UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation réalisé et soutenu par

NOUKOUSSI S. Martin

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER PROFESSIONNEL EN HYDROLOGIE

OPTION : ECOHYDROLOGIE

==========

THEME :

EVALUATION DE LA POLLUTION EN PHOSPHORE ET ELEMENTS TRACES METALLIQUES DES SOLS CULTIVES AUTOUR DU LAC TOHO AU BENIN

Date de soutenance : 06/02/2023

Jury :

1. **Président du Jury : WOTTO Valentin, Professeur Titulaire**
2. **Examinateur : DOVONOU Flavien, Maître de Conférences**
3. **Examinateur : CHOUTI Waris, Maître de Conférences**
4. **Rapporteur : NONVIHO Guevara, Maître-Assistant**

Mention : Excellente

Encadreur

Dr Guevara NONVIHO

Chimiste
Maître Assistant (CAMES)
ENSET-Lokossa / UNSTIM

Superviseur

Dr Waris K. CHOUTI

Chimiste
Maitre de Conférences
FAST / UAC

PROMOTION : 2020-2021

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation réalisé et soutenu par

NOUKOUSSI S. Martin

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER PROFESSIONNEL EN HYDROLOGIE

OPTION : ECOHYDROLOGIE

==========

THEME :

EVALUATION DE LA POLLUTION EN PHOSPHORE ET ELEMENTS TRACES METALLIQUES DES SOLS CULTIVES AUTOUR DU LAC TOHO AU BENIN

Encadreur

Dr Guevara NONVIHO

Chimiste
Maître Assistant (CAMES)
ENSET-Lokossa / UNSTIM

Superviseur

Dr Waris K. CHOUTI

Chimiste
Maitre de Conférences
FAST / UAC

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

PROMOTION : 2020-2021

DEDICACES

Je dédie ce mémoire :

À ma feue mère YORO Pélagie

Toi que je n'ai pas eu grande chance de côtoyer
Reçois ma profonde reconnaissance à travers
ce travail. Maman, que ton âme
Repose en paix !!!

À mon feu père NOUKOUSSI Soukaté Félix

Pendant les jours de ta vie, tu n'as ménagé aucun effort pour m'assurer un avenir meilleur. Malheureusement, tu es parti pour le royaume
éternel pendant la réalisation de ce travail.
Reçois également ma profonde reconnaissance.
Papa, que ton âme
Repose en paix !



Que la terre vous soit légère et que l'Eternel vous accepte dans son royaume. Amen !!!

Martin S. NOUKOUSSI 2022

REMERCIEMENTS

Avant tout propos, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude au Père céleste, le Saint d'Israël, qui nous comble de sa bénédiction, de son amour, de sa grâce et de sa joie ineffable, tous les jours de notre vie. Honneur, magnificence et gloire à son Nom au plus haut des cieux. Père, Dieu trois fois Saint, accepte nos remerciements. Amen !!!
Profonde reconnaissance et remerciements chaleureux :

☞ **A l'endroit de ma tante, Adama TAÏROU**, pour toutes ses prières, son soutien moral et financier, ses efforts consentis avec dévouement à mon égard durant mon cursus universitaire. Que l'Éternel t'accorde la longévité afin que tu puisses bénéficier des moissons de ta semence. Merci ma très chère tante.

☞**Au Docteur Waris K. CHOUTI**, Maître de Conférences des Universités du CAMES. Veuillez recevoir ici, ma profonde reconnaissance pour votre disponibilité, vos suggestions et recommandations. Elles ont été de précieuses pistes qui ont conduit ce travail. Que Dieu vous comble de sa grâce et vous accorde la longévité, la paix, la prospérité et le succès dans toutes vos entreprises.

☞**Au Docteur Guevara NONVIHO**, Maître Assistant des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur à l'ENSET-Lokossa. Veuillez recevoir ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements pour votre disponibilité, vos suggestions et recommandations pour l'amélioration de la qualité de ce travail. Que l'Éternel des armées, le Dieu tout-puissant vous comble de sa grâce et vous accorde la longévité, la paix, la prospérité et le succès dans toutes vos entreprises.

☞**Au Docteur Fernand R. AVAHOUNLIN**, Maître Assistant des Universités du CAMES, enseignant à l'ENS de Natitingou. Vos conseils et orientations ont enrichi et éclairé ce travail. Veuillez recevoir ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements. Que l'Éternel des armées, le Dieu tout-puissant vous comble de sa grâce et vous accorde la longévité, la paix, la prospérité et le succès dans toutes vos entreprises.

☞Mes sincères remerciements vont également à l'endroit du **Docteur Nafiou E. CHITOU** pour sa précieuse aide, surtout pour la phase de l'échantillonnage et des analyses réalisées au laboratoire. Ses conseils, sa disponibilité malgré ses multiples occupations ne m'ont pas fait

défaut. Je lui réitère mes profondes reconnaissances. Que Dieu le bénisse et l'accompagne pour la suite de ses recherches et projets.

☞**Au Professeur Christophe KAKI**, professeur de géologie à la FAST/UAC pour son soutien et conseil qui m'ont orienté vers cette formation. Veuillez recevoir ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements. Que l'Éternel des armées, le Dieu tout-puissant vous comble de sa grâce et vous accorde la longévité, la paix, la prospérité et le succès dans toutes vos entreprises.

☞**Au Professeur Daouda MAMA**, Directeur de l'Institut National de l'Eau.

☞**Au Docteur Flavien DOVONOU**, Chef du Département Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau de l'Institut National de l'Eau.

☞**Au Docteur Abdoukarim ALASSANE**, Coordonnateur des masters en Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau de l'Institut National de l'Eau.

☞**Aux honorables membres du jury** qui ont voulu sacrifier leur temps pour apprécier ce travail.

☞**Au personnel administratif** de l'Institut National de l'Eau ;

☞**A tous les enseignants de l'Institut National de l'Eau**, en particulier ceux qui interviennent dans notre formation, pour la qualité des enseignements dispensés.

Une pensée particulière à l'endroit de :

☞**A** mon meilleur ami et frère **KASSA Y. Jean-Baptiste**, Chef service Mines à Parakou pour tout son soutien et ses conseils. Que Dieu le bénisse et l'accompagne dans ses projets.

☞**A Akim ABOUBAKARI**, pour sa précieuse aide. Que Dieu le bénisse et l'accompagne dans ses projets.

☞A monsieur **Loya Séidou**, pour son soutien durant cette formation.

☞ A mes amis d'enfance **Firmin SEGNAKA et Parfait OFFIO**.

☞Madame **Falidatou KISSIRA** pour son soutien moral et financier durant les années de formations.

☞**A mes camarades de salles de la promotion 2020-2022** pour leurs solidarités. Recevez ici toute ma profonde gratitude.

RESUME

La présente étude porte sur la pollution des sols cultivés autour du lac Toho, soumis à une forte pression anthropique. L'échantillonnage des sols et des ruisseaux, autour du lac, a été effectué sur 9 sites se retrouvant principalement dans les champs cultivés. Différents paramètres physico-chimiques (pH, température, humidité, matière organique, conductivité, granulométrie, carbone organique, inorganique), teneur en phosphore total et éléments traces métalliques ont été déterminés sur ces échantillons. Le dosage du phosphore total a été déterminé avec un spectrophotomètre de marque AXIOM vis Spectrophotomètre 721 (D) à une fréquence de 708 nm. Celui des Éléments Traces Métalliques (ETM) dans les sédiments et eaux de ruisseaux a été effectué par la méthode APA 3500. Les ETM analysés sur les sédiments et les eaux sont au nombre de dix : Pb ; Cd ; Cu ; Zn ; Fe ; Mn ; Ni ; As ; Cr et Hg. Les résultats granulométriques ont révélé que les sols cultivés autour du lac sont la plupart sableux et argileux. La présence en faibles concentrations (< 5 mg/ Kg) de quelques ETM a également été révélée que ces sites sont moins pollués. Sur le plan physicochimique, les valeurs de pH enregistrées sont hors norme [6.6 - 7.2] et atteignent 7.89. Les résultats liés au phosphore ont aussi révélé de fortes teneurs (44 000 µg/kg). Ces résultats sont en accord avec le dépouillement d'une enquête pré-échantillonnage qui a révélé le fort usage d'engrais phosphatés laissant entrevoir la possibilité de lessivage vers les eaux de surface du lac Toho. Le fer prédomine parmi les ETM analysés (2.8 mg/Kg).

Mots-clés : Phosphore, pollution des sols, pollution des eaux, ETM, lac Toho

ABSTRACT

The present study focuses on the pollution of cultivated soils around Lake Toho, which is subject to high anthropogenic pressure. Sampling of soils and streams around the lake was carried out at 9 sites mainly in cultivated fields. Various physico-chemical parameters (pH, temperature, humidity, organic matter, conductivity, granulometry, organic, inorganic and total carbon), total phosphorus content and trace metal elements were determined on these samples. The determination of total phosphorus was carried out with an AXIOM vis Spectrophotometer 721 (D) at a frequency of 708 nm. The determination of Trace Metal Elements (TMEs) in sediments and stream water was carried out using the APA 3500 method. Ten MTEs were analysed in the sediments and water: Pb; Cd; Cu; Zn; Fe; Mn; Ni; As; Cr and Hg. The granulometric results revealed that the cultivated soils around the lake are mostly sandy and clayey. The presence in low concentrations (< 5 mg/ Kg) of some TMEs was also revealed that these sites are less polluted. In terms of physico chemistry, the pH values recorded are outside the norm [6.6 - 7.2] and reach 7.89. The results for phosphorus also revealed high levels (44,000 µg/kg). These results are consistent with a pre-sampling survey that revealed the heavy use of phosphate fertilisers, suggesting the possibility of leaching to the surface waters of Lake Toho. Iron predominates among the TMEs analysed (2.8 mg/Kg).

