

Contamination métallique des environnements d'exploitation artisanale de l'or: Cas du département de Bangolo (Ouest, Côte d'Ivoire)

[Metal contamination in artisanal gold mining environments: The case of the Bangolo department (West, Cote d'Ivoire)]

Yao Kouadio Assemien François¹, Ouédraogo Moussa¹, Ouattara Ismaïla¹, Coulibaly Léréyaha¹, Kouadio Kolatrin Elie¹, Ouattara Pétémagan Jean-Marie², and Yao Koffi Blaise³

¹Department of Geological and Mining Sciences, University of Man, Man, Cote d'Ivoire

²Department of Sciences and Environment Management, Nangui Abrogoua University, Abidjan, Cote d'Ivoire

³Department of Soil, Water, and Geomaterials Sciences, Félix Houphouët-Boigny University, Abidjan, Cote d'Ivoire

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Although illegal gold panning is prohibited and punishable by law in Côte d'Ivoire, numerous sites continue to thrive in rural areas, bringing with them significant environmental nuisances. The western region of the country hosts a high concentration of gold panning sites. This study aims to assess the potential intensity of metal contamination (As, Pb, Cu, Ni, Zn, Cr, Hg, and Cd) in soils and to determine the associated ecological risk. Eight (8) soil samples were collected at a depth of 15 cm from areas influenced by gold panning activity in the Bangolo department. Laboratory chemical analyses and statistical treatments were conducted to evaluate the contamination intensity through the calculation of contamination factors and the geo-accumulation index (Igeo). Additionally, the ecological risk associated with soil metal contamination was assessed. The results showed that As, Ni, and Cr concentrations in samples S3, S4, S5, S6, S7, and ST exceeded average concentrations typically found in the upper continental crust. The highest average concentrations were recorded for Cr (134.34 mg/kg), Cu (41 mg/kg), and Ni (34.43 mg/kg). The average Pb and As concentrations in the studied soils were 7.92 mg/kg and 5.79 mg/kg, respectively. Overall, soil metal contamination ranged from low to moderately severe. Chromium and arsenic contamination were the highest, with contamination factors reaching up to 5.37 and 6.75, and Igeo values of 1.84 and 2.17, respectively. Sample S6 was the most contaminated, while S1 showed no contamination due to its sandy nature. The resulting ecological risk is currently low, with all risk index (RI) values below 150.

KEYWORDS: geochemistry, metal contamination, soil, gold panning, Bangolo.

RESUME: Bien que l'orpaillage clandestin soit interdit et réprimé, en Côte d'Ivoire, de nombreux sites continuent de prospérer dans les zones rurales avec leurs corollaires de nuisances environnementales. La région de l'ouest concentre de nombreux sites d'orpaillage. Cette étude vise à évaluer l'intensité de la contamination métallique (As, Pb, Cu, Ni, Zn, Cr, Hg et Cd) potentiellement des sols et d'en déterminer le risque écologique associé. Ainsi, 08 échantillons de sol ont été prélevés à 15 cm de profondeur dans les zones influencées par l'activité d'orpaillage dans le département de Bangolo. Des analyses chimiques au laboratoire ainsi que des traitements statistiques ont été effectués pour déterminer l'intensité de la contamination à travers l'évaluation du facteur de contamination et de l'indice de géo-accumulation. De même, le risque écologique associé à la contamination métallique des sols a été déterminé. Les résultats ont montré que les teneurs en As, Ni et Cr des échantillons S3, S4, S5, S6, S7 et ST sont supérieures aux concentrations moyennes enregistrées dans la croûte continentale supérieure. Les concentrations moyennes les plus élevées sont celles du Cr (134,34 mg/kg), Cu (41 mg/kg) et Ni (34,43 mg/kg). Les teneurs moyennes des sols étudiés en Pb et As sont respectivement de 7,92 et 5,79 mg/kg. D'une manière générale, la contamination métallique des sols

varie de faible à modérément sévère. La pollution en chrome et en arsenic sont les plus élevées avec des facteurs de contamination allant jusqu'à 5,37 et 6,75 et un Igéo de 1,84 et 2,17 respectivement. Le sol S6 est le plus contaminé tandis que S1 est sans contamination, en raison de sa nature sableuse. Le risque écologique qui en découle est, pour l'instant, faible avec des RI, tous, inférieurs à 150.

MOTS-CLEFS: géochimie, contamination métallique, sol, orpaillage, Bangolo.

1 INTRODUCTION

L'orpailage, défini comme l'exploration et l'exploitation artisanale de l'or, se présente comme un moyen de lutte contre la pauvreté. Cependant, il engendre beaucoup de problèmes environnementaux [1]. L'orpailage est une activité plus ou moins clandestine [2] pratiquée en Côte d'Ivoire de manière non planifiée, par des méthodes manuelles faisant recours à des outils rudimentaires [3]. Celle-ci menace la santé des populations à cause des énormes quantités de rejets miniers qui peuvent générer des contaminants, et avoir des conséquences négatives sur l'environnement [4], [5], [6], [7].

De plus, les orpailleurs utilisent des produits chimiques tels que le mercure, le cyanure ou encore l'acide sulfurique et nitrique dans leurs procédés d'extraction de l'or [8], [9], [10]. Ces produits engendrent la dégradation de la qualité des eaux et des sols à travers la libération de polluants tels que les éléments traces métalliques. Une autre conséquence de l'activité minière artisanale est la diminution voire la perte des services écosystémiques liés au sol c'est-à-dire la production de la biomasse, la dégradation de la matière organique, la filtration de l'eau et le rendement des cultures [11], [12].

Longtemps pratiqué dans les pays voisins comme le Mali et le Burkina Faso, l'orpailage clandestin a gagné toutes les régions ivoiriennes, sans doute, exacerbées par les conséquences du changement climatique sur les rendements agricoles. L'activité d'orpailage se présente aujourd'hui comme un fléau que l'état ivoirien peine à éradiquer malgré l'adoption d'un nouveau code minier, plus contraignant, en 2014 [13].

