

Caractérisation physico-chimique des sols soumis à l'orpaillage dans la région Centrale du Togo

[Physico-chemical characterization of soils in gold mining areas in the Central region of Togo]

Latifou Tchassanti¹, Atti Tchabi¹, Lallébila Tampo^{2,3}, Pana Kadanga¹, and Batawila Komlan⁴

¹Laboratoire des Sciences Agronomiques et Biologiques Appliquée, Université de Kara, Institut Supérieur des Métiers de l'Agriculture, BP 404 Kara, Togo

²Faculté des Sciences et Techniques, Département des Sciences Naturelles, Université de Kara, BP 404 Kara, Togo

³Faculté des Sciences, Laboratoire d'Hydrologie Appliquée et Environnement, Université de Lomé, BP 1515, Lomé, Togo

⁴Laboratoire de Botanique et Écologie Végétale, Faculté des Sciences, Université de Lomé, BP 1515, Lomé, Togo

Copyright © 2023 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: The purpose of this study was to characterize the soils subject to gold mining. Data collection consisted of sampling soil from the 0-20 cm layer, in corn fields, under natural vegetation and in gold panning sites (gold-bearing soil and washed gold-bearing soil). A total of 48 composite samples of 1 kg of soil were analyzed at the ITRA Soil Laboratory in Lomé. The results of physicochemical analysis show that the washed gold soils have low contents of organic matter, carbon, nitrogen, calcium and sodium; and are sandy in texture. Washed gold soils have a very low level of fertility. Over the entire study area, the levels of trace metal elements range from 0.01 to 10.24 mg/kg for copper, 0.02 to 4.01 mg/kg for zinc, 0.01 to 5.05 mg/kg for lead and 0 to 1.40 mg/kg for cadmium. The pollution index varies from 0.01 to 0.09 depending on the localities and is less than 1 in all localities. The lowest index is obtained at Kéméni and Kpaza sites, indicating a low accumulation of trace elements on these sites. The sites of its localities are not polluted by the Cu, Zn, Pb, and Cd studied. Gold panning in the Central Region of Togo leads to soil degradation.

KEYWORDS: Gold mining, Physico-chemical property, Soil, Center-Togo.

RESUME: L'objectif de cette étude était de caractériser les sols soumis à l'orpaillage. La collecte des données a consisté à prélever le sol de la couche 0-20 cm, dans les champs de maïs, sous la végétation naturelle et dans les sites d'orpaillage (sol aurifère et sol aurifère lavé). Au total, 48 échantillons composites de 1 kg de sol ont été analysés au Laboratoire de Sols Eaux Végétaux Engrais de l'ITRA de Lomé. Les résultats d'analyse physico-chimique montrent que les sols aurifères lavés ont de faibles teneurs en matière organique, en carbone, en azote, en calcium et en sodium et sont de texture sableuse. Les sols aurifères lavés présentent un niveau de fertilité très bas. Sur l'ensemble de la zone d'étude, les teneurs en éléments traces métalliques varient de 0,01 à 10,24 mg/kg pour le cuivre, 0,02 à 4,01 mg/kg pour le zinc, 0,01 à 5,05 mg/kg pour le plomb et 0 à 1,40 mg/kg pour le cadmium. L'indice de pollution varie de 0,01 à 0,09 en fonction des localités et est inférieure à 1 dans toutes les localités. L'indice le plus bas est obtenu au niveau des sites de Kéméni et de Kpaza indiquant une faible accumulation des éléments traces sur ces sites. Les sites de ses localités ne sont pas pollués par le Cu, Zn, Pb, et Cd étudiés. Selon les résultats obtenus dans cette étude, l'orpaillage dans la région Centrale du Togo entraîne une dégradation des sols.

MOTS-CLEFS: Orpaillage, Propriété physico-chimique, Sol, Centre-Togo.

1 INTRODUCTION

La dégradation du sol conduit à une diminution de la fertilité du sol impactant négativement sur les rendements des cultures et la production alimentaire. Le sol étant un support important des écosystèmes notamment terrestres, une dégradation de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques, induit une subsidiarité dans les conséquences engendrées en occurrence sur les activités agrosylvopastorales [1]. Les causes de la dégradation des terres sont principalement le déboisement; le surpâturage, les coupes répétées; l'agriculture itinérante; la mauvaise gestion par l'agriculture des ressources en sol et en eau, comme l'utilisation insuffisante et/ou excessive d'engrais; la pression économique [2] mais aussi à l'exploitation des ressources minières [3]. En effet, l'exploitation minière a d'énormes conséquences sur l'aspect physico-chimique des sols [4].

Au Togo, des études ont été menées sur le secteur extractif industriel [3], [5] – [10]. Selon [3], l'exploitation du calcaire de Tabligbo a entraîné une modification du paysage, de la morphologie du sol et un impact négatif sur la granulométrie du sol au Sud-Est du Togo. En revanche, Les travaux scientifiques sur le secteur extractif artisanal surtout celle de l'or sont rares [11] – [13] pourtant ce secteur d'activité prend de l'ampleur et impact négativement le milieu biophysique. Les résultats des travaux de [11], [12] ont montré que l'orpaillage entraîne la destruction de la végétation, la dégradation du sol et la pollution de l'eau respectivement à Kénéni et à Kpaza, deux localités situées dans la région Centrale du Togo. Selon [13], les résultats d'analyses d'échantillons d'eau et du sol issues des sites d'orpaillage dans les localités de Tchalo, d'Agbandi et de Kéméni ont montré une contamination des eaux et des sols par les éléments traces métalliques (Cd, Cu, Hg, Pb, et Zn) étudiés, mais avec des valeurs en dessous de la norme AFNOR NF U 44 041. Toutes ces études ont abordé l'impact sur le milieu biophysique mais n'ont pas évalué les effets de l'orpaillage sur les propriétés physico-chimiques et sur le niveau de fertilité des sols des zones d'orpaillage.

En effet, la multiplication des sites d'orpaillage dans les localités d'Agbandi, de Tchalo, de Yamba kopé, de Kéméni, de Kpaza et d'Agbandaoudé situés dans la région Centrale du Togo, entraîne la réduction des terres agricoles et pouvant impacter la sécurité alimentaire et nutritionnelle des populations. Ces sites d'orpaillage sont laissés en l'état après l'extraction d'or. Conformément aux enjeux du développement durable, des mesures pour la restauration de ces sols dégradés par l'orpaillage doivent être envisagées. La présente étude a été entreprise pour analyser les échantillons de sols soumis à l'orpaillage dans la région Centrale du Togo afin de disposer des données sur la qualité et la fertilité de ces sols. De façon spécifique, il s'agit de caractériser les échantillons de sols prélevés dans la zone d'étude et d'évaluer la pollution du sol par les ETM sur les sites d'extraction d'or.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La région Centrale est située au centre du Togo et couvre une superficie d'environ 13470 km² entre les parallèles 8° et 15° de la latitude Nord et les méridiens 0°15 et 1°35 de la longitude Est (Figure 1). La région Centrale est à cheval sur trois zones écologiques (II, III et IV) définies par [14]. Sur le plan géologique, les unités rencontrées sont l'Atacora, le Buem, le complexe de l'axe Kabye-Sotouboua-Agou, la plaine bénino-togolaise et les zones de collines. Sur le plan pédologique, les sols rencontrés sont les sols ferrallitiques indurés et non indurés, les sols ferrugineux concrétionnés à faibles et à grande profondeur, les vertisols et les sols peu évolués d'érosion. Les sols ferrallitiques sont de couleur rouge, parfois jaune sur pente, de texture sablo-argileux à argileux et assez fortement lessivé avec une structure excellente. Ils sont recherchés pour les cultures vivrières et parfois réservés aux plantations d'arbres, tels que les palmiers à huile ou les tecks [15]. Les sols ferrugineux sont gris brun foncé; sableux, un peu argileux en profondeur, de structure grumeleuse. Ces sols sont peu fertiles et peu utilisés. Les vertisols de couleur foncée et homogène, noirâtre en surface du fait de la matière organique, olivâtre en profondeur possèdent une texture argileuse dans les bas-fonds, moyennement limoneuse et finement sableuse sur les gneiss avec une structure grossière. Ces sols sont très bonnes qualités chimiques. Les sols peu évolués d'érosion sont des formations meubles, peu organiques et peu structurées, de 20 à 30 cm sur des roches plus ou moins altérées [15]. Les sols sont consacrés à la culture vivrière (maïs, le mil, le haricot, le niébé, le sorgho, le manioc, l'igname, le riz, l'arachide, le soja etc...) tandis que les produits de rente (coton, anacardes, etc.) sont faiblement exploités. Le réseau hydrographique est constitué d'innombrables petits ruisseaux dominés par le fleuve Mono et quelques importantes rivières que sont Anié, Mô et Assoukoko. Ce réseau regorge une variété de substances minérales dont l'or. La zone d'étude jouit d'un climat tropical de type soudanien, marqué par l'alterance d'une saison sèche (Novembre à mars) et d'une saison pluvieuse (Avril à octobre) avec une pluviométrie situant entre 1200 et 1500 mm par an. Les températures varient entre 25,05 et 29,52°C avec une température moyenne de 26 °C. Les formations forestières rencontrés sont les forêts denses, les forêts sèches et les forêts galeries. La région Centrale est la zone où l'activité d'orpaillage est beaucoup pratiquée, principalement dans deux préfectures (Tchaoudjo et Blitta) où se concentre la plupart des sites d'orpaillage [16].