Keywords: Phosphorus, soil pollution, water pollution, TME, Lake Toho

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS ii
RESUME iv
SOMMAIRE v
LISTE DES FIGURES vii
LISTE DES PHOTOS viii
LISTE DES TABLEAUX ix
LISTE DES ACRONYMES x
INTRODUCTION GÉNÉRALE 1
CHAPITRE 1 **:** 5
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE 5
1.1. Introduction 6
1.2. Généralité sur le phosphore dans l'environnement 7
1.3. États du phosphore dans le sol 7
1.4. Les sources anthropiques de phosphore 8
1.5. Comportement du phosphore dans le sol et sa biodisponibilité 9
1.6. Généralités sur les éléments traces métalliques (ETM) 11
1.7. Importance du facteur lithographique sur la présence des ETM 11
1.9. Facteurs d'accumulation des ETM dans les sols 14
2. Comportement des ETM dans le sol 15
3. Toxicologie des ETM 16
4. Écotoxicité des ETM 17
***5.* Typologie des sols et sols ultramafiques** 18
5.1. Sols limoneux 21
5.2. Sols argileux 22
5.3. Sols ferrallitiques ferriques 22
5.4. Sols hydromorphes 23
5.5. Mangroves 24
6. Variabilités d'un type de sols à un autre 24
Conclusion 25
CHAPITRE 2 : 26
CADRE D'ÉTUDE, MATÉRIEL ET MÉTHODE 26
2-CADRE D'ÉTUDE 27
2.1. Travaux de terrain 27
2.2. Situation géographique 28
2.3. Climat et hydrographie 29
2.4. Sols et végétations 30

2.5. Géomorphologie et géologie 31
2.6. Quelques aspects socio-économiques 32
2.8. Matériel de terrain 34
2.9. Matériel de laboratoire 36
3. Méthode d'échantillonnage 37
3.1. Échantillonnage du sol 37
3.2. Point d'échantillonnage de l'eau de ruisseau 37
3.3. Analyse des échantillons de sol 38
3.4. Méthode d'analyse au laboratoire 39
3.5. Analyses statistiques et traitement des données 43
CHAPITRE 3 : 45
RÉSULTATS ET DISCUSSION 45
4. RÉSULTATS 46
4.1. Résultats de l'analyse physico-chimique des sols et l'eau de ruisseaux 46
4.2. Résultats des teneurs en ETM des sols cultivés et des eaux de ruisseaux autour du lac Toho 53
4.3. Étude comparative des ETM 59
4.4. Résultats d'analyse des teneurs en ETM des eaux de ruisseaux autour du lac Toho 60
4.5. Résultats des analyses en composantes principales (ACP) 60
5. DISCUSSION 64
CONCLUSION 68
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 70
Table des matières 78

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les relations entre les différentes formes de phosphore dans le sol illustré [22]..... 10
Figure 2: Structure des argiles phyllosilicates tiré [36]..... 12
Figure 3 : Fonctions de quelques éléments traces dans l'organisme [39] 13
Figure 4 : Biodisponibilité des ETM dans le sol [60]..... 16
Figure 5 : Le sol une interface dans l'environnement [36] 19
Figure 6 : Les différentes catégories de sols au Bénin[78]..... 21
Figure 7 : Carte de la situation géographique de la zone d'études..... 29
Figure 8 : Localisation des sites de prélèvements des échantillons de sol 34
Figure 10 : Variation de température du sol des sites échantillonnés 47
Figure 14 : Variation de la conductivité électrique des sols échantillonnés..... 50
Figure 18 : Différentes fractions du sol..... 52
Figure 19 : Variation de la teneur en phosphore total du sol..... 53
Figure 20 : Variation du plomb 54
Figure 21 : Variation du chrome 54
Figure 22 : Variation du mercure 55
Figure 23 : Variation du Cadmium..... 55
Figure 24 : Variation du nickel..... 56
Figure 25 : Variation de l'arsenic..... 56
Figure 26 : Variation du manganèse..... 57
Figure 27 : Variation de cuivre..... 58
Figure 28 : Variation de zinc..... 58
Figure 29 : Variation de fer 59
Figure 30 : Analyse comparative des ETM..... 60
Figure 31 : Variation des teneurs en ETM dans les ruisseaux autour du lac Toho 60
Figure 32 : Cercle de corrélation montrant la répartition des éléments traces métalliques..... 61
Figure 33 : Répartition des sites d'échantillonnage sur le graphe factoriel..... 62
Analyse en composante principale entre les différents paramètres..... 62
Figure 34 : Corrélations entre variables et facteurs, la projection des variables dans l'espace des Composantes F1 et F2. 63
Figure 35 : Répartition de différents paramètres des sites d'échantillonnés sur le graphe factoriel 64

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Echantillonnage de sol 28
Photo 3 : GPS 35
Photo 2: Tarière 35
Photo 5 : pH mètre 36
Photo 4 : Balance de précision 36
Photo 6 : Prélèvement d'eaux de ruisseau 38
Photo 7 : Broyage d'un échantillon de sol séché 38
Photo 8 : Echantillon de sol prélevé 38
Photo 9 : Appareil bioblock de type Rotap 42
Photo 10 : Vis spectrophotomètre 721 (D) de marque AXIOM 42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Effet de certains ETM sur la santé [47] 17
Tableau II : Classification des sols au japon 19
Tableau III : Aperçu des groupes de sols de référence WRB, classés par les conditions environnementales (Tiré de [85]) 20
Tableau IV : Sites d'échantillonnages de la zone d'étude 33
Tableau V : Les matériels de terrain 35
Tableau VI : Les matériels du laboratoire 36
Tableau VII : Sites de prélèvement des eaux 37

LISTE DES ACRONYMES

ACP : Analyse en Composante Principale

ATP : Adénosine Triphosphate

As : Arsenic

BRM : Base de Référence Mondiale

CE : Conductivité Electrique

Cd : Cadmium

CT : Carbone Total

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

ETM : Éléments Traces Métalliques

FAST : Faculté des Sciences et Techniques

Fe : Fer

GPS : Global Positionning System

Hg : Mercure

LACIE : Laboratoire de Chimie Inorganique et de l'Environnement

Mn : Manganèse

MO : Matière Organique

Ni : Nickel

Pb : Plomb

P : Phosphore

pH : Potentiel Hydrogène

T°C : Température en degré Celsius

Zn : Zinc

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le Bénin dispose d'un important réseau hydrographique sur l'ensemble de son territoire. Ce réseau est constitué de nombreux cours d'eau, de lacs et de lagunes [1]. Autour de ces cours d'eau se pratiquent diverses activités par les populations riveraines comme l'agriculture intensive et la pêche [2]. Ces activités humaines modifient le paysage avec des répercussions directes sur l'occupation du sol (régression des formations naturelles au profit des formations anthropiques et comblement des cours d'eau). Les changements générés par cette dynamique impactent négativement l'équilibre écologique du paysage [3] et induisent un dérèglement des écosystèmes. En vue du développement durable, il urge d'identifier les facteurs néfastes de ces occupations de sols et de formuler des solutions de remédiation.

Le lac Toho, situé au sud-ouest du Bénin, est un cas patent de ressource hydrologique, fortement anthropisée. En mai 2018, un événement majeur a attiré beaucoup d'attentions sur ce lac. Des quantités importantes de poissons morts ont jonché la surface du lac [4] . À ce jour, les raisons de cet incident demeurent toujours floues. Et pourtant, de nombreuses études ont prouvé qu'une contamination aux éléments traces métalliques (ETM) pourrait être néfaste pour la vie aquatique [5]. Les ETM se concentrent au niveau de la tête, du tronc, de l'intestin et auraient des altérations significatives sur les branchies des poissons [6]. Dans les espaces environnants du lac Toho et pour la fertilisation des sols, les personnels agricoles font usage d'engrais chimiques afin d'améliorer le rendement agricole. La fertilisation excessive des sols pourrait être une source potentielle de contamination des eaux de surfaces et même des eaux souterraines par les éléments traces métalliques.

Les ETM se lient principalement aux particules sédimentaires et peuvent s'accumuler dans les sols et sédiments, générant une pollution par bioaccumulation [7]. Ces éléments sont devenus une préoccupation mondiale à cause de leur résistance à la biodégradation, de leur toxicité et de leur capacité à migrer dans les différentes chaînes alimentaires. De même, la mauvaise gestion des déchets solides et liquides autour de ces plans d'eau dus à l'augmentation de la croissance démographique des populations riveraines contribue aussi à l'enrichissement de ces milieux en polluants et autres éléments indésirables ou potentiellement dangereux pour la santé comme le phosphore. Dans une vision de préservation de ces écosystèmes et le bien-être sanitaire des populations, il est nécessaire de faire un état des lieux de la distribution du phosphore et des métaux traces dans les sols cultivés autour du lac Toho.

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE D'ÉTUDE

L'eau est une ressource indispensable à la vie humaine, animale et végétale. Elle intervient dans toutes les activités humaines et dans le développement socio-économique de tout pays [8]. En Afrique de l'Ouest, la diminution des précipitations, la dégradation de l'environnement et la croissance démographique assèchent les ressources en eau [9]. Cependant, l'exploitation de ces ressources reste, le plus souvent, sans retombées économiques sensibles pour la population locale et constitue de plus une source de dégradation de l'environnement, mettant en danger certains patrimoines vitaux (sols, eaux, végétation…, etc.) [10]. Dans les zones rurales, l'usage massif des fertilisants et des pesticides représente les principales sources de contamination en éléments traces métalliques pour les milieux aquatiques [[11] ; [12]]. Les travaux réalisés sur l'eau, les sédiments et les poissons du lac Toho par Gbaguidi, 2018 et Kple, 2008 [13] et [14] ; ont montré que ce lac est pollué par le phosphore (2,06 mg/L) et les éléments traces métalliques à savoir le plomb (60,75 mg/kg), le cadmium (7 mg/kg), le cuivre (2100 mg/kg), le zinc (340 mg/kg) Etc.

