette acidité qui peut favoriser la mobilité des métaux lourds dans l'environnement [20]. L'humidité varie fortement, avec des valeurs élevées sur les sites 2 (5,80%) et 3 (6,11%), probablement en raison de leur proximité avec les zones de lavage, tandis que les sites 1 (2,22%) et 4 (2,01%) sont plus secs. La périphérie présente un taux d'humidité intermédiaire de 3,21%. Les teneurs en matières organiques sont faibles sur tous les sites (1,55% à 2,15%), ce qui est normal pour des sols perturbés par l'activité minière [21]. Le carbone organique total suit la même tendance, avec des valeurs entre 0,89% (site 4) et 1,24% (site 3).

Pour les métaux lourds dans les sols, chaque site présente un profil distinct. Le site 1 se caractérise par les concentrations les plus élevées en nickel ($2,51 \text{ mg Kg}^{-1}$), en plomb ($0,24 \text{ mg Kg}^{-1}$), en zinc ($4,00 \text{ mg Kg}^{-1}$) et en arsenic ($0,11 \text{ mg Kg}^{-1}$). Il contient également de l'or ($0,08 \text{ mg Kg}^{-1}$) et du mercure ($0,02 \text{ mg Kg}^{-1}$). Ce site apparaît comme le plus pollué par une combinaison de plusieurs métaux.

Le site 2 est marqué par une forte teneur en mercure ($0,12 \text{ mg Kg}^{-1}$), la plus élevée avec celle de la périphérie, et des concentrations notables en zinc ($3,53 \text{ mg Kg}^{-1}$), nickel ($1,51 \text{ mg Kg}^{-1}$) et arsenic ($0,05 \text{ mg Kg}^{-1}$).

Le site 3 présente la particularité d'avoir les plus faibles teneurs en arsenic ($0,02 \text{ mg Kg}^{-1}$), nickel ($0,32 \text{ mg Kg}^{-1}$) et plomb ($0,01 \text{ mg Kg}^{-1}$), mais des concentrations relativement élevées en mercure ($0,09 \text{ mg Kg}^{-1}$).

Le site 4 se distingue par la présence de la plus forte concentration en or ($0,15 \text{ mg Kg}^{-1}$), mais des teneurs généralement faibles pour les autres métaux, à l'exception du zinc ($3,01 \text{ mg Kg}^{-1}$). Le mercure y est très bas ($0,01 \text{ mg Kg}^{-1}$), tout comme le nickel ($0,35 \text{ mg Kg}^{-1}$) et le plomb ($0,05 \text{ mg Kg}^{-1}$).

Le site 5, situé en périphérie du village et servant de point de comparaison, montre des concentrations préoccupantes en mercure ($0,12 \text{ mg Kg}^{-1}$), équivalentes à celles du site 2, ainsi qu'en plomb ($0,21 \text{ mg Kg}^{-1}$) et en arsenic ($0,08 \text{ mg Kg}^{-1}$). Ces valeurs, proches de celles des sites miniers, suggèrent une dispersion des polluants hors des zones d'exploitation, probablement par le vent, l'eau ou les déplacements des personnes [22].

Comparaison avec d'autres contextes miniers en Afrique subsaharienne

Les résultats obtenus sur les sites d'orpaillage de Kimuela s'inscrivent dans un contexte plus large de pollution liée à l'exploitation minière artisanale en Afrique subsaharienne. Une revue récente de la littérature portant sur 167 publications couvrant la période 1995-2024 a mis en évidence des tendances significatives de pollution chimique dues à l'expansion et à l'intensification des activités d'orpaillage sur le continent [23].

En ce qui concerne la contamination des sols par le mercure, les valeurs mesurées à Kimuela (0,01 à 0,12 mg Kg⁻¹) sont nettement inférieures à celles observées dans d'autres pays africains. Les niveaux les plus élevés de pollution mercurielle des sols miniers sont en effet relevés en Afrique de l'Ouest, une région avec une longue tradition d'orpaillage, particulièrement au Burkina Faso où des teneurs atteignant 185,94 mg Kg⁻¹ ont été rapportées [24], et au Ghana avec 71 mg Kg⁻¹ [25]. Une étude menée dans la région du Nord du Burkina Faso a même mis en évidence un échantillon de sol présentant une teneur en mercure de 13,45 mg Kg⁻¹ [26], soit plus de 100 fois les valeurs mesurées à Kimuela. Cette différence s'explique probablement par la méthode utilisée, l'ancienneté et l'intensité des activités minières dans ces pays ouest-africains, où l'orpaillage est pratiqué depuis plusieurs décennies sur une grande échelle.