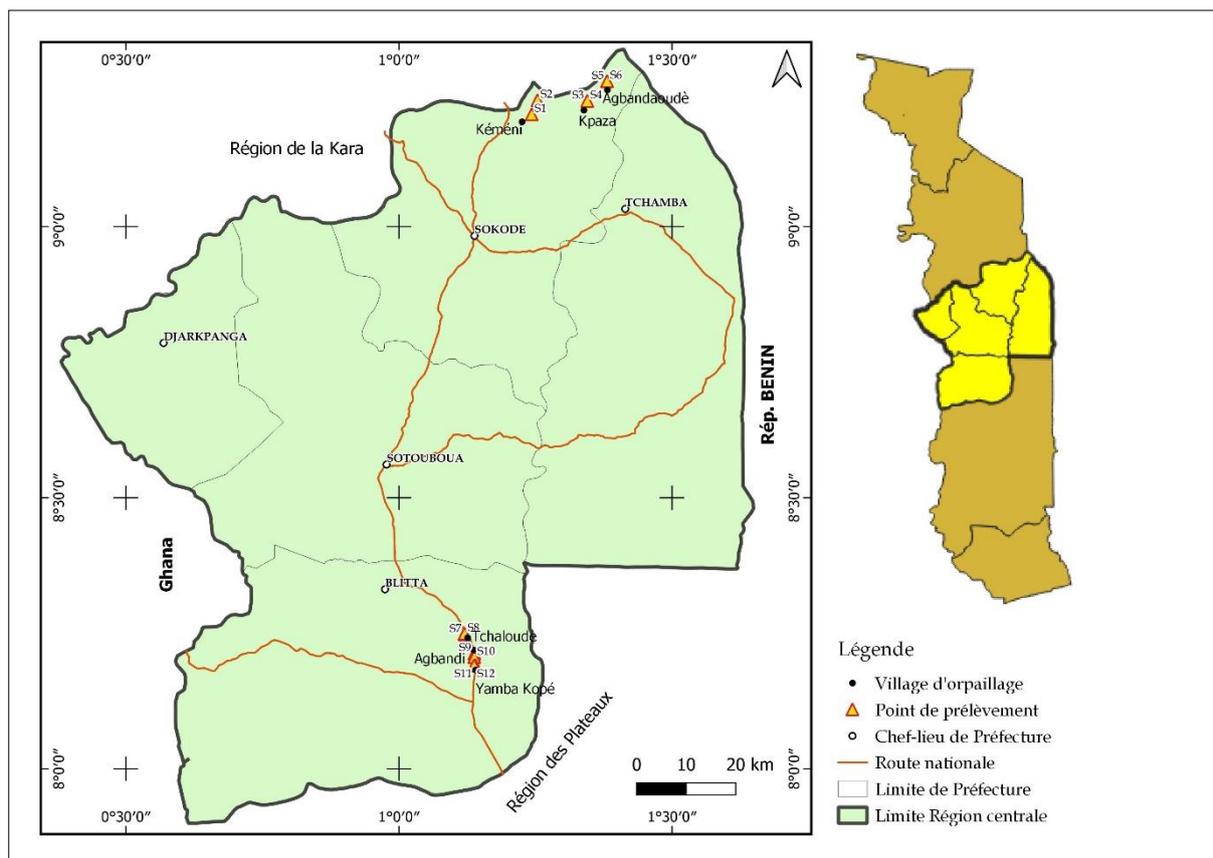


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

2.2 ECHANTILLONNAGE DES SOLS

Six (6) localités (Yamba-Kopé, Agbandi, Tchaloudè, Agbandaoudè, Kpaza, Kéméni) à raison de trois localités dans chaque préfecture ont été choisies. Dans chaque localité, deux (2) sites d'orpaillage les plus exploités ont été prospectés. Sur chacun des 12 sites, 4 types de sols ont été échantillonnés: le sol aurifère (SA) c'est le sol contenant les minerais d'or à extraire; le sol aurifère lavé (SAL) c'est le sol rejeté après extraction d'or; le sol sous culture de maïs (SSCM) c'est le sol prélevé dans les champs de maïs et le sol sous végétation naturelle (SSVN) qui est un sol non dégradé. Pour chaque type de sol, un échantillon composite de 5 prélèvements a été constitué. Au total, 48 échantillons composites de sol ont été constitué sur l'ensemble des 12 sites prospectés. Les sols ont été prélevés par randomisation en cinq (05) points aléatoires sur 0,5 ha et mélangés pour constituer un échantillon composite de 1 kg par type de sol [17]. Les prélèvements de sol sont effectués dans les vingt (20) premiers centimètres supérieurs à l'aide d'une truelle.

2.3 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS AU LABORATOIRE

Les échantillons ont été séchés à la température ambiante de laboratoire (25 – 30°C) sur des papiers dans des plateaux en bois à l'air libre sans risque de contamination par la poussière avant la séparation des éléments grossiers de la terre fine au moyen d'un tamis de 2 mm. La terre fine de chaque échantillon a été conservée à l'abri de la lumière jusqu'aux analyses physico-chimiques. La minéralisation des sols pour l'analyse des éléments traces métalliques (Cu, Zn, Pb, Cd) a été effectuée à chaud (sur une plaque chauffante pendant 2h 30 à 120°C) à l'aide d'un mélange d'acide nitrique, d'acide chlorhydrique et d'acide fluorhydrique. Le minéralisat est recueilli avec de l'eau distillée puis filtrée. Sur le filtrat obtenu, le dosage des éléments traces a été effectué à partir du spectromètre d'absorption atomique (SAA) à four par électrothermique [18].

2.4 ANALYSE DES ÉCHANTILLONS AU LABORATOIRE

L'analyse a été réalisée au Laboratoire Sols Eaux Végétaux Engrais de l'Institut Togolais de Recherche Agronomique (ITRA) de Lomé selon les méthodes mentionnées dans le Tableau 1. Les analyses ont porté sur la granulométrie 5 fractions, le taux de

matière organique (MO), le taux de carbone organique (C), de la teneur en azote total (N), de la teneur en phosphore (P) assimilable, le complexe adsorbant: le calcium (Ca), le potassium (K), le sodium (N), la conductivité électrique (CE), le pH et sur quatre (4) éléments traces métalliques (ETM) à savoir le cuivre, le zinc, le plomb et le cadmium. La classification de la texture des sols a été faite suivant le triangle de texture du Département de l'Agriculture des Etats-Unis [19], dont les trois côtés du triangle correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile.

Tableau 1. Analyse des échantillons au laboratoire.