Le Conseil National des Droits de l'Homme a dénombré en 2022 plus de 240 sites clandestins pour une population d'orpailleurs estimée à 23400 individus [13]. A l'instar des autres régions, l'ouest du pays, précisément le département de Bangolo est aussi affecté par le phénomène d'orpailage clandestin. L'orpailage connu comme source de relargage d'éléments traces métalliques, sa pratique dans le département de Bangolo semble influencer la géochimie locale. Ainsi deux problèmes potentiels se posent: le risque de pollution environnementale et le risque environnemental lié à la consommation des eaux et produits agricoles.

De récentes études menées dans l'ouest de la Côte d'Ivoire (région du Tonkpi) révèlent de nombreux sites d'orpailage aux alentours de la mine industrielle d'Ity et une utilisation de différentes techniques de traitement [14]. La référence [15] a fait l'inventaire des pratiques de l'orpailage et des impacts des activités des orpailleurs dans la région du Tonkpi. La référence [16] a mis en lumière l'impact des techniques de récupération de l'or sur les sols des localités d'Ity et Floleu. De plus, [17] à Sangouiné, Zérégo et Floleu ont montré une dégradation de la qualité des environnements par les éléments traces métalliques (ETM). Ces études se sont intéressées à l'inventaire des sites artisanaux, aux techniques d'extraction artisanale et leurs impacts sur la qualité des eaux et des sols. Aucune recherche n'a été consacrée à l'évaluation de l'intensité de la contamination en tenant compte du bruit de fond géochimique des sols afin de déterminer l'origine réelle de la contamination en ETM. La présente étude vise à évaluer l'intensité de la contamination par les ETM et déterminer le risque écologique qui en découle.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Cette étude a été réalisée dans le département de Bangolo à l'ouest de la Côte d'Ivoire. Ce département couvre une superficie de 2600 Km² et est situé entre les longitudes 8°01'10" et 7°00'01" W et les latitudes 6°53'59" et 7°14'59" N. Il appartient à la région du Guémon (Figure 1). La zone d'étude est limitée au Nord par les départements de Man et de Kouibly, au Sud par les départements de Duékoué et de Guiglo, à l'Est par ceux de Vavoua et de Zoukougbeu, et à l'Ouest par les départements de Bôlequin, Zouan-Hounien et Danané. Le département de Bangolo compte à lui seul 9 sous-préfectures que sont Bangolo, Béoué-zibiao, Bléniméouin, Dieouzon, Gohouo-Zagna, Guinglo-Tahouaké, Kahin-Zarabaon, Zeo, Zou [18]. La zone d'orpailage, objet de cette étude se trouve dans la sous-préfecture de Zou, précisément à Zérégo (Figure 1).

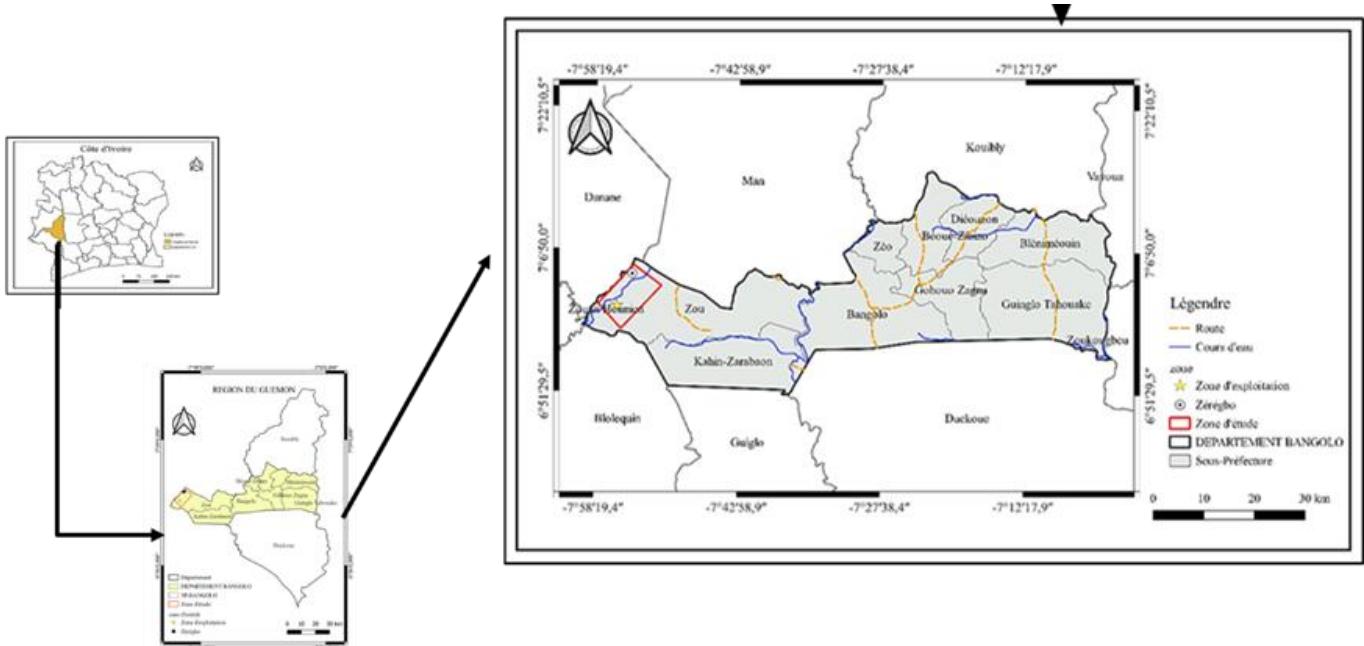


Fig. 1. Situation géographique du département de Bangolo

Le département de Bangolo présente un climat tropical chaud avec une saison pluvieuse et une saison sèche qui dure 6 mois (de novembre à Avril). Ce type de climat lui confère une végétation constituée principalement de forêt tropicale humide, avec des zones de savane et un écosystème varié. Le relief du département est caractérisé par des collines et des petites montagnes, typiques de la région de l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Le département de Bangolo est drainé par plusieurs cours d'eau dont les plus importants sont le fleuve Sassandra et ses affluents comme la rivière N'zo. Ces cours d'eau sont essentiels pour l'approvisionnement en eau, l'irrigation et d'autres activités économiques de la région.