De même, une étude portant sur la qualité des eaux lagunaires a mis en évidence une corrélation entre les activités anthropiques et l'augmentation des teneurs en nutriments et en éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux et les sédiments [15]. Ces études relatives aux conséquences de la pollution des eaux de surfaces du lac Toho par les activités anthropiques laissent entrevoir une incertitude croissante sur la disponibilité des écosystèmes aquatiques. Un intérêt croissant est donc porté sur les sols cultivés autour du lac qui sont souvent objet d'une gestion optimale. Dans le cadre de notre travail, nous comptons déterminer les paramètres physico-chimiques du sol et des ruisseaux d'eau autour du lac Toho. Ceci permettra de voir la teneur en polluants (phosphores et ETM) et leur distribution spatiale autour du lac Toho. Une telle étude des polluants autour du lac pourra permettre d'anticiper la pollution du lac. Il est reconnu qu'en saison pluvieuse, les polluants pourraient être lessivés. Nous allons également suivre la distribution verticale du phosphore total et des ETM à une profondeur de 90 cm du sol sur chaque 30 cm pour voir leur sens de migration qui permettra d'entrevoir la possibilité d'une migration des polluants en direction des eaux souterraines.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

De façon générale ce travail vise à évaluer la pollution chimique des sols cultivés autour du lac Toho.

De façon spécifique, il s'agit de :

- Déterminer les paramètres physico-chimiques des sols cultivés et eaux des ruisseaux autour du lac Toho ;
- Évaluer le degré de pollution aux phosphores et aux ETM des sols cultivés autour du lac Toho ;
- Analyser l'impact de cette pollution sur le lac Toho et sur ses ressources.

HYPOTHÈSES

Pour atteindre les objectifs de cette étude, les hypothèses suivantes sont émises :

Hypothèse 1 : Les paramètres physico-chimiques des eaux de ruisseaux et des sols autour du lac Toho ne respectent pas les normes requises.

Hypothèse 2 : Les sols cultivés autour du lac Toho sont contaminés par de fortes teneurs en phosphores.

Hypothèse 3 : Les fortes teneurs en phosphore et en ETM ont des conséquences directes sur le lac Toho.

Le présent travail est structuré en trois (3) chapitres :

le premier fait part de la synthèse bibliographique ;

le second présente le cadre d'étude, matériel et la méthodologie adoptée ;

et le troisième expose les résultats et discussions.

CHAPITRE 1 :
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

Les engrais sont des produits riches en éléments nutritifs, apportés aux sols pour renforcer leur vitalité et la bonne productivité des plantes. Le phosphore est l'un des nutriments indispensables à la croissance des végétaux. Considéré comme éléments majeurs ou macroéléments, le phosphore en quantité importante dans le sol joue un rôle déterminant dans le transfert d'énergie. La fertilisation phosphatée a toujours posé des problèmes importants car il est soumis à diverses contraintes physico-chimiques dans le sol. Ces derniers dans l'environnement impactent sur la qualité des ressources. Il convient donc d'identifier l'importance de ces contraintes et les méthodes nécessaires adéquates d'une utilisation rationnelle des engrais phosphatés.

Les éléments traces métalliques qui se trouvent dans l'environnement par les activités humaines ne subissent aucune dégradation microbienne ou chimique, et peuvent donc persister dans les sols longtemps après leur libération [16]. Puisqu'ils ne peuvent être ni dégradés ni détruits, les éléments traces métalliques tendent à s'accumuler particulièrement dans les sols, à y migrer et à se transférer dans les eaux et dans les organismes vivants, dont les plantes [17]. Ainsi, ils sont en mouvement entre tous les compartiments environnementaux influencés par certaines conditions du milieu. Ces éléments traces métalliques lorsqu'ils atteignent un certain seuil deviennent toxiques pour les sols et l'homme. La contamination par les métaux traces ruine l'équilibre de l'écosystème, dégrade les propriétés du sol, affecte la productivité agricole et nuit à la santé humaine par exposition directe ou en pénétrant dans le réseau trophique [18] ; [19].

Cette revue bibliographique a deux objectifs principaux : le premier, consiste à comprendre le déterminisme des teneurs totales en phosphore dans les sols cultivés et les relations entre ces teneurs et les activités humaines. En effet, il s'agira d'étudier les impacts de fortes concentrations dans les écosystèmes et les différentes formes sous lesquelles le phosphore peut se retrouver dans l'environnement. Son deuxième objectif sera d'apprécier les teneurs des sols cultivés en éléments traces métalliques et permettre d'estimer le degré de la contamination des sols en tenant compte de leurs natures et leurs impacts sur les écosystèmes.

1.2. Généralité sur le phosphore dans l'environnement

Le phosphore (P) est une molécule indispensable à la vie, car il se retrouve dans des molécules essentielles telles que les acides nucléiques où il assure la liaison entre les nucléotides ou encore dans la composition de l'ATP (adénosine triphosphate), molécule qui assure le rôle de transporteur d'énergie dans le monde vivant [19]. Pour la vie des végétaux, le phosphore est facteur limitant dans les sols et les eaux. De ce fait, il est fortement capté par la biomasse et joue un rôle clé dans le contrôle de la productivité des écosystèmes [20]. Il existe également dans la nature sous forme combinée dans un grand nombre de minéraux : phosphates et fluorophosphates d'aluminium, de calcium, de fer ou de manganèse. De même, le phosphore est un élément rare dans la biosphère, dont il ne constitue que 1% de la teneur totale. Et donc, il tend à devenir un facteur limitant primordial dans de nombreux écosystèmes aussi bien terrestres qu'aquatiques dont il conditionne la productivité [21]. On le rencontre dans les eaux de ruissellement et les sols, soit à l'état de sels minéraux, soit sous la forme de combinaisons avec la matière azotée du sol. De même, il est indispensable à la vie et intervient dans tous les processus essentiels de la synthèse de la matière et son importance dans la fertilisation des cultures peut être estimée à partir de son effet sur le rendement de la plante qui peut se manifester par le développement des organes de la plante [21]. Pour la plante, le phosphore constitue l'un des trois éléments majeurs indispensables à son alimentation et un facteur qui peut sérieusement limiter la production agricole, surtout dans les sols ferrallitiques [21]. Les prélèvements de phosphore par les plantes entrainent un épuisement des formes solubles. À part la quantité de phosphore obtenue par l'apport des engrais phosphatés dans le sol, la quantité présente dans le sol est une conséquence directe de la richesse de la roche mère [19].

1.3. États du phosphore dans le sol

Le phosphore existe sous deux formes principales dans le sol (minérale et organique) et qui se répartissent dans deux phases (solution du sol et phase particulaire ou phase solide du sol). Ces deux combinés constituent le phosphore total dont seulement une partie est assimilable par les plantes. La quantité de phosphore présente dans un sol est donc la conséquence de la richesse de la roche mère [20]. Les sols issus de roches ignées sont plus riches en phosphore total que les sols issus de roches sédimentaires [21]. Le phosphore minéral quant à lui se trouve essentiellement sous forme de composés orthophosphates et il est souvent lié au fer, au calcium ou à l'aluminium [22]. Dans les sols ferrallitiques, les formes minérales du phosphore se trouvent dans les minéraux argileux comme la kaolinite, ou l'hématite, et aussi principalement sous forme d'oxyde et d'hydroxyde de fer dans la goethite et d'aluminium dans la gibbsite. Le phosphore est libéré par les minéraux primaires dans le sol lorsque le phosphate soluble réagit

initialement avec l'hydroxyde de fer ou d'aluminium [23]. Il est généralement plus abondant que le phosphore organique. Les organophosphorés peuvent provenir de déchets végétaux ou de micro-organismes du sol. Aussi, la fraction organique du phosphore varie largement suivant les types de sols et les pratiques agricoles puisqu'elle est habituellement comprise entre 20 et 80 % du phosphore total [23]. Le phosphore organique n'est pas assimilable par les plantes, mais il est utilisable par les cultures grâce à l'action des microorganismes responsable de la minéralisation de l'humus [22].

Dans la plupart des systèmes agricoles, l'application de P dans les sols est nécessaire pour assurer la productivité des plantes. Dans les sols acides à fort pouvoir de fixation de P, plus de 80% de P apportés sont immobilisés dans la fraction non labile et ne sont plus disponibles dans l'année qui suit l'apport de l'engrais [23]. Ces formes de P ne peuvent pas être prélevées par les plantes à cause des processus d'adsorption, de précipitation ou bien de conversion sous forme organique. Le phosphore inorganique contient 170 formes minérales dans le sol [24]. Ainsi, dans le contexte des terres labourées de longue date des régions tempérées, la teneur en phosphore organique est de l'ordre de 20% du phosphore total. La variation interannuelle de cette teneur en P organique est d'ailleurs stable sur le long terme [25].

1.4. Les sources anthropiques de phosphore

Au début des années 1960, la fertilité de certains sols agricoles a dû être améliorée afin d'augmenter leur productivité. En conséquence, ces sols sont riches en phosphore et supérieur à la quantité de phosphore extrait que récolté. Ainsi , dans de nombreux sols agricoles des niveaux de phosphore élevés, voire critiques dans certaines régions sont observés [26]. De même, l'accroissement des stocks de P mesurés dans la zone racinaire des sols, notamment dans les zones d'élevage intensif, a été mis en relation avec d'autres types de transferts, se développant aussi en prairies [27]. Les sources peuvent être diffuses ou ponctuelles. Ainsi, les sources de dispersion, notamment agricoles, sont soit une composante majeure des flux déterminant l'eutrophisation, soit une perspective inquiétante. Ils sont généralement considérés comme des obstacles majeurs à la restauration des écosystèmes aquatiques [28]. À l'état naturel, le phosphore se trouve sur Terre à partir de 5 sources majeures : les roches, le sol, la biosphère, les eaux continentales et l'eau de mer (y compris les sédiments). En l'absence d'apport humain, le phosphore du sol provient de l'altération des roches, notamment de la dissolution de l'apatite. De même, les apports en phosphores ont trois grandes origines : industrielle, domestique et agricole. Les apports d'origine industrielle sont dus surtout aux industries agroalimentaires, mais aussi aux laveries industrielles, aux fabricants d'engrais et à quelques industries chimiques.