Paramètres	Méthodes/matériels utilisés
Analyses Granulométriques	
Préparation des échantillons	Séchage, émiettage et tamisage à 2 mm (NF ISO 11464)
Détermination à 5 fractions	Pipette de Robinson (norme NF X 31-107)
Analyses Physico-chimiques	
Matière Organique (MO)	Walkley-Black adapté à la méthode colorimètre TM-GLOSOLAN-01-2019
Carbone (C)	Walkley-Black adapté à la méthode colorimètre TM-GLOSOLAN-01-2019
Azote (N)	Kjeldahl NF ISO 11261 / X31-111. AFNOR, Décembre 1999
Phosphore Assimilable (Pass)	Olsen (NF ISO 11263)
Cations échangeables (Ca)	Méthode à l'Acétate d'Ammonium; NF X 31-130 Spectrophotométrie à Absorption Atomique (SAA)
Cations échangeables (K, Na)	Méthode à l'Acétate d'Ammonium; photométrie à flamme
Conductivité électrique 1/5 (CE)	Conductimétrie
pH	pH-mètre avec (1/2,5) comme ratio sol-eau, NF EN ISO 10390
Eléments traces métalliques (ETM)	
Le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb), le cadmium (Cd)	Spectrométrie à absorption atomique à four graphite électrothermique

2.5 ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

Les données collectées sur le terrain et les résultats d'analyse ont été saisies et codifiées, à l'aide du tableur Microsoft Excel 2010[®]. Elles ont été soumises à des analyses statistiques descriptives, aux tests de variabilité et des analyses multivariées telle que l'analyse en composante principale avec logiciel STATISTICA version 7.1 au seuil de signification de 0.05. Les données ont été traitées afin de déterminer les différences entre les caractéristiques chimiques des sols des différents types de sols. Les différents types de sols ont été classés à partir de certains critères d'évaluation des classes de limitation afin de déterminer l'effet de l'orpaillage sur la fertilité du sol. Cette classification se repose sur la détermination des limitations, de caractéristiques chimiques, que peuvent avoir un sol (Tableau 2). L'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour identifier les variables qui caractérisent les types de sols. L'état de contamination des sols a été déterminé par le calcul de l'indice de pollution. Le logiciel ArcGIS10 a été utilisé pour réaliser la carte de la localisation de la zone d'étude.

2.5.1 MÉTHODE D'ÉVALUATION DES NIVEAUX DE FERTILITÉ DES SOLS

La fertilité des différents types de sols étudiés a été définie à partir des classes de fertilité chimiques (Tableau 2). Il a été défini, en fonction des limitations en cause et de leur degré d'intensité, les classes ou niveaux de fertilité suivantes:

- **Classe I, niveau de fertilité élevé:** Les sols sont de cette classe lorsque les caractéristiques ne présentent pas ou présentent seulement de faibles limitations.
- **Classe II, niveau de fertilité moyen:** Les sols sont de cette classe lorsque les caractéristiques ne présentent pas plus de 3 limitations modérées éventuellement associées à de faibles limitations.
- **Classe III, niveau de fertilité bas:** Les sols sont de cette classe lorsque ses caractéristiques présentent plus de 3 limitations modérées associées à une seule limitation sévère.
- **Classe IV, niveau de fertilité très bas:** Les sols sont de cette classe lorsque ses caractéristiques présentent plus d'une limitation sévère.

Tableau 2. Critères d'évaluation des classes de fertilité des sols

Caractéristiques	Niveau de fertilité				
	Très élevé (sans limitation)	Elevé (limitation faible)	Moyen (limitation moyenne)	Bas (limitation sévère)	Très bas (limitation très sévère)
	Degré 0	Degré 1	Degré 2	Degré 3	Degré 4
MO (en %)	> 2	2-1,5	1,5-1	1-0,5	< 0,5
N (en %) à pH 6	> 0,08	0,08-0,06	0,06-0,045	0,045-0,03	< 0,03
P assimilable	> 20	20-15	15-10	10-5	< 5
K (méq/100g de sol)	> 0,4	0,4-0,3	0,3-0,2	0,2-0,1	< 0,1
Somme des cations (S) (méq/100g de sol)	> 10	10-7,5	7,5-5	5-2	< 2

Sources: [20]

2.5.2 CALCUL DE L'INDICE DE POLLUTION PAR LES ETM DES SOLS

L'indice de pollution (IP) a été calculé afin de déterminer la toxicité des sols aurifères lavé des différents sites de la zone d'étude. En effet, l'IP est un critère qui permet d'évaluer le degré de pollution ou de toxicité d'un sol contaminé par les ETM. Ainsi, il permet de mettre en exergue une contamination de type multiéléments dans les échantillons [21]. L'IP est calculé à partir de la moyenne des rapports des concentrations en métaux dans les échantillons de sol sur la base des valeurs directives limites [21]. Ces valeurs limites correspondent aux niveaux tolérables des concentrations en métaux (ETM) dans le sol selon la norme AFNOR NFU 44-041 [22]. Ainsi, les seuils de pollution des ETM, relatifs à cette étude selon [22] sont: 100 ppm pour le cuivre, 300 ppm pour le zinc, 100 ppm pour le plomb, et 2 ppm pour le cadmium. L'IP est déterminé par la formule adaptée suivante:

$$IP = \frac{\left(\frac{Cu}{100}\right) + \left(\frac{Zn}{300}\right) + \left(\frac{Pb}{100}\right) + \left(\frac{Cd}{2}\right)}{4}$$

IP > 1 correspond à un sol pollué par plusieurs métaux.

3 RESULTATS

3.1 ETAT DES SOLS DE LA ZONE D'ÉTUDE

La statistique descriptive des différents paramètres physico-chimiques étudiés sont reproduites sur le Tableau 3. L'analyse du tableau 3 montre une variation de 0,04 à 38,61 % avec une moyenne de 7,23±9,08 pour les concrétions; de 0 à 11,56 % avec une moyenne de 3,38±2,89 pour l'argile; de 0 à 24,18 % avec une moyenne de 10,12±6,58 pour le limon; de 0 à 13,92 % avec une moyenne de 6,48±3,35 pour le limon grossier; de 4,80 à 35,52 % avec une de moyenne de 20,21±7,01 pour le sable fin et de 5,90 à 91,89 % avec une moyenne de 57,35±15,08 pour le sable grossier. Les valeurs moyennes du MO, C, N, C/N, P, Ca, K et Na sont respectivement de 1,07±0,85 %; 0,62±0,49 %; 13,64±8,17; 1,08±1,41 mg/kg; 5,05±3,20 méq/100g; 0,14±0,29 méq/100g et 0,16±0,15 méq/100g. La conductivité électrique (CE) varie de 7,40 à 176,50 µS/cm. En considérant la valeur seuil (CE ≥ 4000 µS/cm), aucun des sols n'est halin donc indemnes d'effet de salinité. Le pH des sols varie de 5,09 à 8,32 avec une moyenne de 6,10. Les sols étudiés sont acides à modérément alcalin.

Tableau 3. Résultats statistiques des paramètres physico-chimiques des sols de la zone d'étude

Paramètres	Min	Max	Médiane	Moyenne	Ecart-Type	Variance
Concrétion (%)	0,04	38,61	3,83	7,23	9,08	82,48
Argile (%)	0,00	11,56	2,67	3,38	2,89	8,36
Limon fin (%)	0,00	24,18	8,87	10,12	6,58	43,32
Limon grossier (%)	0,00	13,92	6,56	6,48	3,35	11,25
Sable fin (%)	4,80	35,52	20,87	20,21	7,01	49,21
Sable grossier (%)	5,90	91,89	56,12	57,35	15,08	227,46
MO (%)	0,05	3,65	0,87	1,07	0,85	0,72
C (%)	0,03	2,12	0,50	0,62	0,49	0,24
N (%)	0,00	0,26	0,04	0,06	0,06	0,00
C/N	2,65	47,32	11,84	13,64	8,17	66,74
P (mg/kg)	0,03	6,42	0,49	1,08	1,41	1,98
Ca (méq/100g)	0,21	11,03	4,86	5,05	3,20	10,26
K (méq/100g)	0,01	1,47	0,07	0,14	0,29	0,09
Na (méq/100g)	0,00	0,74	0,14	0,16	0,15	0,02
CE 1/5 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	7,40	176,50	20,90	35,34	35,82	1282,87
pH	5,09	8,32	6,12	6,10	0,58	0,34

Min: minimum, Max: maximum; MO: matière organique; C: carbone; N total: azote total; C/N: Rapport Carbone Azote; Pass: Phosphore assimilable; Ca²⁺: Calcium; K⁺: Potassium; Na⁺: Sodium; pH eau (1/2,5), CE: Conductivité électrique 1/5 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

3.2 ETAT PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS DE LA ZONE D'ÉTUDE EN FONCTION DES DIFFÉRENTS TYPES DE SOLS