Du point de vue géologique, la zone d'étude est située dans le domaine archéen de la dorsale de Man. Cette dorsale est subdivisée en deux ensembles par la faille de Sassandra d'orientation N-S, à l'Est on a les formations archéennes et à l'Ouest les formations paléo-protérozoïques. Elle est marquée par deux événements majeurs à savoir le Léonien (≥ 3 Ga) et le Libérien (vers 2,5 Ga) qui constitue l'événement magmatique et métamorphique le plus marqué du domaine archéen de cette dorsale [19]. Sur le plan lithologique, deux grands ensembles se distinguent dans ce domaine: un complexe de base constitué essentiellement de migmatites et de gneiss granulitiques, souvent désigné par le terme granito-gneiss; le second ensemble constitue les ceintures de roches supracrustales qui reposent en discordance sur le premier ensemble [19]. A ces deux ensembles sont associés des granites et des charnockites soit sous forme d'intrusions dans le socle granito-gneissique, soit sous forme de mobilisat anatectique. Dans le département de Bangolo, on rencontre principalement les orthogneiss charnockitiques et des migmatites archéennes dans lesquelles se trouve des intrusions de méta-arenites dominantes sur métasilitites, norites, tonalites, quartzite ferrugineux, métäenderbite et des migmatites indifférenciées [20]. Ces formations géologiques sont généralement des encaissants de nombreuses substances ayant une valeur économique (Fer, Or, Nickel, Manganèse, Diamant, Cuivre et Eléments du Groupe du platine). De nombreuses mines sont en activité dans la région ouest de la Côte d'Ivoire. C'est le cas des mines de nickel de Samapleu et de Foumbessso-Moyago exploitées respectivement par *Sama Resources Inc.* et la Compagnie Minières du Bafing (CMB) et de la mine d'or d'Ity, exploitée par la compagnie canadienne *Endeavour mining*. Autour des mines d'or industrielles sont généralement installées des mines artisanales qui exploitent en toute illégalité. Le département de Bangolo, précisément le village de Zégrébo est confronté à une forte activité d'extraction artisanale clandestine de l'or. Entre 2013 et 2018, le site de Zégrébo était exploité clandestinement de manière semi-industrielle. Après l'interdiction de cette activité par la Brigade de Répression des Infractions au Code Minier (BRICM), le site, est depuis 2020, recolonisé par de nouveaux orpailleurs clandestins utilisant des outils non-mécanisés. Après l'extraction, à l'aide de pioches et de pelles, ces derniers récupèrent l'or par la technique de la batée dans les cours d'eau voisins.

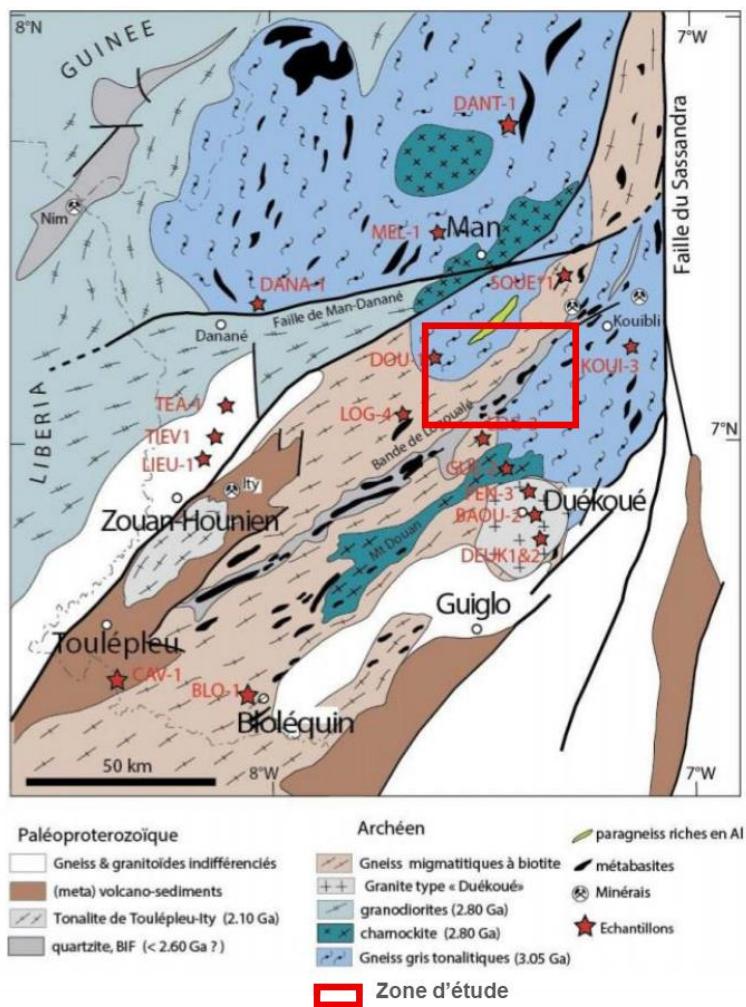


Fig. 2. Carte géologique de la zone d'étude ([20] modifié)

2.2 ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE AU LABORATOIRE

Afin de déterminer le niveau de contamination métallique sur les sites d'exploitation de Zérégbo, sept (7) échantillons ont été prélevé. Ces échantillons (S1, S2, S3, S4, S5, S6 et S7) ont été prélevés à la fois dans les zones d'extraction et à proximité des sites de lavage et de récupération de l'or. La répartition des sites d'échantillonnage est illustrée à la figure 3. En vue d'apprecier l'apport en éléments métalliques liés aux activités aurifères un échantillon témoin (ST) a été prélevé à environ 5 km de la zone d'orpaillage.