La source ponctuelle a une origine bien localisée dans l'espace et est transmise indépendamment des périodes de ruissellement, au rythme des activités humaines .Les apports d'origines domestiques sont liés essentiellement au métabolisme et à l'utilisation de détergents contenant des tripolyphosphates [28]. Les sources de diffusion sont un problème épineux en raison de la complexité des structures et des processus impliqués. Ils se caractérisent par le transfert de phosphore du sol vers le réseau hydrologique par le ruissellement de surface pendant la saison des pluies [28]. La lutte contre le phosphore diffus s'est longtemps appuyée sur des codes de bonnes pratiques visant à contrôler l'érosion des sols, phénomène considéré comme le principal moteur du transport du phosphore. En général, la majeure partie du phosphore dans un milieu hydrostatique provient de son bassin versant. Le sort de ces derniers varie selon les propriétés du milieu récepteur et les propriétés du P-total transféré [29].

1.5. Comportement du phosphore dans le sol et sa biodisponibilité

1.5.1. Dans le sol

Dans les sols, le phosphore est associé aux particules de sols (phosphore particulaire). Il est aussi présent sous forme soluble (phosphore soluble) dans la solution du sol, en faible quantité. Les mécanismes d'échanges de phosphore entre la phase solide et la solution sont nombreux. Ces mécanismes sont selon [30]: - L'adsorption - La désorption - La précipitation -et la dissolution.

La nutrition phosphatée est assurée par l'ensemble des ions phosphates de la solution du sol [31].Dans le sol, la teneur en P est de l'ordre de 0.02 à 3% alors que dans les végétaux elles varient de 0.1 à 0.4%, le phosphore contenu dans les végétaux provient essentiellement du sol. Dans la grande majorité des cas, l'analyse du statut phosphaté d'un sol est destinée à évaluer le phosphore biodisponible, fraction du phosphore total du sol susceptible d'être prélevé par les végétaux [23]. Dans le sol, la biodisponibilité du phosphore est influencée par différents facteurs, à savoir l'humidité du sol, taux de matière organique, taux d'argile, pH de la solution du sol et le taux du calcaire ; ce dernier influe sur le pH du sol qui influe à son tour sur l'assimilation du phosphore [22]. Pour le système cultivé, le phosphore apporté au sol subit de multiples transformations et passe entre les différents compartiments minéraux, organiques et microbiens. Seule une petite fraction du phosphore présent dans le sol est susceptible d'être absorbée par les racines et participer à la nutrition des cultures [23]. La disponibilité du phosphore minérale dans le sol dépend des éléments auxquels il est associé. Les recherches ont permis de déterminer que le niveau d'aluminium (Al)et de fer (Fe) des sols était un bon

indicateur pour estimer cette disponibilité (ou la capacité de fixation en phosphore des sols). Plus l'aluminium est élevé, moins le phosphore minéral sera disponible.

1.5.2. Dans l'eau

- **Les formes du phosphore dans l'eau**

La diversité des formes de phosphore dans l'eau conduit à une distinction simplifiée entre phosphore soluble et matière particulaire [32]. Le phosphore soluble (P-soluble) quand il n'est pas retenu par un filtre dont les pores ont une taille de 0,45 µm. Essentiellement, le phosphore soluble est constitué d'ions phosphate ou orthophosphate, qui peuvent être absorbés par les plantes et participer directement à l'eutrophisation des eaux du réseau hydrologique. Le phosphore soluble est également présent dans la solution du sol, mais en faible quantité [32]. Le phosphore particulaire (> 0,45 µm) comprend toutes les formes de phosphore, minérales ou organiques, associées à des minéraux, détritus divers ou incorporés dans des organismes vivants. Le phosphore transporté par le ruissellement est principalement sous forme particulaire [32].

- **Relation entre les différentes formes de Phosphore**

Selon (Holford, 1997) [24], la dynamique du phosphore peut se définir comme étant le passage des ions phosphatés d'un état à un autre sous l'effet de différents mécanismes physico-chimiques et biologiques. Les relations entre les différentes formes de phosphore dans le sol se résument dans la figure 1 :

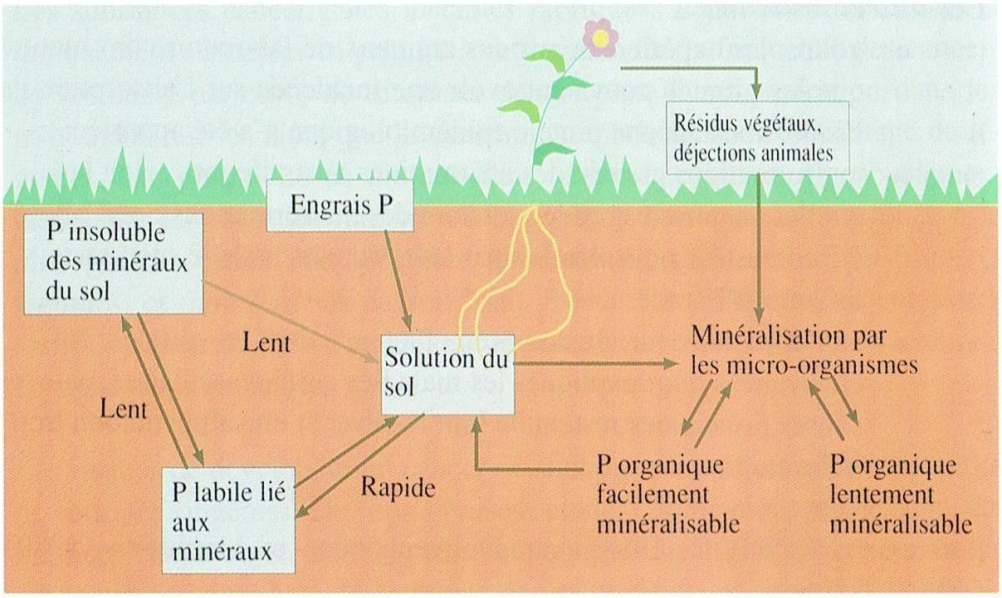


Figure 1 : Les relations entre les différentes formes de phosphore dans le sol illustré **[22]**.

Pour le système cultivé, le phosphore apporté au sol subit de multiples transformations et passe entre les différents compartiments minéraux, organiques et microbiens. Seule une petite fraction du phosphore présent dans le sol est susceptible d'être absorbée par les racines et participer à la nutrition des cultures. Cette fraction, souvent appelée phosphore biodisponible ou assimilable, est d'une importance capitale puisqu'elle conditionne la fertilité des sols [23]. Différents mécanismes que ce soit physique, chimique ou biologique peuvent exister dans le sol et peuvent être source de la dynamique des ions phosphates à l'interface sol-solution-plante. La libération de phosphore labile à partir des minéraux et de la matière organique du sol est très lente. Sa disponibilité prendra des semaines voire des mois. Ces taux de libération dépendent de nombreux facteurs ; dont l'acidité du sol en particulier joue un rôle important [22].

1.6. Généralités sur les éléments traces métalliques (ETM)

Le terme « ETM » a été adopté pour décrire tout élément métallique de densité relativement élevée pouvant être toxique pour les organismes vivants à faibles concentrations [33]. Ce n'est pourtant pas la densité, mais les caractéristiques chimiques des métaux traces qui ont le plus d'influence sur la détermination de leur toxicité. Les travaux de (Van Oort et *al*.,2007) [34] ont classé les métaux lourds tels que Hg, Ag et Pb dans la classe des éléments non essentiels et hautement toxiques. Les ETM peuvent être bioaccumulables puisqu'ils ne se dégradent pas dans un écosystème ou ne se métabolisent pas facilement. Pour cela, l'absorption des ETM par les plantes peut entrainer une accumulation à différents niveaux de la chaîne alimentaire [35]. La transformation des éléments traces métalliques dans les systèmes environnementaux naturels a attiré une attention considérable au cours des dernières décennies. Mais en milieu ultramafique, cela pose des risques pour les produits agricoles et, par extension, pour la santé humaine [36]. En effet, le terme ultramafique fait référence aux roches ignées ou métamorphiques contenant moins de 45 % en poids de silice (SiO2) [37]. Les concentrations extrêmement élevées d'ETM dans les sols ultramafiques peuvent poser des problèmes aux cultures agricoles, en raison du potentiel de bioaccumulation [38]a ; [38] b. Les éléments traces métalliques (ETM) sont des contaminants environnementaux dont la toxicité est une préoccupation de plus en plus croissante d'un point de vue écologique et nutritionnel [39] ; [40]. Il est donc nécessaire de connaitre les caractéristiques des différents sols et leurs interactions avec les éléments traces métalliques.

1.7. Importance du facteur lithographique sur la présence des ETM

La pollution atmosphérique générée par les activités industrielles retombe sur des sols sous différentes occupations et utilisations (agriculture, forêt, zones humides, urbanisées)[32]. Après l'incorporation des poussières métallifères dans l'horizon de surface, sous des conditions physico-chimiques du sol, les ETM sont progressivement libérés. Dispersés via la solution du sol, ils sont interceptés par différents constituants des sols en fonction de leurs affinités, à l'origine de microdistributions hétérogènes. Ainsi, au sein du fond matriciel dans l'horizon de surface, des particules et assemblages à fortes teneurs en ETM proche avec des zones de teneurs plus faibles. Le transfert vers la profondeur des sols dépend de la forme chimique des ETM, différentes pour chaque élément, ainsi que de la composition et des conditions physico-chimiques des sols [33]. Ces transferts sont étroitement liés au fonctionnement du sol et aux processus de pédogenèse [34]. Dans les horizons profonds, des accumulations d'ETM sont souvent préférentiellement localisées dans les traits pédologiques, notamment des revêtements argileux ou de manganèse [35]. Des relevés lithographiques réalisés montrent que les structures linéaires correspondent à des invaginations profondes de l'horizon argileux, encaissé dans des sables calcaires glauconieux. Les intervalles, à faible conductivité électrique, correspondent à des zones où le calcaire fragmenté apparaît proche de la surface, parfois directement sous l'horizon de labour.