Le Tableau 4 présente la valeur moyenne des variables des différents types de sols étudiés et les résultats du test de variabilité. La Figure 2 présente la variation des paramètres étudiés selon les types de sols. Les résultats montrent dans l'ensemble une différence significative ($p < 0,05$) pour les teneurs en argile, du limon fin, du limon grossier, du sable grossier, de la matière organique (MO), du carbone (C) de l'azote (N), du calcium (Ca), du sodium (Na) sauf au niveau des paramètres suivants: de concrétions ($p = 0,446$), du sable fin ($p = 0,437$), du rapport carbone azote (C/N) ($p = 0,662$), du phosphore assimilable ($p = 0,650$), du potassium ($p = 0,116$), de la conductivité électrique (CE) ($p = 0,066$) et du pH ($p = 0,850$) des sols étudiés. Les résultats d'analyse granulométrique montrent que les sols aurifères (SA), les sols sous culture du maïs (SSCM) et les sols sous végétation naturelle (SSVN) sont sablo-limoneux tandis que les sols aurifères lavés (SAL) sont sableux. La teneur en sable, limon et argile est la même dans les sols aurifères (SA), les sols sous culture du maïs (SSCM) et les sols sous végétation naturelle (SSVN). Les sols aurifères lavés ont une teneur faible en argile et limon mais une teneur plus élevée en sable (89,29%). Il est noté la présence d'éléments de plus de 2 millimètres de diamètre (concrétions) dans les sols avec une teneur plus élevée (10,23 %) dans les échantillons de sols lavés (SAL). Les sols sous culture du maïs (SSCM) et sous végétation naturelle (SSVN) ont des teneurs plus élevées en matière organique, en carbone et en azote que les sols aurifères (SA) et sols aurifère lavé (SAL). Les sols aurifères lavés se retrouvent avec de faibles teneurs en matière organique, en carbone, en azote, en calcium et en sodium. La conductivité électrique des sols étudiés est très faible. Elle est évaluée, en moyenne, à $54,50 \pm 50,18 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans le SSVN, à $41,54 \pm 34,88 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans le SSCM, à $26,04 \pm 25,60 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans le sol aurifère (SA), à $19,28 \pm 16,49 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans le sol aurifère lavé (SAL). Les quatre types de sols étudiés sont indemnes de salinité. Les sols sous culture du maïs (SSCM) et sous végétation naturelle (SSVN), ont un pH faiblement acide respectivement $6,11 \pm 0,57$ et $6,20 \pm 0,35$. Les sols aurifères (SA) et aurifère lavé (SAL) sont moyennement acide respectivement $5,99 \pm 0,37$ et $6,07 \pm 0,89$.

Tableau 4. Résultats statistique des paramètres en fonction des différents types de sols

Paramètres	SA	SAL	SSCM	SSVN	P-value
Concrétions	4,15±4,43 a	10,23±8,57 a	7,65±10,78 a	6,87±11,06 a	0,446
Argile	4,78±2,89 a	1,36±2,38 b	3,40±2,38 ab	3,96±2,98 ab	0,022
Limon fin	10,95±4,30 a	4,3±6,39 b	13,41±6,00 a	11,79±6,08 a	0,002
Limon grossier	6,98±3,15 a	3,90±2,51 b	6,85±2,83 a	8,16±3,59 a	0,010
Sable fin	22,58±7,23 a	17,81±7,09 a	20,08±6,58 a	20,36±7,19 a	0,437
Sable grossier	48,68±16,21 ab	71,47±12,59 a	55,00±9,09 ab	54,23±12,29 ab	0,001
MO	0,77±0,38 b	0,24±0,11 c	1,64±0,91 a	1,62±0,73 a	0,000
C	0,44±0,22 b	0,14±0,06 c	0,94±0,53 a	0,94±0,42 a	0,000
N	0,03±0,01 b	0,01±0,01 b	0,08±0,03 a	0,09±0,08 a	0,000
C/N	15,95±11,58 a	11,74±6,41 a	13,18±7,12 a	13,67±6,98 a	0,662
P	1,22±1,82 a	0,62±0,63 a	1,18±1,22 a	1,27±1,70 a	0,650
Ca	6,34±2,93 a	1,42±0,83 b	6,06±2,73 a	6,37±2,79 a	0,000
K	0,06±0,04 a	0,03±0,01 a	0,25±0,41 a	0,22±0,39 a	0,166
Na	0,24±0,20 a	0,06±0,07 b	0,16±0,10 ab	0,18±0,12 ab	0,023
CE	26,04±25,60 a	19,28±16,49 a	41,54±34,88 a	54,50±50,18 a	0,066
pH	6,07±0,89 a	5,99±0,37 a	6,20±0,35 a	6,11±0,57 a	0,850

SA: Sol aurifère; SAL: Sol aurifère lavé; SSCM: Sol sous culture du maïs; SSVN: Sol sous végétation naturelle. SL: sablo-limoneux. S: sableux; MO: matière organique; C: carbone; N total: azote total; C/N: Rapport Carbone Azote; Pass: Phosphore assimilable; Ca²⁺: Calcium; K⁺: Potassium; Na⁺: Sodium; pH eau (1/2,5), CE: Conductivité électrique 1/5 (µS/cm)

Les moyennes suivies de la même lettre sur la même ligne ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %.

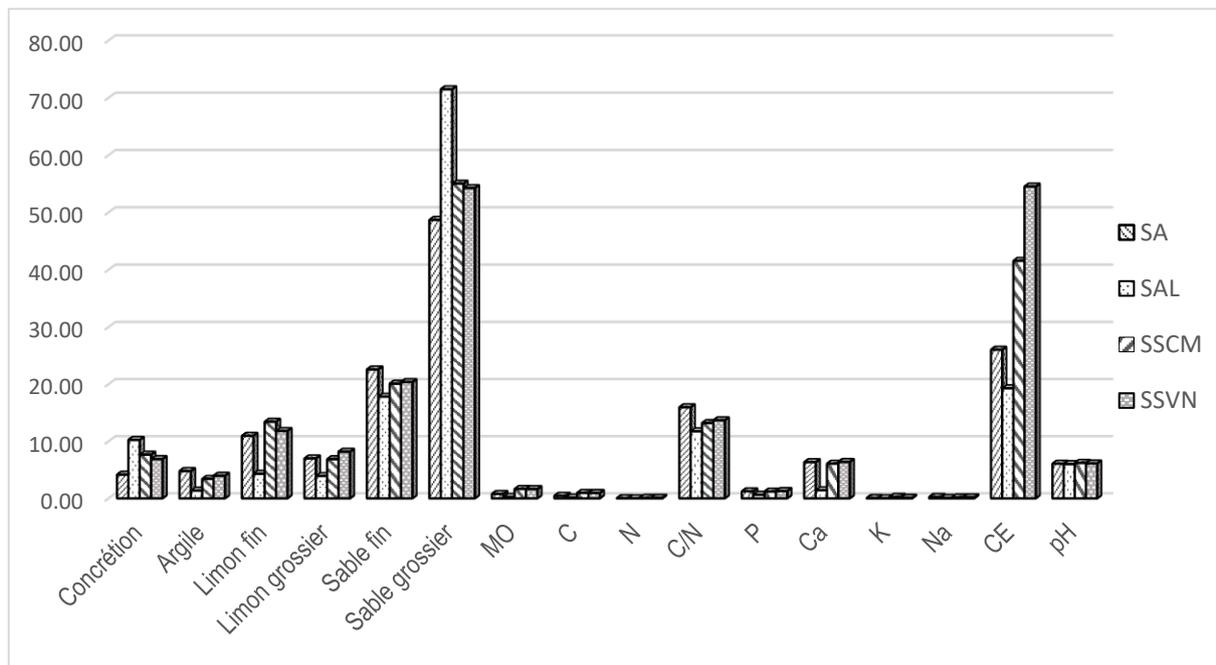


Fig. 2. Teneur moyenne des paramètres étudiés des différents types de sols.