L'échantillonnage a été réalisé sur chaque site de prélèvement à l'aide d'une tarière à une profondeur de 15 cm. Les échantillons de sol ainsi prélevés ont été conservés dans des sachets plastiques pour éviter toute contamination. Environ 1 kg de sol a été recueilli dans des sacs polyéthylène scellé sous vide et transportés au laboratoire. Au laboratoire, les sédiments ont été séchés à l'étuve (40 °C) pendant 72 heures. Après séchage, les sédiments ont été conservés dans des flacons en plastique, avec un ruban en plastique autour du dispositif de fermeture afin de les protéger contre l'humidité, puis stockés dans une armoire (20 °C) pour être analysé. Les mesures de pH ont été réalisées dans une solution de sol selon un ratio 2/5. Les éléments traces métalliques (As, Cu, Cr, Hg, Zn, Cd, Pb et Ni) ont été analysés à l'aide de la spectrométrie de fluorescence à rayons X (XRF).

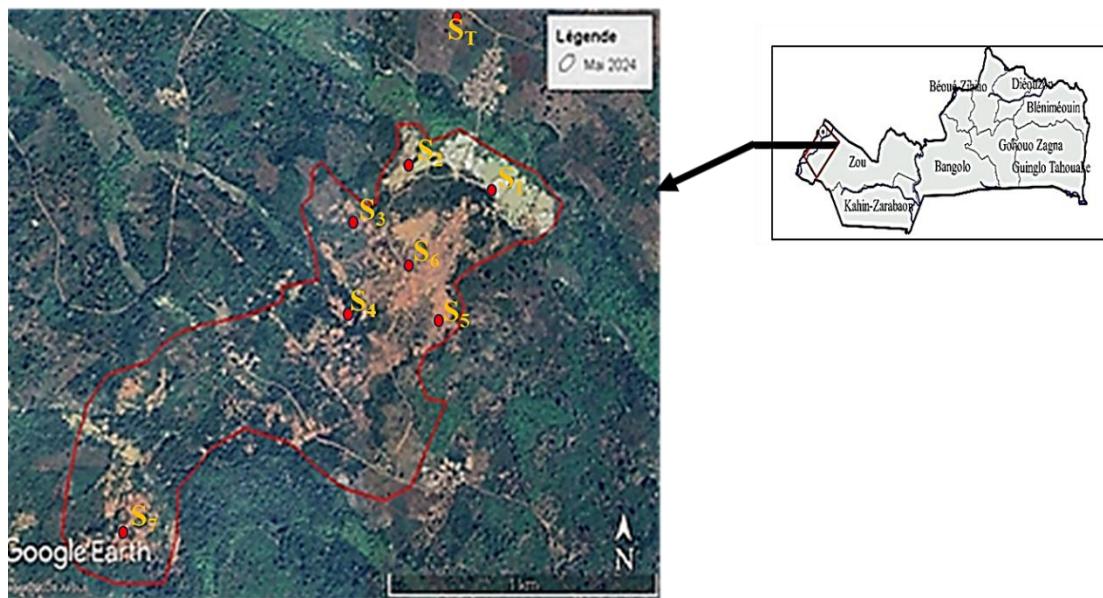


Fig. 3. Répartition des points d'échantillonnage de sol

2.3 MÉTHODES D'EVALUATION DU NIVEAU DE CONTAMINATION DES SOLS ET DU NIVEAU DE RISQUE ÉCOLOGIQUE

Afin de détecter une potentielle contamination des sites d'orpaillage, un facteur de contamination a été calculé pour chaque échantillon de sol [21] à partir de l'équation (1):

$$FC = C_i/C_r \quad (1)$$

Où: FC désigne le facteur de contamination;

C_i : la concentration d'un métal donné dans le sol étudié;

C_r : la concentration de référence (fond géochimique) dans un sol non contaminé.

Les facteurs de contamination ont été interprétés selon [22].

- $FC < 1$ indique une absence de contamination;
- $1 \leq FC < 3$, une faible contamination;
- $3 \leq FC < 6$, une contamination modérée;
- $6 \leq FC < 10$, une contamination modérément sévère;
- $10 \leq FC < 25$, une contamination sévère;
- $FC \geq 25$, une contamination très sévère.

Par ailleurs, l'indice de géo-accumulation (I_{geo}) a été calculé afin de déterminer l'intensité de la contamination métallique [23], [6]. Il s'agit du rapport entre la concentration d'un métal donné dans le bruit de fond géochimique (Equation 2). Le facteur de correction 1,5 tient compte des fluctuations naturelles des métaux dans la croûte qui peuvent être causées par des changements minéralogiques dans les sols. En raison de la forte intensité des activités anthropiques (agriculture, urbanisation, feux de forêt, etc.) dans certaines régions, il est parfois difficile d'obtenir la valeur réelle du fond géochimique naturel [24], [25]. Dans cette étude, les concentrations de référence (fond géochimique naturel) des ETM ont été supposées identiques aux concentrations dans la croûte continentale supérieure proposées par [26] (Tableau 1).

$$I_{geo} = \log_2(C_i/1,5 \times C_r) \quad (2)$$

Tableau 1. Concentrations moyennes de quelques ETM dans la croûte continentale supérieure par [26]

Paramètres	As	Pb	Hg	Zn	Cu	Ni	Cr	Cd
Concentrations dans la croûte continentale supérieure (mg/kg)	2	17	0,06	52	14,3	18,6	35	0,102
Indice de toxicité	10	5	40	1	5	5	2	30

Les valeurs d'Igeo ont été interprétées selon les recommandations de [27].

- Igeo ≤ 0: sans contamination;
- 0 < Igeo < 1: Sans contamination à modérément contaminé;
- 1 < Igeo < 2: Contamination modérée;
- 2 < Igeo < 3: Contamination modérée à forte contamination;
- 3 < Igeo < 4: Forte contamination;
- 4 < Igeo < 5: Forte à extrême contamination;
- Igeo > 5: Contamination extrême

Enfin, le risque environnemental lié aux métaux et métalloïdes (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Hg et Zn) a été déterminé à partir du calcul de l'indice de risque écologique potentiel (Eri). Cet indice permet d'évaluer le risque écologique lié à la présence d'un métal pris individuellement dans le sol. Il est calculé à partir des équations 3 et 4 décrites par [26].

$$Er_i = CF_i \times T_i \quad (3)$$

$$RI = \sum Er_i \quad (4)$$

Er_i : Indice de risque écologique potentiel pour un ETM i donné;

CF_i : Facteur de contamination correspondant à l'ETM i ;

T_i : Indice de toxicité attribué à l'ETM i en fonction de sa toxicité relative pour l'environnement (Tableau 1).