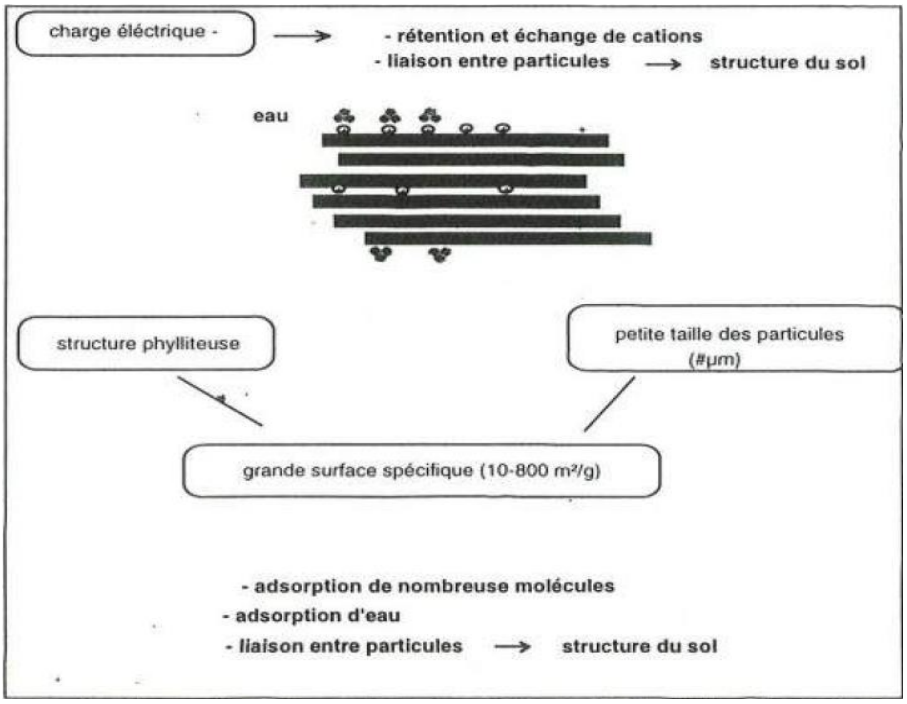


Figure 2: Structure des argiles phyllosilicates tiré **[36]**

La configuration particulière engendre des conditions hydrodynamiques contrastées avec un écoulement lent des eaux de drainage à travers les épais niveaux argileux invaginés, alors que

le drainage est favorisé au centre des polygones, là où les eaux sortant de l'horizon de labour percolent à travers le calcaire fragmenté.

1.8. Types d'éléments traces métalliques dans les sols et variabilités

L'évaluation des sols contaminés par des éléments traces métalliques (ETM) est délicate car les activités humaines perturbent la composition et l'organisation des sols. Selon [37] la variabilité de la composition, des minéraux sédimentaires du sol dépendent en partie de la teneur en éléments traces.

1.8.1. Types d'éléments traces métalliques

Les éléments traces métalliques sont généralement définis comme des métaux lourds.

Cependant, la classification des métaux lourds est souvent débattue car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement "lourds" (par exemple le zinc) et certains éléments toxiques ne sont pas des métaux, par exemple l'arsenic est un métalloïde. Pour ces différentes raisons, la dénomination « éléments traces métalliques » -ETM- ou par extension « éléments traces » est préférable aux métaux lourds [38].

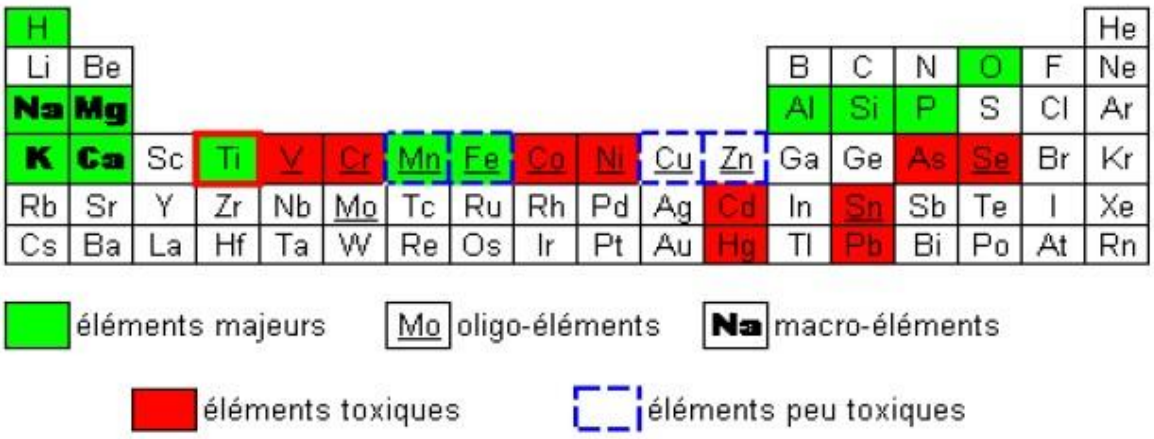


Figure 3 : Fonctions de quelques éléments traces dans l'organisme **[39]**

Les ETM sont tous des polluants, mais cela dépend de leur concentration dans le sol et surtout de leur forme chimique (spéciation). En effet, de nombreuses préoccupations sont liées aux ETM dans le monde puisqu'ils engendrent des risques sanitaires sur les écosystèmes et sur l'homme...[40]. C'est pourquoi la connaissance des paramètres physico-chimiques des éléments est nécessaire pour comprendre leur devenir dans l'environnement. Les ETM sont répartis dans différentes fractions du sol selon leur mobilité, le compartiment ultime étant représenté par la solution de sol [41]. Il existe 80 oligo-éléments qui constituent les éléments chimiques de la croûte continentale. Cependant, leur concentration est très faible, inférieure à 0,1 %, et ils ne

représentent dans leur ensemble que 0,6 % de la composition de la croûte terrestre[42]. De même, les métalloïdes tels que l'arsenic (As) et l'antimoine (Sb), qui présentent des propriétés physiques et chimiques intermédiaires entre un métal et un non-métal, sont présents en traces dans la croûte terrestre et peuvent être considérés comme toxiques en fonction de leur concentration. Bien que certains soient indispensables à différents processus biologiques et reconnus comme oligoéléments, notamment chez les végétaux et animaux, ils sont tous potentiellement polluants. Dans l'ensemble, la mobilité des ETM dans les différents composants diminue dans l'ordre suivant : échangeable > lié aux carbonates > lié aux oxydes de Fe et Mn > lié aux composés organiques et aux sulfures > résidus [43].

1.8.2. Variabilités diverses

L'étude des sols pollués par des éléments traces métalliques (ETM) révèle souvent des distributions hétérogènes des teneurs dans l'horizon de surface. Cette variabilité est présente à toutes les échelles d'étude et est principalement le résultat des activités anthropiques. Mais de nombreux travaux d'aménagement et de gestion du territoire peuvent perturber la composition et l'organisation des sols, en modifiant les distributions d'ETM [32]. De plus, la nature, l'occupation et l'utilisation du sol par l'homme, ainsi que la nature du sous-sol, peuvent également affecter l'écoulement et le transfert de ETM vers la profondeur [42] ; [44], [45]. Ainsi, au cours du temps, des proportions importantes des ETM mobiles, comme le cadmium (Cd) ou le zinc (Zn) peuvent quitter l'horizon de surface, alors que les éléments peu mobiles, comme le plomb (Pb), ont tendance à s'y accumuler relativement. Les teneurs en ETM d'un échantillon de sols et leurs associations avec les phases porteuses (spéciation) changent en fonction du moment de prélèvement. Aussi, leurs analyses renseignent seulement sur un état momentané de la pollution lors de l'échantillonnage. Selon (Daniels,1988) [46] en absence de connaissance des « liens de terrain » d'un échantillon, « un prélèvement de sol n'est qu'un tas de boue ».Ainsi, dans l'évaluation des risques des sols pollués, la stratégie d'échantillonnage des sols a une importance capitale.

Les teneurs en ETM peuvent être variables au sein d'un même sol, d'un horizon à un autre, et tout particulièrement dans le cas de sols à forte différenciation texturale et ce en dehors de toute contamination anthropique. Les teneurs en ETM sont en effet fortement corrélées aux teneurs en argile et en fer. Car les horizons profonds argileux ou argilo-sableux sont à la fois très riches en fer, mais très pauvres en nickel. On note de plus que tous les horizons éluviaux de cette même famille se séparent également du « noyau central » dans une gamme de faibles teneurs totales en fer.

1.9. Facteurs d'accumulation des ETM dans les sols

Les micropolluants inorganiques ou ETM sont naturellement présents dans les sols, sous une forme, le plus souvent, peu mobile, et à des teneurs très faibles [47]. Des études ont prouvé que les sols se comportent, généralement, comme des systèmes accumulateurs des ETM, et que la rétention ou la mobilisation d'un ETM dans le sol est fonction de plusieurs facteurs, lesquels diffèrent selon l'élément considéré et le type d'ETM. Comme ce comportement accumulateur des sols vis-à-vis des ETM est irréversible, lorsque ces ETM deviennent mobiles, ils peuvent présenter de sérieux dangers dans l'environnement. Les teneurs en ETM peuvent s'accroître dans les couches supérieures des sols du fait d'une utilisation de fertilisants (organiques, épandages de boues) ou de retombées atmosphériques en lien avec les activités anthropiques[48]. Les facteurs d'enrichissement permettent d'identifier les contaminations anthropiques par rapport aux teneurs naturelles présentes dans les sédiments[49]. Le plus fréquemment, les calculs de facteurs d'enrichissement s'effectuent avec l'aluminium qui est un élément conservatif avec une concentration qui n'est pas supposée variée avec la profondeur en milieu naturel [50]. Le plomb étant généralement considéré comme immobile dans le milieu naturel [51], il a tendance à s'accumuler dans les couches superficielles du sol. La valeur du pH est le facteur le plus influent sur la mobilité du plomb [52] et la solubilité diminue avec l'augmentation de la valeur du pH.