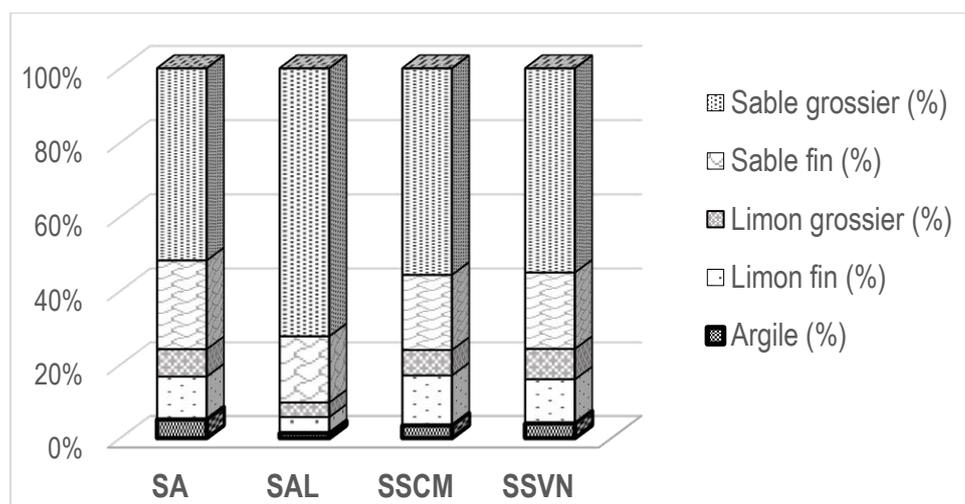


Fig. 3. Distribution des fractions granulométriques selon les types de sols

SA: Sol aurifère; SAL: Sol aurifère lavé; SSCM: Sol sous culture du maïs; SSVN: Sol sous végétation naturelle.

3.3 NIVEAU DE FERTILITÉ DES SOLS

Les résultats de l'identification des paramètres de niveau et les niveaux de fertilité chimique des différents types de sols sont présentés respectivement dans le Tableau 5 et 6. Les sols aurifères (SA) et aurifère lavé (SAL) sont de classe de fertilité IV car présentent plus d'une limitation sévère. Les sols sous culture du maïs (SSCM) et sous végétation naturelle (SSVN) sont de classe de fertilité III car présentent plus de 3 limitations modérées associées à une seule limitation sévère (Tableau 6). Le phosphore assimilable (P ass.) est limitatif pour l'ensemble des 4 types de sols étudiés. Les sols aurifères (SA) et aurifère lavé (SAL) présentent un niveau de fertilité très bas. Les sols sous culture du maïs et sous végétation naturelle présentent un niveau de fertilité bas. Les sols aurifères lavés (SAL) présentent cinq limitations sévères.

Tableau 5. Identification des paramètres de niveau

Paramètres	SA	SAL	SSCM	SSVN
MO (en %)	0,76	0,24	1,64	1,62
N (en %) à pH 6	0,03	0,01	0,08	0,09
P ass.	1,22	0,62	1,18	1,27
K (méq/100g de sol)	0,06	0,03	0,25	0,22
Somme (S) (méq/100g de sol)	6,64	1,51	6,47	6,65

MO: matière organique; C: carbone; N total: azote total; Pass: Phosphore assimilable; K: Potassium.

Tableau 6. Niveau de fertilité des sols étudiés

Paramètres	SA	SAL	SSCM	SSVN
MO (en %)	Limitation sévère	Limitation très sévère	Limitation faible	Limitation faible
N (en %) à pH 6	Limitation sévère	Limitation très sévère	Limitation faible	Sans limitation
P ass	Limitation très sévère	Limitation très sévère	Limitation très sévère	Limitation très sévère
K (méq/100g de sol)	Limitation très sévère	Limitation très sévère	Limitation moyenne	Limitation moyenne
Somme (S) (méq/100g de sol)	Limitation moyenne	Limitation très sévère	Limitation moyenne	Limitation moyenne
Classes	IV	IV	III	III
Niveau de fertilité	Très bas	Très bas	bas	bas

MO: matière organique; C: carbone; N total: azote total; Pass: Phosphore assimilable; K: Potassium.

3.4 ETAT DE CONTAMINATION DES SOLS PAR LES ETM

3.4.1 TENEURS EN ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETM) DES SOLS AURIFÈRES LAVÉS DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le tableau 7 indique la statistique descriptive ainsi que la valeur limite de chaque ETM selon la norme AFNOR U44-41. Sur l'ensemble de la zone d'étude, les teneurs en éléments traces métallique varient de 0,01 à 10,24 mg/kg pour le cuivre, 0,02 à 4,01 mg/kg pour le zinc, 0,01 à 5,05 mg/kg pour le plomb et 0 à 1,40 mg/kg pour le cadmium. Le cuivre, le zinc, le plomb et le cadmium ont respectivement comme valeur moyenne 4,14±3,40 mg/kg, 0,73 mg/kg±1,22, 0,70±1,44 mg/kg et 0,21±0,48 mg/kg. Les concentrations maximales en ETM (Cu, Zn, Pb, et Cd) dans les sols aurifères lavés de tous les sites sont inférieures aux valeurs limites de la norme AFNOR U44-41.

Tableau 7. Concentration en éléments traces métalliques (en mg/kg) des sols aurifère lavé de la zone d'étude

ETM	Minimun	Maximun	Moyenne	Ecart-type	Variance	Valeurs limites*
Cu	0,01	10,24	4,14	3,40	11,56	100
Zn	0,02	4,01	0,73	1,22	1,50	300
Pb	0,01	5,05	0,70	1,44	2,08	100
Cd	0,00	1,40	0,21	0,48	0,23	2

ETM: éléments traces métalliques; Cu: cuivre; Zn: zinc; Pb: plomb; Cd: cadmium. * Valeurs limites selon la norme AFNOR NF U44-041

3.4.2 TENEUR DES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES (ETM) DANS SOLS AURIFÈRES LAVÉS EN FONCTION DES LOCALITÉS

Les teneurs du cuivre, du zinc, du plomb et du cadmium ont été mesurées en mg/kg dans les localités d'orpaillage d'Agbandi, de Tchaloudé, de Yamba kopé, de Kéméni, de Kpaza et d'Agbandaoudé (Figure 4). Sur le site d'Agbandi, le cuivre a la plus forte teneur (1,79 mg/kg), suivi du cadmium (0,71 mg/kg), du plomb (0,09 mg/kg) et du zinc (0,03 mg/kg). A Tchaloudé, le cadmium n'a pas été détecté (inférieur au seuil de détection). Les teneurs sont 6,13 mg/kg pour le cuivre, 2,53 mg/kg pour le zinc, 0,52 mg/kg pour le plomb. A Yamba kopé, les teneurs sont de 1,79 mg/kg pour le cuivre, 0,12 mg/kg pour le zinc, 2,53 mg/kg pour le plomb et 0,51 mg/kg pour le cadmium. A Kéméni, les teneurs sont de 3,15 mg/kg pour le cuivre, 0,65 mg/kg pour le zinc, 0,53 mg/kg pour le plomb et 0,02 mg/kg pour le cadmium. A Kpaza, le cadmium est non détectable. Les teneurs sont de 4,80 mg/kg pour le cuivre, 0,12 mg/kg pour le zinc et 2,53 mg/kg pour le plomb. Enfin, sur le site Agbandaoudé, le cadmium est non détectable. Les teneurs sont de 7,19 mg/kg pour le cuivre, 1,01 mg/kg pour le zinc et 0,01 pour le plomb.