RI: indice global de risque écologique

L'interprétation des indices individuels et globaux de risques écologiques sont indiqués dans le tableau 2.

Tableau 2. Niveau de risque écologique potentiel

Valeurs de Eri	Niveau de risque écologique individuel	Valeur de RI	Niveau de risque écologique global
$Eri < 40$	Faible	$RI < 150$	Faible
$40 \leq Eri < 80$	Modéré	$150 \leq RI < 300$	Modéré
$80 \leq Eri < 160$	Elevé	$300 \leq RI < 600$	Considérable
$160 \leq Eri < 320$	Très élevé	≥ 600	Très élevé
$Eri \geq 320$	Extrêmement élevé		

3 RÉSULTATS

3.1 PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

Les conditions physico-chimiques, mises en évidence par l'analyse des valeurs de pH, révèlent un environnement globalement acide avec un pH moyen de 5,45. Les sols sont, pour la plupart, acides, à l'exception de celui prélevé au niveau de la rampe (S1) qui a un pH de 8,44. Les autres valeurs sont comprises entre 3,9 et 5,9 (Figure 4).

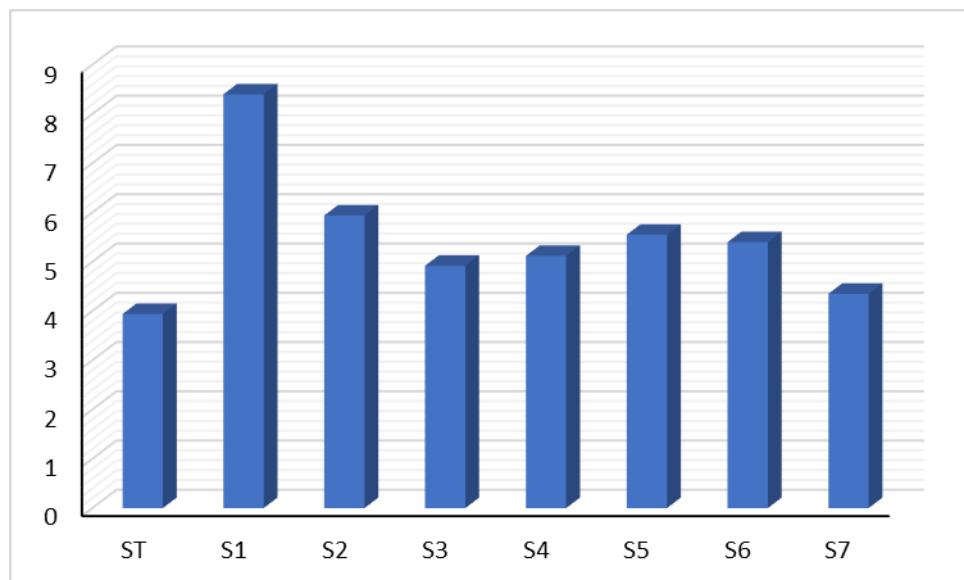


Fig. 4. Variation du pH des sols étudiés

3.2 CONCENTRATIONS DES SOLS EN ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES

Le tableau 3 montre les concentrations des métaux lourds dans les sols étudiés. Il s'agit de l'arsenic, du cuivre, du chrome, du mercure, du zinc, du cadmium, du plomb, du nickel. L'analyse de ce tableau montre que le Hg et le Cd n'ont pas été retrouvés dans les sols du site d'orpaillage de Zérégo. Les teneurs étaient toutes en dessous de la limite de détection (0,001 mg/kg). Aussi, les teneurs en Pb, As, Zn, Cu, Ni et Cr de certains échantillons étaient inférieures à cette limite. Toutes les concentrations inférieures à la limite de détection (<LOD) ont été supposées nulles (Tableau 3). Les concentrations en Pb et en Zn sont toutes inférieures aux normes OMS. Cependant, l'As, le Cu et le Cr présentent par endroit des concentrations dépassant les valeurs guides de l'OMS. D'une manière générale, on remarque que les concentrations obtenues dans le sol témoin (ST) sont globalement conformes aux normes OMS à l'exception du Ni et du Cr. Tous les sols étudiés sont riches en ETM contrairement à S1. Les concentrations des ETM selon l'ordre d'abondance est le suivant: Cr>Ni>Cu>As>Pb>Zn.

Tableau 3. Concentrations totales en éléments traces métalliques

Stations	Pb	As	Hg	Zn	Cu	Ni	Cr	Cd
ST	10,09	0	0	0,003	60,96	72,01	143,4	0
S1	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	7,48	0	0	0	23,09	0	99,61	0
S3	10,85	6,52	0	0,002	44,21	52,4	182,87	0
S4	0	5,4	0	0	55,16	58,76	164,87	0
S5	10,55	10,47	0	0,003	57,97	45,43	188,08	0
S6	11,16	13,49	0	0,004	46,77	46,87	149,99	0
S7	13,26	10,45	0	0,003	39,8	0	145,92	0
Min.	0	0	0	0	0	0	0	0
Max.	13,26	13,49	0	0,004	60,96	72,01	188,08	0
Moyenne	7,92	5,79	0	0,002	40,99	34,43	134,34	0
Ecart-type	4,80	5,05	0	0,002	19,15	27,75	56,89	0
UCC	17	2	0,056	52	14,3	18,6	35	0,102

3.3 EVALUATION DU NIVEAU DE CONTAMINATION DES SOLS

Le tableau 4 présente les résultats du calcul du facteur de contamination pour chaque ETM. Les résultats montrent des FC supérieurs à 1 pour l'ensemble des métaux à l'exception du zinc et du plomb pour lesquels aucune contamination n'a été observée. La contamination en arsenic varie de faible (2,7) à modérément sévère (6,75). Les stations S3, S5 et S7 enregistrent une contamination modérée en arsenic (3,26; 5,24 et 5,22 respectivement). Concernant le cuivre, le nickel et le chrome, une contamination modérée a été observée au niveau des stations ST, S3, S4, S5, S6 et S7. Les échantillons S1 et S2 sont caractérisés par une contamination faible. Ainsi, on note que l'échantillon ST, bien que prélevé hors des sites d'orpaillage est, tout de même, contaminé de manière considérable par le Cu, Ni et le Cr.