2. Comportement des ETM dans le sol

Dans l'environnement, les ETM peuvent provenir de l'altération des roches naturellement enrichies et/ou de sources anthropiques variées du fait de la capacité de rétention élevée du sol, qui sont un accumulateur des différentes pollutions découlant des nombreuses activités humaines dont il est le support La contamination des sols par des éléments traces métalliques (ETM) est une préoccupation environnementale majeure principalement en raison du risque de leur transfert vers les eaux de surface et souterraines et/ou la chaîne alimentaire. Plusieurs phénomènes sont impliqués dans la rétention des ETM : parmi eux, les processus d'adsorption, les plus importants, influencent le comportement et la biodisponibilité des métaux dans le sol [53]. Deux types d'adsorption sont généralement distingués : l'adsorption physique et l'adsorption chimique. La biodisponibilité d'un élément est dépendante de la spéciation chimique de l'élément en solution qui conditionne son interaction avec les organismes vivants et donc sa toxicité [54]. Les ETM peuvent précipiter en association avec des minéraux argileux, des oxydes de fer ou de manganèse ainsi qu'avec des carbonates de calcium [55]. Le pH du sol est considéré comme le principal facteur contrôlant la biodisponibilité des éléments traces métalliques dans le sol [56]. Un pH acide a tendance à favoriser la solubilité des ETM et accroît leur biodisponibilité tandis qu'à l'inverse un pH basique a tendance à diminuer leur mobilité.

Ceci dépend de la nature des ions et du potentiel redox [57]. La migration des ETM présents dans la solution du sol sera fonction des propriétés physiques des horizons (perméabilité, structure, cohésion, etc.) [58]. Le sol étant caractérisé et organisé par une succession d'horizons aux caractéristiques pédologiques et hydrodynamiques différentes, les éléments traces vont être mobilisés ou immobilisés dans chacun des horizons lors du transfert de l'eau dans le sol [48] . La migration des ETM est donc contrôlée par plusieurs facteurs tels que : les caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, potentiel redox) ; les propriétés intrinsèques de chaque horizon (texture, structure, cohésion…) ; et enfin par les flux d'eau et de leur dynamique [59].

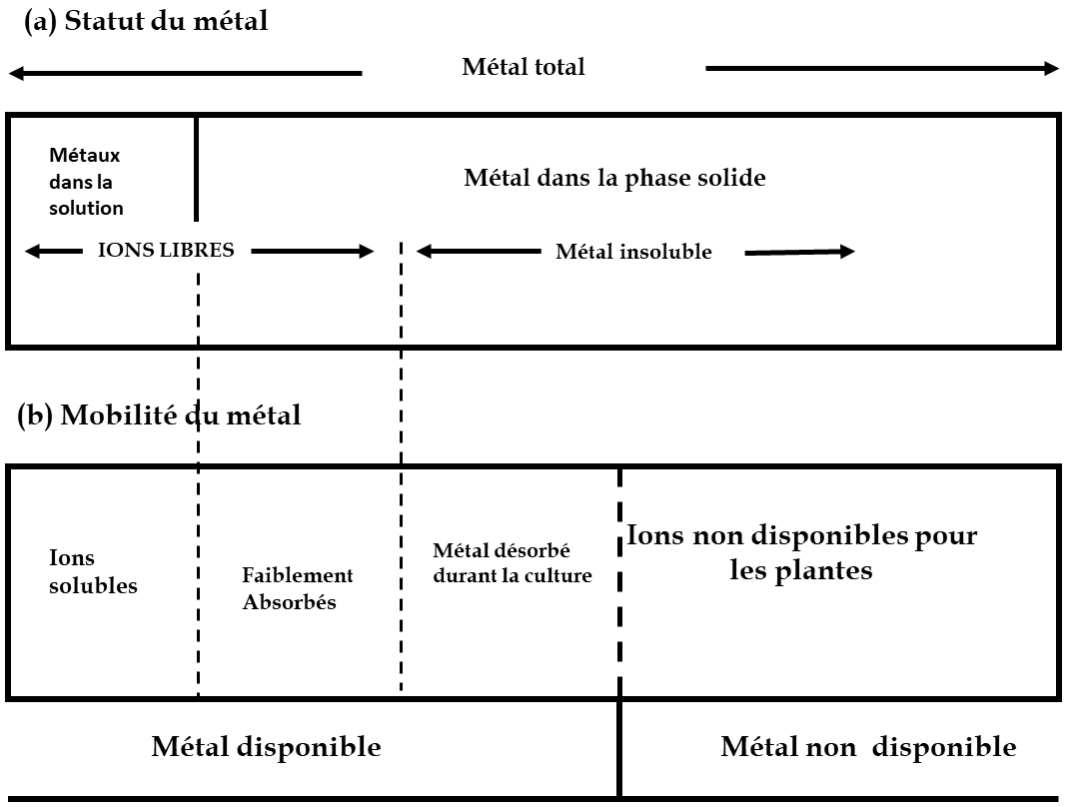


Figure 4 : Biodisponibilité des ETM dans le sol **[60]**

3. Toxicologie des ETM

Il est bien établi que les ETM comme le plomb (Pb), le mercure (Hg), le chrome (Cr), etc., et certains métalloïdes comme l'arsenic (As), le sélénium (Se) et l'antimoine (Sb) sont hautement toxiques pour l'homme même à l'état de traces (entre 10000 µg/Kg et 10 mg/Kg) [61] . Par conséquent, certains d'entre eux sont classés parmi les substances les plus dangereuses [62].

Des études antérieures ont également révélé qu'après une longue exposition à des sols contaminés, le système nerveux central humain serait affecté par le Pb, l'As et le Hg qui s'accumulaient dans les tissus adipeux [63]. De plus, il est pire qu'aucun traitement médical connu ne puisse inverser ces effets sur la santé [64]. Pour cela, à cause de leur toxicité, leur bioaccumulation et leur faible dégradabilité, certains ETM tels que Cd, Cr, As, Hg, Pb, Cu, Zn et Ni ont été répertoriés comme polluants de contrôle prioritaires par l'Agence américaine de protection de l'environnement [65]. Ces métaux traces peuvent résider dans les sols pendant de longues périodes et ont séquentiellement le potentiel d'endommager le microbiote, la flore et la faune une fois qu'ils ont été transformés en forme solide, en fractions ioniques ou par bio méthylation en fragments organométalliques [66].

4. Écotoxicité des ETM

L'écotoxicologie est généralement décrite comme « la science des contaminants dans la biosphère et de leurs effets sur les constituants de la biosphère, y compris les humains [67]. Les ETM sont considérés comme des polluants lorsqu'ils sont mobilisés et concentrés par les activités humaines dans des matrices qui peuvent causer des dommages environnementaux [68]. En effet, ils sont toxiques pour les organismes vivants mêmes à faible concentration pour certains éléments comme le cadmium. Ainsi, pour évaluer la toxicité des nombreux polluants présents dans l'environnement, la science utilise de multiples mesures d'exposition et paramètres d'effets [68].

Tableau I : Effet de certains ETM sur la santé animale **[39]**

Métaux	**Effets sur la santé animale**
Aluminium	Neurotoxique, soupçonné de jouer un rôle dans la maladie d'Alzheimer
Arsenic	Lésions cutanées, troubles digestifs, troubles de la reproduction, cancérogène avéré
Cadmium	Néphrotoxique, cancérigène avéré
Chrome (VI)	Maladie respiratoire, inflammation des muqueuses, ulcération, cancérigène prouvé.
Cuivre	Irritation des muqueuses respiratoires et oculaires, douleurs, douleurs épigastriques, maux de tête, nausées, étourdissements, vomissements, diarrhée, tachycardie
Mercure	Puissant neurotoxicité, toxicité pour la reproduction
Nickel	Nocif pour le système respiratoire et cancérigène avéré

Plomb	Neurotoxiques, responsable de saturnisme, troubles du développement cérébral, perturbation psychologiques et difficultés d'apprentissage scolaire chez les enfants peuvent être cancérigènes.

Sur certains sites pollués, à cause des activités humaines, les concentrations de certains ETM ont augmenté de plusieurs ordres de grandeur. Ceci est principalement dû à l'exploitation de mines et aux activités métallurgiques inhérentes, à l'incinération des déchets, à l'extraction et à la raffinerie de pétrole [68]. Par exemple, lors d'émission de particules de cadmium (Cd) dans l'atmosphère, celles-ci sont retenues et accumulées dans les sols et les plantes, elles peuvent alors se retrouver dans les écosystèmes terrestres[68]. Ainsi, le cadmium (Cd) biodisponible est principalement transféré le long des réseaux trophiques [69 ; 70]. t par ingestion de nourriture contaminée [68]. Des études en laboratoire et sur le terrain indiquent de multiples effets toxiques chez les mammifères : cécité, atteintes histopathologiques dans le foie et les reins, hémorragies, anorexie, anémie, réduction de la masse cérébrale, manque de coordination, convulsions, perte de motricité, hyperactivité, troubles du sommeil, effets sur la reproduction ainsi qu'une diminution de l'espérance de vie [69] ; [70].

5. Typologie des sols et sols ultramafiques

La formation du sol résulte et dépend de plusieurs facteurs de pédogenèse à savoir la nature du substrat géologique, le climat, la topographie, le temps et les différents agents biologiques. Le sol est une ressource non renouvelable et est soumis à plusieurs menaces [48]. C'est l'une des ressources naturelles les plus importantes et les plus précieuses pour l'homme, car la durabilité agricole et la civilisation de la société en dépendent énormément [71]. Le plus souvent, les sols varient en fonction de leur texture et de leur structure. Afin de déterminer la texture d'un sol par exemple, on peut simplement procéder par un test tactile ou par le test du bocal d'eau. En effet, un sol constitué majoritairement d'argile forme une boule que l'on tient dans la main, tandis que la terre faite de sable glisse entre les doigts. La texture du sol influence directement sa structure, sa teneur en nutriments, son humidité et sa capacité à drainer l'eau [72].