Pour les écosystèmes aquatiques, les niveaux de pollution observés en Afrique sont également préoccupants. La plus forte concentration de mercure dans les eaux a été mesurée en Ouganda avec 1,21 mg/L [27], soit des valeurs bien supérieures à celles trouvées dans la rivière Ntombe (0,01 à 0,04 mg L⁻¹). Au Mali, la situation est encore plus alarmante sur le fleuve Falémé, où une pollution au cyanure a été évaluée à 214 %, soit 209 fois supérieure à la norme malienne [28]. Des études menées au Sénégal dans la région de Kédougou confirment l'utilisation généralisée du mercure et du cyanure sur les sites d'orpaillage, avec des doses non réglementées [29].

Synthèse et implications pour la zone d'étude

Les résultats obtenus à Kimuela, bien que montrant des niveaux de contamination inférieurs à ceux observés dans les hotspots miniers ouest-africains, présentent des tendances similaires : acidification des sols, présence de mercure sur les sites d'exploitation, et augmentation des concentrations de métaux lourds en aval des zones minières. La présence de mercure (0,12 mg/kg) dans la périphérie du village suggère une dispersion des polluants hors des zones d'exploitation, phénomène également observé dans d'autres contextes africains.

Les facteurs aggravants identifiés dans la littérature s'appliquent potentiellement à la zone d'étude. Il s'agit de : conflits d'intérêts entre parties prenantes, pression économique pour maximiser l'extraction, manque d'accès aux technologies propres, vulnérabilité climatique des populations locales, taux élevé d'abandon scolaire et une diminution de la fréquentation scolaire. La persistance de pratiques polluantes, même à des niveaux modérés, risque d'entraîner une dégradation progressive et possiblement irréversible des écosystèmes si aucune mesure de prévention et de gestion des risques n'est mise en place.

Les recommandations suivantes sont proposées à l'issue de cette étude.

Encadrement technique : substitution du mercure **par des méthodes gravimétriques (sluices, tables à secousses)** ; neutralisation des pH acides **par amendements calcaires pour immobiliser les métaux**.

Suivi analytique renforcé : campagnes saisonnières pour évaluer la variabilité des rejets ; dosage des cyanures dans les eaux en complément.

Recherche appliquée : tests de phytoremédiation (avec des hyperaccumulateurs locaux comme *Pteris vittata* pour l'As).

Encadrement légal : Renforcer l'application du Code minier (2018) dans les Zones d'Exploitation Artisanale (ZEA).

Suivi environnemental : Mettre en place un monitoring régulier des eaux et sols.

Sensibilisation : Former les orpailleurs aux risques chimiques et aux bonnes pratiques.

Conclusion

L'étude révèle une contamination préoccupante des eaux et des sols de Kimuela par les métaux (Hg, As, Pb, Ni), dépassant les normes OMS. Cette pollution, liée à l'orpaillage artisanal, pose des risques sanitaires (exposition chronique) et environnementaux (dégradation des sols, pollution aquatique).

Bien que moins sévère qu'ailleurs, la situation nécessite une réponse rapide pour éviter une crise écologique et sanitaire. Une approche combinant réglementation, techniques vertes et éducation est essentielle pour un développement minier durable à Kimuela.

Références

- [1] PACT. (2010). Promines Study. Artisanal Mining in the Democratic Republic of Congo. Pact Inc.
- [2] Organisation Mondiale de la Santé. (2017). Risques pour la santé au travail et l'environnement associés à l'extraction minière artisanale et à petite échelle de l'or [Environmental and occupational health hazards associated with artisanal and small-scale gold mining.
- [3] Kowa, D., Mbulu, J.N., Batomene, M.J., et al. (2022). Rapport d'enquête sur l'orpaillage artisanal dans le Kongo Central. Bureau d'étude environnementale « Bien-être environnemental ».
- [4] Journal Officiel de la République Démocratique du Congo, Cabinet du Président de la République. (2018). Ordonnance Loi n°18/004 du 13 Mars 2018 fixant la nomenclature des droits, taxes et redevances de la Province, et de l'Entité Territoriale Décentralisée ainsi que les Modalités de leurs répartitions.
- [5] Denis, G. (2016). « L'exploitation artisanale de l'or en Côte d'Ivoire : la persistance d'une activité illégale ». European scientific journal, Vol. 12, N° 3.
- [6] Usaid, Global Communities, Lievin sources. (2020). Analyse de marché : L'or de l'exploitation artisanale et à petite échelle (EMAPE) de l'Est de la RDC.
- [7] Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec. (2011). Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : cahier 3 – Échantillonnage des eaux souterraines, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. 60 p., 1 annexe.
- [8] APHA. (2012). Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd edition edited by E. W. Rice, R. B. Baird, A. D. Eaton and L. S. Clesceri
- [9] ISO 12846. (2012). Water quality — Determination of mercury — Method using atomic absorption spectrometry (AAS) with and without enrichment.
- [10] Sandell, E. B. (1959) Colorimetric Determination of Traces of Metals. 3rd Edition, Interscience Publishers, Inc., New York.
- [11] Beamish, F. E. (1966) The analytical chemistry of the noble metals. Pergamon Press, Oxford, London, Edinburgh, New York, Toronto, Paris, Frankfurt, 41-45.
- [12] Kolthoff, I.M., & Sandell, E.B. (1952). Textbook of Quantitative Inorganic Analysis (3^e édition).
- [13] Bassett, J. & Matthews, P.J. (1974). A spectrophotometric method for the determination of boron in water by use of ferroin.
- [14] AFNOR. (2005). NF ISO 10390 : Qualité du sol - Détermination du pH.
- [15] AFNOR. (1994). NF ISO 11465 : Qualité du sol - Détermination de la teneur en matière sèche et en eau après séchage.
- [16] AFNOR. (1998). NF XP P94-047 : Détermination de la teneur en matière organique par calcination.