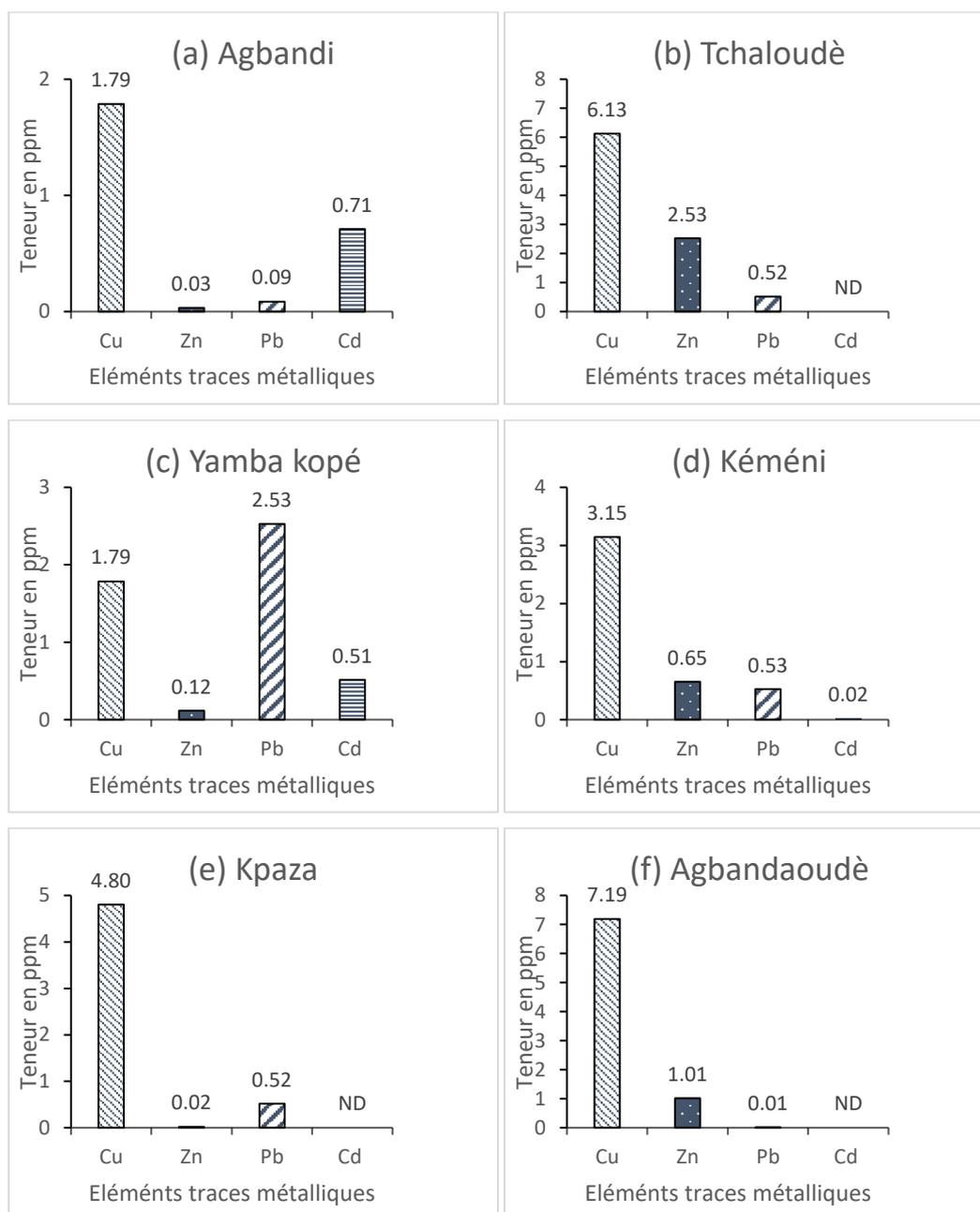


Fig. 4. Teneurs du cuivre, du zinc, du plomb et du cadmium ont été mesurées en mg/kg dans les localités d'orpaillage à Agbandi (a), à Tchaloudè (b), à Yamba kopé (c), à Kéméni (d), à Kpaza (e) et à Agbandaoudè (f)

3.4.3 ETAT DE POLLUTION DES SOLS PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES

L'indice de pollution des sols par les ETM a été appliquée pour mesurer cet état de pollution. Les résultats montrent que les valeurs de l'indice de pollution (IP) varient de 0,01 à 0,09 en fonction des localités (Tableau 9). L'indice le plus bas est obtenu au niveau des sites de la localité de Kéméni et de Kpaza indiquant une faible accumulation des éléments traces sur ces sites. Tous les sols des localités de prélèvement ont des valeurs d'IP inférieures à 1. Les sites de ses localités ne sont pas donc pollués par les ETM étudiés.

Tableau 8. *Indice de pollution (IP) par les ETM dans sols aurifères lavés en fonction des localités*

Localités	indice de pollution (IP)
Agbandi	0,09
Tchaloudè	0,02
Yamba kopé	0,07
Kéméni	0,01
Kpaza	0,01
Agbandaoudé	0,02

3.5 ANALYSE DES COMPOSANTES PRINCIPALES

L’interprétation des résultats a porté sur les deux premières composantes principales F1 et F2 qui cumulent 97,05% de la variance totale, soit respectivement 72,55% et 24,49%. Le graphique de la projection des variables (Figure 5) indique que tous les paramètres physico-chimiques ont contribué significativement à la construction de F1. Les concrétions et le sable grossier sont corrélés positivement à cet axe F1, tandis que argile, limon fin, limon grossier, sable fin, MO, C, N, C/N, p, Ca, K, Na, CE et pH sont corrélés négativement. Le ratio C/N et K sont corrélés à l’axe F2. La projection des individus (Figure 6) montre trois types de sols à savoir le type 1 qui regroupe les sols sous végétation naturelle (SSVN) et sols sous culture du maïs (SSCM). Ils sont caractérisés par des teneurs en K, N, C, CE et en matière organique plus élevées et globalement conformes aux normes. Le deuxième type ce sont des sols aurifères (SA) caractérisés par des teneurs en argile, ratio C/N, sable fin, limon fin et Na plus élevées et troisième type, les sols aurifères lavés caractérisés par les concrétions et le sable grossier. Les SAL sont également dépourvues de limon fin, limon grossier, Ca et P.

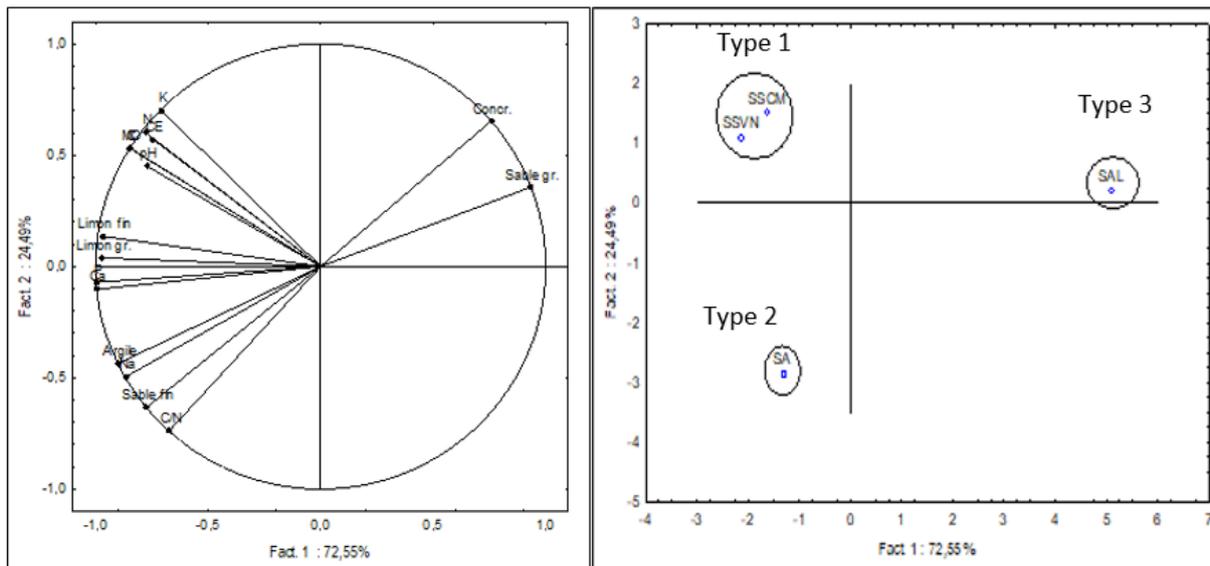


Fig. 5. *Projections des variables (paramètres physico-chimiques) et des types de sols dans les plans factoriels F1 x F2*

4 DISCUSSION

Les résultats d’analyse granulométrique montrent que les sols aurifères, les sols sous culture du maïs et les sols sous végétation naturelle ont une texture sablo-limoneux avec 75 % de sable tandis que les sols aurifères lavés sont sableux avec de 89 % de sable. La différence de texture s’expliquerait par le processus d’extraction d’or qui passe par le lavage du sol minéralisé. Les sols aurifères lavés ont une teneur moyenne faible en argile (1,36 %) et limon (8,21 %) mais une teneur plus élevée en sable (89,29%); ce qui peut s’expliquer par l’action anthropique des orpailleurs sur le sol à la recherche de l’or (orpaillage). Cette texture sableuse des sols aurifères lavés n’est pas de nature à favoriser la rétention de l’eau et des éléments nutritifs selon [23]. Il est à préciser que les particules limoneuses constituent un réservoir d’éléments nutritifs dont un sol a besoin en vue de son exploitation agricole. En plus, l’argile est l’élément qui conditionne la fixation des éléments minéraux sur le complexe adsorbant. Les résultats ont montré que les sols aurifères lavés se retrouvent avec de faibles teneurs en matière organique, en

carbone, en azote, en calcium et en sodium. Ceci est dû à l'exploitation de l'or. Ces résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par [10] dans la carrière d'exploitation de calcaire de Tabligbo au Sud-Togo qui ont montré que le taux de la matière organique est passé de 2,56 % dans la zone non exploitée à 1,51 % dans la zone CIMAO et à 0,78 % dans la zone WACEM. L'argile et la matière organique étant la base du complexe argilo-humique, leur déficience contribuerait en grande partie à la dégradation de la fertilité de ces sols comme le rapporte [24].