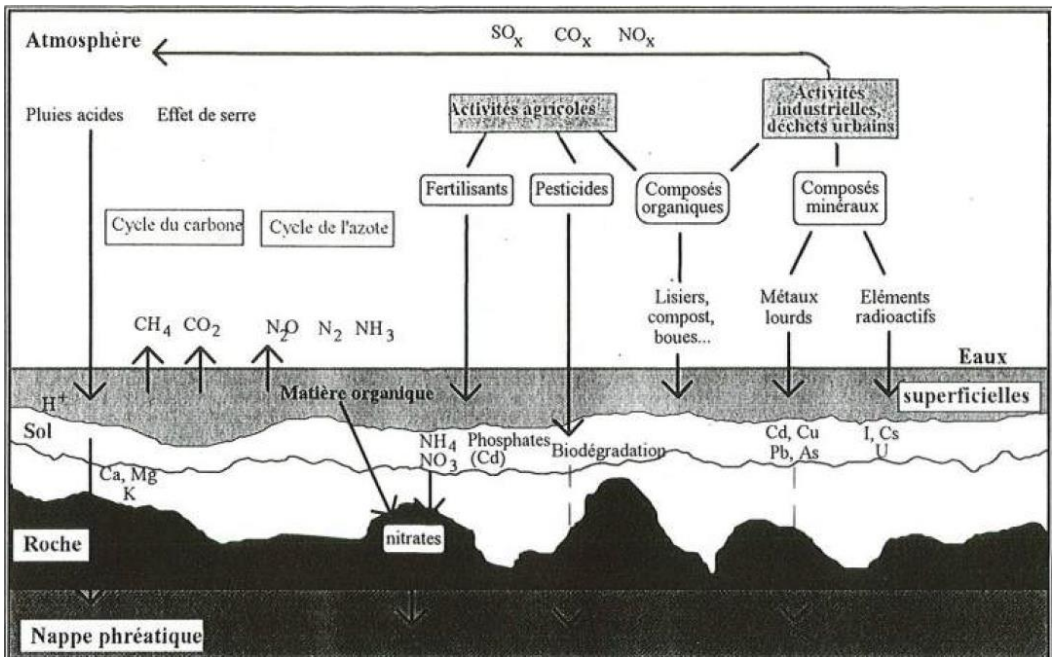


Figure 5 : Le sol une interface dans l'environnement **[36]**

Il existe un large éventail de types de sols classés dans le monde [73]. Selon les types, leurs propriétés chimiques montrent qu'ils ont des caractéristiques différentes [74]. De même, selon les études réalisées par [75], les sols sont classés en fonction des horizons, de leurs propriétés. D'après les recoupements faits, il existe 10 types de sols [75].

Tableau II : Classification des sols **[76]**

Système de classification des sols selon le premier rapprochement 2011	Base de référence mondiale pour les sols Ressources (2015)
Sols artificiels (type de sol A)	Technosols, Régosols
Sols organiques (type de sol B)	Histosols
Podzols (type de sol C)	Podzols
Andosols (type de sol D)	Andosols, Podzols
Sols rouge foncé (type de sol E)	Luvisols, Cambisols
Sols de basse altitude (type de sol F)	Fluvisols, Anthrosols
Sols rouge-jaune (type de sol G)	Alisols, Acrisols, Cambisols
Sols stagniques (type de sol H)	Gleysols, Stagnosols, Anthrosols
Sols forestiers bruns (type de sol I)	Camibisols, Stagnosols
Régosols (type de sol J)	Régosols, Arénosols, Leptosols
	Phéozems

Les différents types de sols qui figurent dans la base de référence mondiale (WRB) et classés suivant les conditions environnementales qui sont responsables des facteurs et des caractéristiques des sols.

Tableau III : Aperçu des groupes de sols de référence WRB, classés par les conditions environnementales **[77]**

Sols conditionnés par le relief	Sols conditionnés par le matériau parental	Sols des régions (semi-) arides	Sols des régions steppiques	Sols des régions tempérées	Sols des régions tropicales
Fluvisols	Arénosols	Calcisols	Kastanozems	Luvisols	Lixisols
Gleysols	Andosols	Durisols	Chernozems	Planosols	Acrisoles
Régosols	Vertisols	Gypsisols	Phaeozems	Albeluvisols	Alisols
Leptosols		Solonetz		Podzols	Nitisols
			Solonchaks		Ferralsols
					Plinthosols
Sols organiques	Sols d'âge limité		Sols des régions arctiques		
Histosols	Cambisols		Cryosols		
	Ombrisols				
Sols artificiels					
Anthrosols					

Au Bénin par exemple, il existe cinq catégories de sols dominants dont la genèse et l'évolution résultent de l'action conjuguée d'un certain nombre de facteurs tels que le climat, les formations végétales, les roches mères, l'altération, l'histoire géomorphologique et les actions anthropiques [77]. Ces sols se sont formés à partir des roches sédimentaires, du socle cristallin et des dépôts alluviaux. Les principaux types de sols sont : les sols ferrugineux tropicaux (65%) ; les sols peu évolués (20%) ; les sols ferrallitiques (10%) ; les sols hydromorphes (3%) et les vertisols (2%) [78].

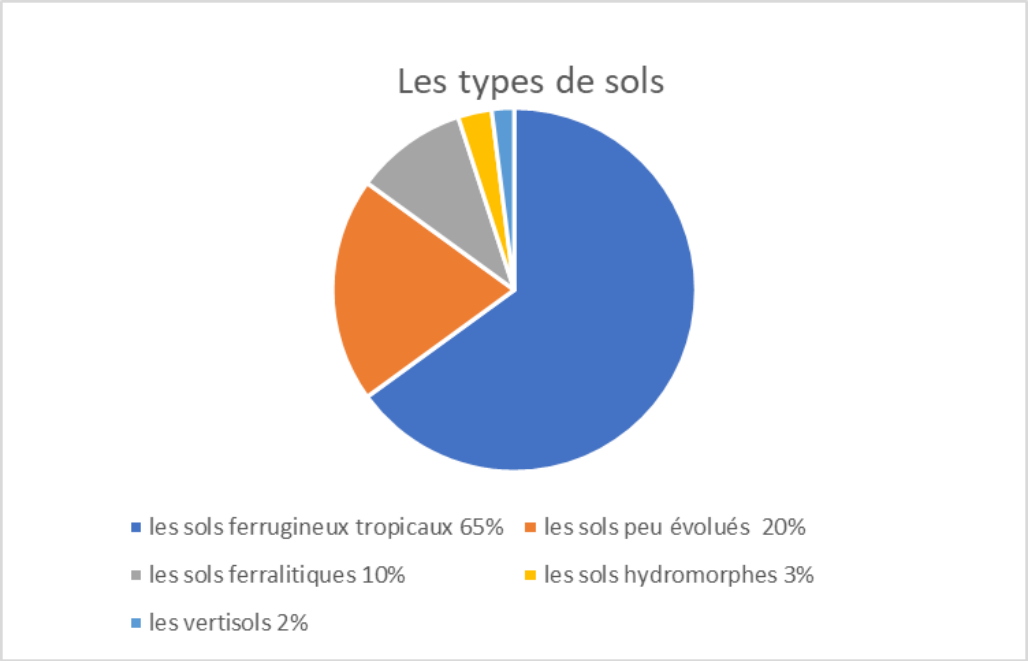


Figure 6 : Les différentes catégories de sols au Bénin**[78]**

A partir des analyses morphologiques et chimiques des profils, les sols primaires ont été rattachés à un référentiel global (BRM). Par conséquent, chaque classe de sols peut correspondre à plusieurs groupes de sols de la BRM, qui peuvent montrer les principales caractéristiques des sols du point de vue de l'évolution des sols. En général, les sols peuvent être divisés en quatre types principaux : sols limoneux ; sols argileux ; sols ferrallitiques ; sols hydromorphes. Ces différents types de sols sont importants selon le milieu dans lequel ils se trouvent.

5.1. Sols limoneux

Les zones limoneuses sont géologiquement caractérisées par des limons quaternaires qui recouvrent périodiquement le plateau, et le degré d'engorgement des sols est plus ou moins étroitement lié à la proximité de couches imperméables profondes (les argiles gréseuses sont le plus souvent des limons quaternaires). D'un point de vue structural, les sols limoneux sont constitués de particules relativement denses qui permettent à l'air et à l'eau de circuler plus ou moins facilement. La surface forme une croûte sèche qui limite la pénétration de l'eau tout en favorisant le ruissellement ; est très sensible à l'érosion hydrique, surtout sur les pentes raides. Le contexte pédogéologique général est celui de sédiments marins tertiaires et de limons lœssiques, à l'exclusion de toute zone fortement minéralisée. Les sols limoneux plus ou moins fortement lessivés comme pour les horizons argileux, de nombreuses relations utilisant plusieurs caractéristiques du sol ont été proposées dans la littérature [79]. Ainsi, pour les textures limoneuses, comme pour les textures argileuses, l'estimation des propriétés de

rétention en ETM sur la base de la seule texture du sol risque de conduire dans de nombreux cas à des valeurs très éloignées de la réalité compte tenu de la variabilité qui sont enregistrées.

5.2. Sols argileux

Les sols argileux sont constitués de minéraux argileux tels que les phyllosilicates issus de l'altération des minéraux primaires silicatés (feldspaths, micas, amphiboles, pyroxènes, etc.). La succession des couches et la distance qui sépare chaque feuillet (espace interfoliaire) caractérisent les grandes familles d'argiles minéralogiques :

- Les argiles de type 1 : une couche tétraédrique liée à une couche octaédrique (ex. : kaolinite, serpentine) ;
- Les argiles de type 2 : deux couches tétraédriques entourant une couche octaédrique (ex. : illites, vermiculites, smectites) ;
- Les argiles de type 2/1 : même structure que celle des argiles 2/1, mais l'espace interfoliaire est occupé par une couche octaédrique de brucite Mg (OH)2. Il s'agit des chlorites.

En fonction du pH du sol, les minéraux argileux possèdent globalement une charge de surface négative qui est due à deux phénomènes distincts. Le principal est indépendant des conditions physico-chimiques et est la conséquence des substitutions isomorphiques ayant eu lieu lors de la formation des feuillets de l'argile. Ainsi, la protonation de ces groupements hydroxyles dépend du pH. Lorsque le pH est inférieur (pH au point de charge nulle), la charge globale de surface de la phase considérée est positive. Au-delà de ce pH, la charge globale devient négative. L'adsorption des ETM ne peut pas avoir lieu avec un pH inférieur par voie électrostatique. Elle ne peut se faire que par interaction chimique en fournissant assez d'énergie pour s'affranchir de la force de répulsion générée par la charge de surface de la phase considérée et par celle du cation. Lorsque le pH est supérieur, la surface devient chargée négativement et crée un environnement électrostatique favorable à l'adsorption des cations présents dans la solution. Pour les argiles, l'ensemble de ces charges négatives situées sur les surfaces internes et externes et en bordure de feuillets représente autant de sites d'échange sur lesquels les cations métalliques vont pouvoir être adsorbés.