- [17] Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In *Methods of Soil Analysis*, Part 2.
- [18] Tchaptchet, W. N., & Mpakam, H. G. (2022). Évaluation des impacts environnementaux de l'exploitation artisanale de l'or dans la localité de Bétaré-Oya (Cameroun). *European Scientific Journal*, 18(15), 102-120. <https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n15p102>
- [19] Kone, H., Koro Y.F., et al. (2022). Impact de l'orpaillage sur la qualité des eaux de la Falémé à Kéniéba, Mali. *Afrique Science Revue Internationale des Sciences et Technologie* 25(4):102-117
- [20] Lavkulich, L. M., Jackson, S., & Deland, S. (2021). Soil physico-chemical properties and heavy metal mobility in anthropogenic ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 215. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08990-2>
- [21] Nsanganwimana, F., Marchand, L., Douay, F., & Mench, M. (2022). Phytomanagement of soils degraded by trace elements in mining areas: A review on processes and success indicators. *Science of The Total Environment*, 806, 150942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150942>
- [22] Bamba, O., Bindler, R., Sanou, A., & Traoré, A. S. (2020). Dispersion and environmental impact of mercury and trace elements around artisanal gold mining sites. *Journal of Geochemical Exploration*, 211, 106482. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106482>
- [23] Rakotondrabe, F., Ngoupayou, J. N., Mvondo, R. R., & Devkota, S. (2024). Chemical pollution trends driven by artisanal and small-scale gold mining expansion in Sub-Saharan Africa (1995–2024): A systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(12), 18342-18361. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32104-5>
- [24] Ouédraogo, O., Amyot, M., & de Grosbois, S. (2021). Post-gold mining soil mercury contamination and traditional mitigation challenges in Burkina Faso. *Land Degradation & Development*, 32(8), 2541-2555. <https://doi.org/10.1002/ldr.3912>
- [25] Rajae, M., Obiri, S., Green, A., Long, R., Cobbina, S. J., & Basu, N. (2015). Integrated assessment of artisanal and small-scale gold mining in Ghana: Human health and environmental perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(12), 15302-15334. <https://doi.org/10.3390/ijerph121215002>
- [26] Tschakert, P., Singha, K., & Smith, L. (2017). Learning from dynamic hotspots of mercury contamination in artisanal mining regions of West Africa. *Environmental Research Letters*, 12(9), 095004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8123>
- [27] Nakazwe, H., Onyango, T., & Mayamba, A. (2019). High levels of mercury contamination in aquatic ecosystems surrounding artisanal gold mining communities in Uganda. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 103(2), 204-210. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02654-7>
- [28] & [32] Keita, S., Toure, A., & Diallo, M. (2020). L'orpaillage au Mali : Évaluation de la pollution au cyanure et au mercure du fleuve Falémé et impacts socio-économiques. *Revue Internationale des Sciences Environnementales*, 14(3), 89-104.
- [29] Niane, B., Moritz, R., Guédron, S., Ngom, P. M., Pfeifer, H. R., & Poté, J. (2016). Effect of artisanal gold mining on the distribution of mercury and silver in soils, sediments, and waters of the Gambia River basin (Kedougou, Senegal). *Journal of Geochemical Exploration*, 169, 137-148. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.019>
- [30] Hilson, G., Maconachie, R., & McQuilken, J. (2021). Conflict of interest, formalization, and stakeholder struggles in Sub-Saharan African artisanal gold mining. *World Development*, 141, 105404. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105404>
- [31] Veiga, M. M., Angeloci-Prado, G., & Cordy, P. (2015). Cyanidation vs. Amalgamation: Technical efficiencies and environmental impacts in artisanal gold mining. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1198-1207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.077>

-
- [33] Mancini, S., Perego, A., & Spagnoli, F. (2021). The transition from mercury amalgamation to cyanidation in artisanal gold mining: New chemical dynamics and environmental footprints. *Environmental Science & Policy*, 124, 412-423. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.015>
- [34] Hilson, G., Goumandakoye, H., & Arond, E. (2018). Why mercury-free technologies are adapted or rejected? Financial constraints and revenue incentives for gold miners in Sub-Saharan Africa. *International Development Planning Review*, 40(2), 163-186. <https://doi.org/10.3828/idpr.2018.8>