le sol aurifère lavé présente un niveau de fertilité très bas. Cela signifie que l'orpaillage a un effet négatif sur la fertilité du sol. La recherche et l'extraction d'or artisanale conduit à une modification des caractéristiques physico-chimiques des sols. Nos résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par [10] qui ont abouti également à cette conclusion dans leurs travaux sur l'évolution des caractéristiques morphologiques et géochimiques des sols de la carrière de calcaire de Tabligbo au Sud-Togo. Les résultats de cette étude ont montré que l'orpaillage dans la région centrale du Togo a conduit à la dégradation des sols. Cette dégradation entraîne la réduction des terres arables dans l'environnement des sites d'orpaillage. Les sols devenus sableux et pauvres en éléments nutritifs sont abandonnés par les agriculteurs. Les travaux de [25] sur la perception des populations riveraines des impacts de l'exploitation de calcaire sur leurs activités agricole dans le Sud Togo, ont révélé également que 97 % des personnes interrogés affirment que l'exploitation du gisement de calcaires a entraîné un impact négatif sur les terres du secteur d'étude. De plus, les auteurs [3] ont montré dans leur étude que le système d'exploitation ordonné (exploitation permettant de reconstituer les différentes couches de sol décapées dans les zones de remblais) réduit considérablement les impacts de l'activité minière sur les caractéristiques physico-chimiques du sol. L'exploitation des terres sans l'utilisation des techniques de restauration et de conservation adaptées amène indubitablement à la dégradation totale des sols comme le souligne [26] – [28].

La différence entre les types de sols échantillonnés serait du à l'orpaillage qui s'effectue dans ces zones. Les auteurs [29] ont lié aussi cette différence observée entre les sols des horizons de surface à maraîchers dans la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire) aux pratiques agricoles,

Les résultats des analyses chimiques au laboratoire ont permis d'évaluer le degré de contamination des sols aurifère lavé par certains ETM. Sur les six localités, La teneur du cuivre et du zinc sont plus élevés à Agbandaoudé et à Tchalous, le plomb à Yamba kopé et le cadmium n'est détectable à Kéméni, à Agbandi et à Yamba kopé. Ces valeurs restent toutes en dessous du seuil de valeurs limites de la norme AFNOR U44-41, donc les sites d'orpaillage ne sont pas pollués par ces ETM étudiés. Les valeurs de cadmium obtenues sont similaires à celles obtenues par [30] dans les sols de la zone aurifère de Komabangou au Niger (0,037 à 1,434 mg/kg). Par contre, elles sont supérieures à celles obtenues en Chine par [31] sur les sols miniers d'exploitation de l'or et du fer du réservoir de Miyun et de Beijing qui sont respectivement de 0,85 mg/kg et 0,54 mg/kg. Selon les travaux effectués par [1] sur l'évaluation de l'impact physique de l'orpaillage sur les sols et les eaux souterraines dans la zone agricole aménagée de Bomborée au Burkina Faso, les résultats d'analyse des métaux lourds des sols sur l'ensemble de la zone montre des valeurs en-deçà du seuil de pollution. Par rapport à ces travaux de [1], nos résultats montrent des teneurs faibles pour le cuivre, le zinc et le plomb. Tout comme au Sud-Est du Togo, les échantillons de sol prélevés dans les carrières d'exploitation du gisement de calcaires de tabligbo [32], présentent des teneurs plus élevées que ceux obtenus dans cette étude. La différence entre ces valeurs de teneurs obtenus pourrait être liées à la nature du minerai extrait; aux traitements de ces minerai, associés à la technique d'exploitation. Nos résultats se rapprochent des études effectuées par [13] sur les sites d'orpaillage de Tchalo, d'Agbandi et de Kéméni de la région Centrale du Togo qui ont montré des teneurs de cuivre qui varient de 2,04 à 2,55 mg/kg, des teneurs de plomb qui varient de 2,21 à 2,98 mg/kg, des teneurs de zinc qui varient de 1,98 à 3,1 mg/kg, des teneurs de mercure qui varient de 20,92 à 24,32 µg/kg et des teneurs de cadmium qui varient de 0 à 0,3 mg/kg

La présente étude a démontré que les sols soumis à l'orpaillage dans la région centrale du Togo ne sont pas pollués par ETM (Cu, Zn, Pb, et Cd). Nos résultats sont similaires à ceux trouvés par [13] sur les sites d'orpaillage de Tchalo, d'Agbandi et de Kéméni, localités situées dans le même secteur d'étude que la présente étude. Nos résultats sont contraire à celui [33] qui ont montré que les sols du secteur de traitement des phosphates au sud du Togo sont, globalement, pollués par le cadmium et le nickel; les zones riveraines étant contaminées par le cadmium, le cuivre, le nickel et le plomb. Cette situation pourrait s'expliquer par la nature du minerai exploité et de son stérile rejeté. Pour [34], le rejet des substances toxiques entraîne la pollution des sols car les orpailleurs sont d'abord contraints de réduire les roches contenant l'or en poussière par un concassage manuel et ensuite traitée la farine de roche obtenue à l'aide de cyanure (cyanuration) ou de mercure (amalgamation) pour en extraire l'or.

Enfin, nos résultats ont montré que les 12 sites prospectés ont tous un indice de pollution (IP) inférieure à 1. Par contre les travaux [30] dans les sols de la zone aurifère de Komabangou au Niger ont montré que sur les 27 sites étudiés, 12 ont des valeurs d'IP supérieures à 1. Les sites pollués sont des sites où les orpailleurs font usage du cyanure pour traiter la farine de roche obtenue et du mercure pour amalgamer l'or. Ces résultats montrent une accumulation des métaux dans les sols qui

peuvent persister dans l'environnement et pour prévenir tout risque, un plan de surveillance de la contamination des sols devrait être mis en place et envisager de traiter les sites pollués.

5 CONCLUSION

La présente étude a permis d'évaluer l'effet de l'orpaillage sur les caractéristiques physico-chimiques du sol et d'évaluer le degré de contamination des sols aurifère lavé. Les résultats d'analyse granulométrique montrent que les sols aurifères, les sols sous culture du maïs et les sols sous végétation naturelle ont une texture sablo-limoneuse tandis que les sols aurifères lavés sont sableux. Les sols aurifère lavé ont des faibles teneurs en matière organique, en carbone, en azote, en calcium et en sodium. Les sols aurifères lavés ont été appauvris en ces éléments et ils deviennent sableux à la suite de l'extraction de l'or. Les sols sous culture du maïs et sous végétation naturelle présentent un niveau de fertilité bas alors que le sol aurifère lavé présente un niveau de fertilité très bas. Cela signifie que l'orpaillage a un effet négatif sur la fertilité du sol. La recherche et l'extraction d'or artisanale conduit à une modification des caractéristiques physico-chimiques des sols. L'orpaillage dans la région centrale du Togo a conduit à la dégradation des sols. Cette dégradation entraîne la réduction des terres arables dans l'environnement des sites d'orpaillage. Les sols deviennent sableux et pauvres en éléments nutritifs. Les valeurs des variables restent en dessous du seuil de valeurs limites de la norme AFNOR U44-41. Donc les sols soumis à l'orpaillage dans la région centrale du Togo ne sont pas pollués par ETM (Cu, Zn, Pb, et Cd) étudiés. L'accumulation des ETM dans les sols peuvent persister dans l'environnement et peuvent poser de sérieux risques sanitaires pour l'Homme. Et pour prévenir tout risque, un plan de surveillance de la contamination des sols devrait être mis en place.