Tableau 4. Facteurs de contamination en éléments traces métalliques

Stations	FC-Pb	FC-As	FC-Zn	FC-Cu	FC-Ni	FC-Cr
ST	0,59	0	5,77E-05	4,26	3,87	4,1
S1	0	0	0	0	0	0
S2	0,44	0	0	1,61	0	2,84
S3	0,64	3,26	3,85E-05	3,09	2,82	5,22
S4	0	2,7	0	3,86	3,16	4,71
S5	0,62	5,24	5,77E-05	4,05	2,44	5,37
S6	0,66	6,75	7,69E-05	3,27	2,52	4,29
S7	0,78	5,22	5,77E-05	2,78	0	4,17

Les indices Igéo confirment la non contamination des sols par le plomb et le zinc (Tableau 5). Les sols ST, S1 et S2 ne présentent pas de contamination en As. Le sol S4 est sans contamination à modérément contaminé tandis que S3, S5 et S7 sont modérément contaminés en Arsenic. Quant au sol S6, il présente une contamination modérément sévère en As. Relativement au cuivre, S2 et S7 sont sans contamination à modérément contaminés alors que ST, S3, S4, S5 et S6 sont modérément contaminés. Encore une fois S1 est sans contamination. En considérant le nickel et le chrome certains sols sont sans contamination (S1, S2 et S7), d'autre sont sans contamination à modérément contaminés (S5 et S6 pour le Ni et S2 pour le Cr), d'autres encore sont modérément contaminés (ST et S4 pour le Ni et ST, S3 à S7 pour le Cr).

Tableau 5. Indices de géo-accumulation

Stations	Indices de géo-accumulation					
	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Cr
ST	-1,34	0	-14,67	1,51	1,37	1,45
S1	0	0	0	0	0	0
S2	-1,77	0	0	0,11	0	0,92
S3	-1,23	1,12	-15,25	1,04	0,91	1,81
S4	0	0,85	0	1,36	1,07	1,65
S5	-1,27	1,81	-14,67	1,44	0,71	1,84
S6	-1,19	2,17	-14,25	1,13	0,75	1,51
S7	-0,94	1,8	-14,67	0,89	0	1,48

3.4 EVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE ÉCOLOGIQUE

Le risque environnemental potentiel lié à la contamination des sols a été estimé à partir de l'évaluation du risque écologique. Les résultats montrent un faible risque écologique lié aux ETM dans le département de Bangolo. En effet, l'indice global de risque écologique de tous les échantillons est inférieur à 150 (Tableau 6). L'indice le plus élevé est celui de l'échantillon S6 et le plus faible est celui de l'échantillon S1. Le risque potentiel lié à chaque métal (E_{ri}) est faible ($E_{ri} < 40$), à l'exception de l'arsenic aux stations S5, S6 et S7 qui présentent un risque écologique individuel modéré ($40 < E_{ri} < 80$).

Tableau 6. Risques écologiques potentiels dans le département de Bangolo

Stations	Risque écologique individuel (Eri)						Risque écologique global (RI)
	Pb	As	Zn	Cu	Ni	Cr	
ST	2,95	0	5,77E-05	21,3	19,35	8.2	51.80
S1	0	0	0	0	0	0	0
S2	2,2	0	0	8,05	0	5,68	15.93
S3	3,2	32,6	3,85E-05	15,45	14,1	10,44	75.79
S4	0	27	0	19,3	15,8	9,42	71.52
S5	3,1	52,4	5,77E-05	20,25	12,2	10,74	98.69
S6	3,3	67,5	7,69E-05	16,35	12,6	8,58	108.33
S7	3,9	52,2	5,77E-05	13,9	0	8,34	78.34

4 DISCUSSION

L'étude sur la caractérisation géochimique des environnements d'orpaillage, a permis de mettre en évidence la contamination des sols en éléments traces métallique dans le département de Bangolo. Les mesures de pH, ont montré des sols acides avec un pH moyen de 5,45. Cette acidité peut être liée à la déforestation des zones d'orpaillage et le lessivage des terres par les eaux de ruissellement. Les références [28], [29], [30] ont montré que l'acidité des sols trouve son origine dans les phénomènes tels que la déforestation et l'érosion des sols qui réduisent la capacité de rétention, la teneur en cations basiques et la teneur en matière organique. Aussi, cette acidité suggère une pauvreté des sols en minéraux carbonatés. Le pH du sol ST, prélevé hors du site minier, est plus acide (3,94) que ceux des sols des zones d'orpaillage. Ce résultat montre que l'acidité des sols semble ne pas être liée à l'activité minière. Cela est d'autant vrai que les exploitants n'utilisent pas de produits chimiques comme le témoigne l'absence de mercure dans les sols étudiés. L'acidité des sols favorise la précipitation des éléments traces métalliques comme l'indique *The National Institute of Standard Technologie* [31]. La référence [32] a aussi mis en évidence l'influence du pH sur la précipitation des éléments traces métalliques.

D'une manière générale, la pollution des sols dépend de leur nature et des paramètres physico-chimiques. Un sol sableux absorbe peu les métaux, alors qu'un sol contenant beaucoup d'argiles et de matière organique, favorise leur rétention [33]. C'est ce qui explique que le sol S1, pauvre en argile et matières organiques, ne soit pas contaminés en ETM.

Relativement à la concentration des métaux étudiés dans les sols des différentes stations, on a enregistré pour plusieurs métaux lourds des concentrations supérieures aux valeurs de référence de [26]. Les valeurs de l'arsenic sont 2,7 (S4) à 6,7 (S6) fois plus élevées que les concentrations de la croute continentale supérieure. Pour le cuivre, le nickel et le chrome c'est respectivement de 1,6 (S2) à 4,3 (ST) fois; 2,4 (S5) à 3,8 (ST) fois et de 2,8 (S2) à 5,5 (S6) fois les concentrations de la croute continentale supérieure. La référence [4] a obtenu, en Namibie, dans les sols agricoles à proximité des résidus miniers des concentration en cuivre 7 à 8 fois supérieures que les valeurs de référence. Dans le Nord de la Côte d'Ivoire, [10] a obtenu des concentrations en arsenic 12,2 à 25 et 8,9 à 20,8 fois la concentration dans la croute continentale supérieure à Boundiali et Korhogo respectivement. Selon [10], les concentrations en cuivre 1,43 à 5,1 et 1,36 à 4,49 fois supérieures aux concentrations de la croute continentale supérieures. Il attribue ces contaminations métalliques aux activités minières artisanales qui sévissent dans ces régions. Dans le département de Bangolo, la présence des métaux à la surface des sols est sans doute due au retournement des sols par les orpailleurs, qui creusent à des dizaines de mètres pour atteindre le mineraï. L'absence de l'arsenic dans l'échantillon témoin (ST) et sa présence dans les échantillons prélevés à proximité des sites d'exploitations traduit son lien avec l'activité minière tel que démontré par les travaux de [34] et [16]. Aussi, [10] a montré que l'arsenic présente une grande affinité avec l'or. L'arsenic est particulièrement abondant dans les minerais aurifères, pouvant aller jusqu'à 110 g/kg. Son principal minéral porteur est l'arsénopyrite [35]. Cependant, l'enrichissement du sol ST en cuivre, en nickel et en chrome tout comme les sols S3 à S7 suppose que la présence de ces ETM dans les sols de Bangolo n'est pas forcément liée à l'activité minière. Ces éléments pourraient provenir de l'altération de certains minéraux. Par ailleurs, la zone étudiée étant une zone particulièrement agricole, la contamination des sols en certains éléments traces métallique pourrait trouver une origine anthropique. En effet, d'après [7], un facteur de contamination supérieur à 1,5 suggère une origine anthropique. Néanmoins la pollution des sols en éléments traces métallique reste modérée (pour Cu, Ni et Cr) à modérément sévère (pour As). La référence [10] a identifié dans les régions de Boundiali et Korhogo, un risque écologique considérable lié à une forte contamination des sols, en zone minière, par l'arsenic.

5 CONCLUSION

La caractérisation géochimique des environnements d'orpaillage a permis de mettre en évidence la qualité des sols dans le département de Bangolo. L'étude a montré une acidité des sols associée à une contamination polymétallique. Les concentrations enregistrées dans les sols révèlent un enrichissement en arsenic, cuivre, nickel et chrome. Ces concentrations sont 2 à 6 fois supérieures aux concentrations moyennes enregistrées dans la croûte continentale supérieure. Ces résultats traduisent une influence humaine sur les concentrations naturelles. Les différents indices, calculés pour estimer l'intensité de la contamination ont révélé des niveaux de contamination allant de modéré à modérément sévère. L'importance relative de la contamination est la suivante: Cr > As > Cu > Ni > Pb >> Zn. Le sol S6 est le plus contaminé tandis que S1 est sans contamination, sans doute, en raison de sa nature sableuse. Le risque environnemental que représentent ces sols contaminés est à ce jour, faible. Cependant, il est important de déterminer l'origine réelle de cette pollution métallique afin de prévenir des situations plus dangereuses. Cela pourrait se faire à travers des études minéralogiques pour déterminer les principaux minéraux présents la zone et qui, dans leur processus d'altération pourraient enrichir les sols en As, Cu, Ni et Cr. Aussi, bien que l'environnement soit sous l'influence humaine, la caractérisation du fond géochimique local s'avère nécessaire pour vérifier si la présente étude surestime la contamination métallique dans le département de Bangolo ou, au contraire, elle la sous-estime.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la chefferie de Zérégbo pour l'accueil réservé et pour leur collaboration qui ont permis d'accéder plus facilement aux sites d'exploitation artisanale de l'or dans le département de Bangolo.

REFERENCES

- [1] Y. Bamba, «Évaluation des impacts de l'exploitation de la mine d'or de Bonikro sur les ressources en eau», *Journal des sciences*, 1-16, 2012.
- [2] D. Goh, «L'exploitation artisanale de l'or en Côte d'Ivoire: La persistance d'une activité illégale», *European Scientific Journal*, 12 (3): 18–36, 2016.
- [3] E. Jacques, «La mine artisanale en Afrique: aspects techniques et environnementaux. *CIFEG Publication* vol. 37, 18-36, 2001.
- [4] M. Mileusnić, B.S. Mapani, A.F. Kamona, S. Ružićić, I. Mapaure, P.M. Chimwamurombe, «Assessment of agricultural soil contamination by potentially toxic metals dispersed from improperly disposed tailings, Kombat mine, Namibia», *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 144, 409–420, 2014.
- [5] D.D. Giuseppe, G. Bianchini, L.V. Antisari, A. Martucci, C. Natali, L. Beccaluva, «Geochemical characterization and biomonitoring of reclaimed soils in the Po River Delta (Northern Italy): implications for the agricultural activities», *Environ. Monit. Assess.* vol. 186, 2925–2940, 2014.
- [6] M.A. Othmani, F. Souissi, E.F. Da Silva, «Accumulation trends of metal contamination in sediments of the former Pb-Zn mining district of Touiref (NW Tunisia)», *Journal of African Earth Sciences*, vol. 111, 231-243, 2015.
- [7] I. M. Patrick, «Approches de caractérisation géochimique et géo-environnement d'un projet minier dans le contexte de fond géochimique naturellement élevé et/ou anthropisé: Application aux secteurs miniers siscoe-sullivan-marban, val-d'or, canada». *Thèse de doctorat*, 370p, 2020.
- [8] T.A. Dan-Badjo, D. Tidjani, T. Idde, Y. Guero, L.N. Dan, A. Matsallabi, G. Echevarria, «Diagnostic de la contamination des eaux par les éléments traces métalliques dans la zone aurifère de Komabangou – Tillabéri, Niger». *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 8 (6): 2849-2857, 2014.
- [9] E. Sawadogo, K. Houd, S. Sanogo, «Orpaillage et mutation de l'habitat en pays Lobi, le cas de la ville de Kampti», *Les Tisons*, Vol.1 (Numéro spécial), 75-97, 2025.
- [10] J.C.A. Beda, J-M.P. Ouattara, A. Messou, and L. Coulibaly, «Impacts of artisanal and small-scale gold mining on soils in northern regions of Côte d'Ivoire: cases of Boundiali, Korhogo and Tengrela», *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 15 (3): 1234-1248, 2021.
- [11] S.L. Coulibaly, F.M. Zahui, L.C. Mangoua-Alliali, A. Cherif, and L. Coulibaly, «Artisanal Mining Practice and Physical Impacts on the Environment in the Ity-Floleu Gold Region, Côte d'Ivoire, *International Journal of Environment and Climate Change*, vol. 11 (11): 17-31, 2021.
- [12] C. Blierfet et R. Perraud, *Chimie de l'environnement, Air, eau, sol, déchet*, 2 édition française, de boeck, 2001.
- [13] Conseil National des droits de l'Homme-CNDH. Rapport annuel sur l'état des droits de l'homme en Côte d'Ivoire, 135p, 2022.