REFERENCES

- [1] O. Bamba, S. Pelede, A. Sako, N. Kagambega, et M. Y. Miningou, « Impact de l'artisanat minier sur les sols d'un environnement agricole aménagé au Burkina Faso », *Journal des sciences*, vol. 13, n° 1, p. 1-11, 2013.
- [2] Land and Water Division, *Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne*. Rome, Italy: FAO, 2003. Consulté le: 5 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/c53c6d2b-a9b5-5421-b1f1-5a2902b25866/>.
- [3] A. Issah, M. Djangbedja, et T. Tchamie, « Impacts de l'exploitation du gisement de calcaires de Tabligbo du Sud-Est Togo, sur les caractéristiques physico-chimiques des sols », janv. 2018.
- [4] J. A. Cooke et M. S. Johnson, « Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: A review of theory and practice », *Environ. Rev.*, vol. 10, n° 1, p. 41-71, mars 2002, doi: 10.1139/a01-014.
- [5] A. Aduayi-Akue et K. Gnandi, « Evaluation de la pollution par les métaux lourds des sols et de la variété locale du maïs (*Zea mays*) dans la zone de traitement des phosphates de Kpémé (Sud du Togo) », *Int. J. Bio. Chem. Sci*, vol. 8, n° 5, p. 2347-2355, 2014, doi: 10.4314/ijbcs.v8i5.37.
- [6] D. Y. Agbossoumonde, « Les problèmes liés à l'extraction des ressources naturelles au Togo: Le cas des phosphates de hahotoé-kpogamé et des calcaires de Tabligbo au Sud Togo, 10 », *Rapport d'étude Université de Lomé, Togo*, 2011.
- [7] M. Djangbedja, Dynamiques végétales et stratégies de restauration dans les carrières abandonnées de phosphates et de calcaire au Sud du Togo. Thèse de doctorat, Université de Lomé, 2011.
- [8] K. Gnandi, « Les déchets miniers phosphates, source de la pollution marine au Togo », *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé*, vol. 7, n° 2, Art. n° 2, 2005, doi: 10.4314/jrsul.v7i2.49444.
- [9] A. S. Issah, M. Djangbedja, G. Mawussi, K. Gnandi, et T. T. K. Tchamie, « Evaluation de la pollution des sols de la carrière de calcaire de tabligbo (sud-est togo) par les métaux lourds toxiques », *Cahiers du CBRST*, n° 10, p. 1-18, 2016.
- [10] A. S. Issah, M. Djangbedja, G. Mawussi, K. Gnandi, et T. T. K. Tchamie, « Evolution des caractéristiques morphologiques et géochimiques des sols de la carrière de calcaire de Tabligbo au Sud-Togo », 2017, Consulté le: 1 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://isidore.science/document/10670/1.oy4fyp>.
- [11] V. J. B. K. Djangbedja Minkilabe Zimari Tchagnirou Abdel-Nazif et Tchamie Thiou Komla Tanzidani, « L'orpaillage et le développement durable à Kéméni et à Kpaza dans le centre du Togo. », *Annales des Lettres et Sciences Sociales*, vol. 1, n° 1, p. 4-20, janv. 2018, doi: 10.5281/zenodo.1160681.
- [12] L. Tchassanti *et al.*, « Impacts de l'exploitation artisanale de l'or sur les ressources naturelles à Kemeni (région centrale du Togo). », *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé*, vol. 15, n° 2, Art. n° 2, 2013, doi: 10.4314/jrsul.v15i2.
- [13] Zimari T. A. N. et Boukpepsi T., « Impacts environnementaux et socio-économiques de l'orpaillage dans la région Centrale du Togo », *Revue de géographie du laboratoire Leïdi*, n° 23, p. 117-135, 2020.
- [14] H. Ern, « Die Vegetation Togos. Gliederung, Gefährdung, Erhaltung », *Willdenowia*, vol. 9, n° 2, p. 295-312, 1979.

- [15] M. Lamouroux, « Les sols de teckeraies du Togo », *Doc ORSTOM, France*. 1957.
- [16] PDGM, « Rapport de l'état des lieux « audit détaillé de l'exploitation minière artisanale et à petite échelle au Togo », juillet 2017, Projet de développement et de gouvernance minière (PDGM) », 2017.
- [17] Afnor, « Afnor (1999) Norme française, microbiologie alimentaire, recherche des moisissures et levures, Méthode de routine, Standard no.V 08-022. - References - Scientific Research Publishing », 1999. [https://www.scirp.org/ \(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=31068](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=31068) (consulté le 23 mai 2023).
- [18] J.-F. Chiffolleau, D. Cossa, D. Auger, et I. Truquet, « Trace metal distribution, partition and fluxes in the Seine estuary (France) in low discharge regime », *Marine Chemistry*, vol. 47, n° 2, p. 145-158, 1994.
- [19] USDA, « Soil Survey Manual. Soil Survey Division Staff; Soil Conservation Service Volume Handbook 18, U.S. Department of Agriculture (2017) (chapter 3) », 2017.
- [20] B. Dabin, « Considérations sur l'interprétation agronomique des analyses de sols en pays tropicaux », vol. 4, p. 403-409, 1956.
- [21] H. T. Chon, J. S. Ahn, et M. C. Jung, « Seasonal variations and chemical forms of heavy metals in soils and dusts from the satellite cities of Seoul, Korea », *Environmental Geochemistry and Health*, 1998, doi: 10.1023/A: 1006593708464.
- [22] D. Baize, « Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français », *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, vol. 22, n° 22, p. 37-46, 1994.
- [23] I. Amonmidé, G. Dagbenonbakin, C. E. Agbangba, et P. Akponikpe, « Contribution à l'évaluation du niveau de fertilité des sols dans les systèmes de culture à base du coton au Bénin », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 13, n° 3, Art. n° 3, sept. 2019, doi: 10.4314/ijbcs.v13i3.
- [24] M. Yemefack, L. Nounamo, R. Njomgang, et P. Bilong, « Influence des pratiques agricoles sur la teneur en argile et autres propriétés agronomiques d'un sol ferrallitique au sud Cameroun », 2004.
- [25] A. S. Issah, M. Djangbedja, et T. T. K. Tchamie, « Impacts Socio-Economiques De L'Exploitation Minière Sur Les Populations Riveraines : Cas De L'Exploitation Du Gisement De Calcaires De Tabligbo Dans La Prefecture De Yoto Au Togo », *Post-Print*, Art. n° hal-02265636, 2018, Consulté le: 31 août 2023.
[En ligne]. Disponible sur: <https://ideas.repec.org/p/hal/journal/hal-02265636.html>.
- [26] A. Azontonde, « Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin », *Cah. Ostrom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, n° n°2, p. 217-226, 1993.
- [27] G. M. Ghose M., « Land reclamation and protection of environment from the effect of coal mining operation », *Mine technology*, vol. 5, n° 10, p. 35-39, 1989.
- [28] R. Lal, « Soil erosion on alfisol in Western Nigeria », *Geoderma*, vol. 16, p. 363-441, 1976.
- [29] K. J. Kouakou *et al.*, « Caractérisation physico-chimique des horizons de surface de sols à maraîchers dans la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire) », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 13, n° 2, p. 1193-1200, 2019.
- [30] O. Z. Ibrahim *et al.*, « Distribution spatiale des éléments traces métalliques dans les sols de la zone aurifère de Komabangou au Niger », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 13, n° 1, p. 557-573, 2019.
- [31] X. Huang, Y. Zhu, et H. Ji, « Distribution, speciation, and risk assessment of selected metals in the gold and iron mine soils of the catchment area of Miyun Reservoir, Beijing, China », *Environ Monit Assess*, vol. 185, n° 10, p. 8525-8545, oct. 2013, doi: 10.1007/s10661-013-3193-4.
- [32] A. Issah, M. DJANGBEDJA, et T. Tchamie, « Evaluation de la contamination des sols des carrières d'exploitation du gisement de calcaires de Tabligbo (Sud-Est Togo) par les métaux lourds toxiques », janv. 2018.
- [33] A. A. Aduayi-Akue, « Evaluation de la pollution par les métaux lourds de l'air, des sols et du maïs (*Zea mays* L.) dans la zone de traitement des phosphates au Togo: effets sur la santé humaine », PhD Thesis, Thèse de doctorat, Université de Lomé, Togo, 2015.
- [34] J. Bohbot, « L'orpaillage au Burkina Faso: une aubaine économique pour les populations, aux conséquences sociales et environnementales mal maîtrisées », *EchoGéo*. [journals.openedition.org](https://journals.openedition.org/echogeo), 2017.
[En ligne]. Disponible sur: <https://journals.openedition.org/echogeo/15150>.