- [14] B.F. Hue, B. Kambire, D. Alla, «Environmental changes linked to gold mining in Ity (western Côte d'Ivoire) ». *Annals of the University of Moundou, Series A-FLASH*, vol. 7 (2): 133-151, 2020.
- [15] A. Cherif, «Impact de l'exploitation artisanale de l'or sur les ressources en eaux et les sols: cas de la région aurifère d'Ity-Floleu (Ouest, Côte d'Ivoire) ». *Mémoire master, Université de Man, Côte d'Ivoire*, 52p. 2021.
- [16] A.C. Mossoa, «Empreinte chimique des procédés de l'exploitation artisanale de l'or sur les sols de la région aurifère d'Ity-Floleu (ouest, Côte d'Ivoire)», 54p., 2022.
- [17] O.C. N'cho, A.M-N. Kouadio, K-K.H. Kouadio, N. Odoh, «Soil Acidification Vulnerability and Long-Term Trace Metal Depletion Under Rubber Tree Plantations in the Semi-Mountainous Region of West Côte d'Ivoire», *International Journal for Multidisciplinary Research*, vol. 5 (6): 1-10, 2023.
- [18] Institut National de la Statistique- INS, Recensement Général de la Population et de l'Habitat, Résultats Globaux, 37p., 2021.
- [19] A.N. Kouamelan, «Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque». *Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, France*, 289p., 1996.
- [20] G.R.S. Koffi, «Réévaluation géochimique et géochronologique des événements orogéniques dans le domaine Archéen de la Côte d'Ivoire: implications dans la géodynamique du craton», *Thèse unique, Univ. Félix HOUPHOUET-BOIGNY, Abidjan, Côte d'Ivoire*, 283 p., 2020.
- [21] S. Nadem, M. El Baghdadi, J. Rais, A. Barakat, «Evaluation of heavy metal contamination of sediments of the estuary of the Bouregreg (Atlantic Coast, Morocco)», *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (11): 3338 – 3345, 2015.
- [22] S.M. Sakan, D.S. Djordjevic, D.D. Manojlovic, P.S. Polic, «Assessment of heavy metal pollutants accumulation in the Tisza River sediments», *J. Environ. Manage.* 90, 3382 – 3390, 2009.
- [23] G. Muller, «Schwermetalle in den sediment des Rheins, Veranderungen Seit 1971», *Umschau* 79, 778 – 783, 1979.
- [24] J. Zhang, «Geochemistry of trace metals from Chinese River/Estuary systems: an overview», *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 41, 631 – 658, 1995.
- [25] K.A.F. Yao, D. Salze, M. Lopez-Ferber, T. Lasm, O. Belcourt, «Impact of an Abandoned Mine on Surrounding Soils, Surface Water and Stream Sediment: Case of SOMIAF Gold Mine, Côte d'Ivoire», *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 8 (9), 2017.
- [26] K.H. Wedepohl, «The composition of the continental crust,» *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, vol. 7, 1217-1232, 1995.
- [27] L. Hakånsone, «Ecological risk index for aquatic pollution control, A sedimentological approach», *Water Res*, vol. 14, 975– 1001, 1980.
- [28] M. Blanchard, «Soil fertility management and the role of the herd in cotton-cereal-livestock systems in southern Mali. Local technical knowledge and agricultural-livestock integration practices», *PhD Thesis, Paris-Est University*, Paris, 298p., 2010.
- [29] B. Koulibaly, O. Traore, D. Dakuo, R. Lalsaga, F. Lombo, P. Zombre, «Acidification des sols ferrugineux et ferrallitiques dans les systèmes de production cotonnière au Burkina Faso», *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 8 (6): 2879-2890, 2014.
- [30] A. Diallo, F. Wade, S. Kourouma, «Effects of artisanal gold mining on forest resources in Siguiri». *Higher Agronomic and Veterinary Institute Valéry Giscard d'Estaing, University of Conakry, Guinea Conakry*, 32p. 2007.
- [31] National Institute of Standard Technology-NIST, *NIST Atomic Spectra Database*.
Consulté sur le site <https://www.nist.gov/programs-projects/jarvis-alignn-jarvis-alignn-ff>, 12 Déc. 2023.
- [32] B. Philippe, M. Julien, B. Catherine, «Caractérisation de la mobilité des ETM dans la ZNS du sol», *Capheine*, 85p., 2012.
- [33] J-B. Sirven, «Détection de métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS)», *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1*, 252p. 2006.
- [34] J. Roamba, «Risques environnementaux et sanitaires sur les sites d'orpailage au Burkina Faso: cycle de vie des principaux polluants et perceptions des orpailleurs (cas du site zougnazagmagine dans la commune rurale de Bouroum, région du centre-nord)», *Institution International d'Ingénierie de l'Eau*, 101p. 2007.
- [35] E. Lombi, W.W. Wenzel, D.C. Adriano, *Arsenic-contaminated soils. In Remediation Engineering of Contaminated Soils*, Wise DL, Trantolo DJ, Cichon EJ, Inyang HI, Stottmeister U (eds), 2000.