5.3. Sols ferrallitiques ferriques

Lorsque les nappes de péridotites qui sont des roches sont altérées, les péridotites forment de la latérite successivement jaune puis rouge [80] qui est riche en oxyde de fer. Cette altération de la latérite aboutit parfois à la formation d'une cuirasse sombre, représentative de beaucoup de

sols en milieu tropical humide. Les formations de péridotites ont donné des sols ferrallitiques ferriques, riches en Fer et Magnésium ; ils sont facilement lessivés par les pluies et sont carencés en éléments tels que le Calcium, le Potassium et le Phosphore[81]. Les caractéristiques de ces sols influencent la composition chimique des eaux de surface, qui sont qualifiées d'oligotrophes [82], mais aussi la végétation qui se développe dans cette région. Le sol formé de strates ultra-alcalines est dominé par les ferralitiques ferriques [83]. La capacité d'échange cationique de ces sols est limitée à la couche organique [84], car leur pH est habituellement acide et leur minéralogie est constituée essentiellement d'oxydes et d'hydroxydes de fer associés à des métaux de transition et dans une moindre proportion de silicates magnésiens [85].

5.4. Sols hydromorphes

Les sols sont dits hydromorphes lorsqu'on observe des traits pédologiques attribuables à un excès d'eau [86] .Les sols hydromorphes sont généralement à dominance argileuse. Cependant, ces sols se caractérisent par l'excès d'eau et sont accompagnés de modifications particulières au niveau des paramètres physico-chimique et biologique du milieu [87].

Les processus induisant hydromorphe d'un sol sont entre autres :

- la présence d'un excès en eau ;

-la limitation de la ressource en oxygène ;

-la présence de substrats métabolisable ;

- des conditions de température permettant l'activité de la microflore ;

-la présence d'éléments susceptibles de changer d'état d'oxydoréduction et de marquer des changements de façon plus ou moins irréversible. Leur structure compacte est moins favorable à la vie microbienne, car la vitesse de diffusion de l'oxygène dans ces sols saturés est très faible comparé aux sols fortement bien drainés [88]. C'est ce manque en oxygène qui va modifier l'activité bactérienne. Autrement, les bactéries aérobies disparaissent au profit des bactéries anaérobies [89]. Les sols hydromorphes se rencontrent généralement dans des zones topographiques où les pentes sont très faibles, voire nulles, et où les filets d'eau convergent localement vers des dépressions, soit sur des plateaux, soit dans des zones de bas-fond. Ces sols présentent une susceptibilité plus grande par rapport à la mobilité des ETM, car un milieu réducteur favorise la solubilisation des oxyhydroxydes de fer/manganèse et la libération des ETM associés, mais également la production de composés organiques à l'origine de complexes organo- métalliques stables [90].

Dans les pays industrialisés, les éléments traces métalliques et métalloïdes, sont abondants dans l'environnement, et sont considérés comme l'une des formes principales de pollution. Les activités minières et de fonderie, ancienne ou actuelles, constituent des sources importantes de contamination de l'air, des sols et des eaux [91] ; [92] et [93 [91 ; 92 ; 93] ı de ces particules sur les sols pendant de longues périodes augmente la pollution des sols en ETM, ce qui conduit la contamination des cultures en éléments traces pouvant rendre ces dernières dangereuses pour la santé humaine et animale [93]. Sans être exhaustives, ces activités contribuent à la destruction du paysage, et possèdent également un potentiel toxique ou écotoxique pouvant conduire à la destruction de la végétation originelle et représenter des risques pour la santé animale et humaine [94]. L'exploitation artisanale de sites miniers en Afrique s'accompagne généralement d'ouverture de tranchées, de puits, du retournement des sols, avec pour corolaire la fragilisation des sols et la destruction progressive des terres cultivables. Par ailleurs, le sol étant un support important des écosystèmes terrestres, une dégradation de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques, induit une subsidiarité dont les conséquences engendrées impactent sur les activités agropastorales.

5.5. Mangroves

En général, les éléments traces métalliques ne sont pas biodégradables et ont tendance à s'accumuler dans différents types d'environnement. Ils existent naturellement à une concentration faible et certains d'entre eux sont des micronutriments essentiels à différentes flores et faunes. En raison de la proximité de l'environnement urbain et de l'industrie, les mangroves reçoivent un large éventail de polluants sous forme d'eaux usées, de déchets solides, de particules, etc. [95] ;[96]. En tant qu'écosystèmes forestiers, les mangroves fournissent toute une série de services écosystémiques, assurant ainsi la survie de millions de personnes dans le monde [97]. Les mangroves jouent un rôle essentiel dans le stockage et la séquestration du carbone et donc dans l'atténuation du changement climatique [98].

6. Variabilités d'un type de sols à un autre

L'une des particularités importantes du sol est son hétérogénéité, même sur une courte distance à l'intérieur des unités cartographiques ou des surfaces restreintes, ils apparaissent comme homogènes. La variabilité sur de courtes distances permet de définir les propriétés physico-chimiques du sol dans une unité cartographique ; un champ ou un écosystème. Pour estimer avec précision la fertilité moyenne d'un champ, la variabilité des sols cultivés ont été abondamment étudiés par [99]; [100] ;[101];[102]. Cette variabilité spatiale des sols agricoles

a été attribuée à une variabilité naturelle, à laquelle s'ajoute celle due au type d'utilisation et au type de travaux ou de traitements effectués (nivelage, fumage, fertilisation) et pour les sols conquis de la forêt, il faut ajouter les travaux de défrichement. Même en zone forestière, où l'homme intervient très peu l'hétérogénéité du sol reste et demeure très grande d'après [103]. Ils ont démontré également que le grand degré de variabilité sur des distances de l'ordre du mètre et même du centimètre pour des sols bruns non cultivés.

Conclusion

La biodisponibilité du phosphore dans les sols cultivés varie suivant la quantité de phosphore dans le sol et du système de culture utilisé. Elle peut être évaluée à partir des ions phosphates dissous et diffusibles. La fertilisation phosphatée des sols peut donc être raisonnée et programmée à partir du bilan de P dans le sol et la concentration des ions phosphates dans la solution du sol. Aussi, la distribution spatiale des éléments traces métalliques (ETM) dans les différents sols résulte de la combinaison des facteurs naturels et des facteurs anthropiques. Ces derniers suivant leurs compositions sont influencés par des facteurs qui facilitent leur mobilité dans les différents horizons du sol.

CHAPITRE 2 :
CADRE D'ÉTUDE, MATÉRIEL ET MÉTHODE

CHAPITRE II : CADRE D'ÉTUDE, MATÉRIEL ET MÉTHODE

2-CADRE D'ÉTUDE

Dans le but d'atteindre les objectifs de ce travail, plusieurs étapes ont été suivies : la visite prospective et enquête, le choix des sites, le prélèvement des sols, les travaux du terrain, l'analyse des échantillons au laboratoire et le traitement statistique des données à partir des logiciels appropriés.

2.1. Travaux de terrain

Ils sont subdivisés en trois phases à savoir : une visite prospective et enquête, le choix des sites de prélèvements de l'échantillon des sols ; de l'eau de ruisseau et enfin l'acquisition des données du terrain.

2.1.1. Visite prospective

Elle a servi à l'observation de la zone d'étude et nous a permis non seulement de déterminer les sources potentielles de pollutions, mais aussi les activités menées autour du lac à travers une enquête.

Les enquêtes sur le terrain ont été menées dans 9 localités en vue d'identifier les différentes sources de pollution du lac. À cet effet une fiche d'enquête a été élaborée et les localités sillonnées sont : Hounkpotonnou, Tohonou-Dadahoue, Tohonou-Fifadji, Kpinnou, Agontimey, Kponnou, Logbo, Houin et Duimey.

2.1.2. Acquisition des données

Dans le but d'atteindre les objectifs de notre étude, il est indispensable pour nous de passer par la recherche documentaire. Cette partie constitue une démarche exploratoire et qui a marqué toutes les étapes de la recherche. Elle nous a permis de mieux cerner la problématique et de faire l'état des lieux des connaissances capitalisées dans ce domaine. Cette démarche consiste à parcourir des documents scientifiques (thèses, mémoires, articles…) qui ont abordé de façon générale ou spécifique la problématique de la pollution au phosphore et des éléments traces métalliques dans les sols et leur transfert dans les plans d'eau.

Les travaux de terrain ont porté sur le prélèvement des échantillons d'eau de ruisseaux et de sols. Ces travaux ont été réalisés pendant la petite saison pluvieuse. Les campagnes de prélèvements des échantillons ont eu lieu dans les mois de juin et juillet 2022. Au cours des campagnes d'échantillonnage, le prélèvement du sol est fait à la tarière (Photo**1)** et est

conservée dans des sachets zip de congélation. Après ces prélèvements de sol, l'eau de ruisseaux a été aussi prélevée dans des bouteilles en plastiques de 1.5 L puis ramenée au laboratoire pour l'analyse des éléments traces métalliques. Les coordonnées géographiques ont été prises avec un appareil GPS GARMIN (**Photo11**).



Photo 1 : Échantillonnage de sol cliché (NOUKOUSSI, 2022)

2.2. Situation géographique

Le lac Toho est situé au sud-ouest du Bénin dans le département du Mono entre les parallèles 6°35' et 6°40' de latitude Nord et entre les méridiens 1°45' et 1°50' de longitude Est. Il fait partie du bassin du Mono. Ce dernier couvre une superficie de 15 km² et se trouve dans le complexe Ouest des zones humides du Sud Bénin (site Ramsar 1017). Le lac Toho est partagé par trois communes à savoir la commune de Lokossa dont l'arrondissement de Houin est typiquement riverain, la commune d'Athiémé ayant pour arrondissement Kpinnou et la commune de Houéyogbe ayant pour arrondissement Zoungbonou. Il couvre une superficie de 9,6 km² à l'étiage et de 15 km² en période de crue. Le lac Toho a en moyenne 7 km de longueur, 2,5 km de largeur méridionale et environ 500 m de largeur septentrionale, il a la forme d'un croissant orienté sud-nord [104].

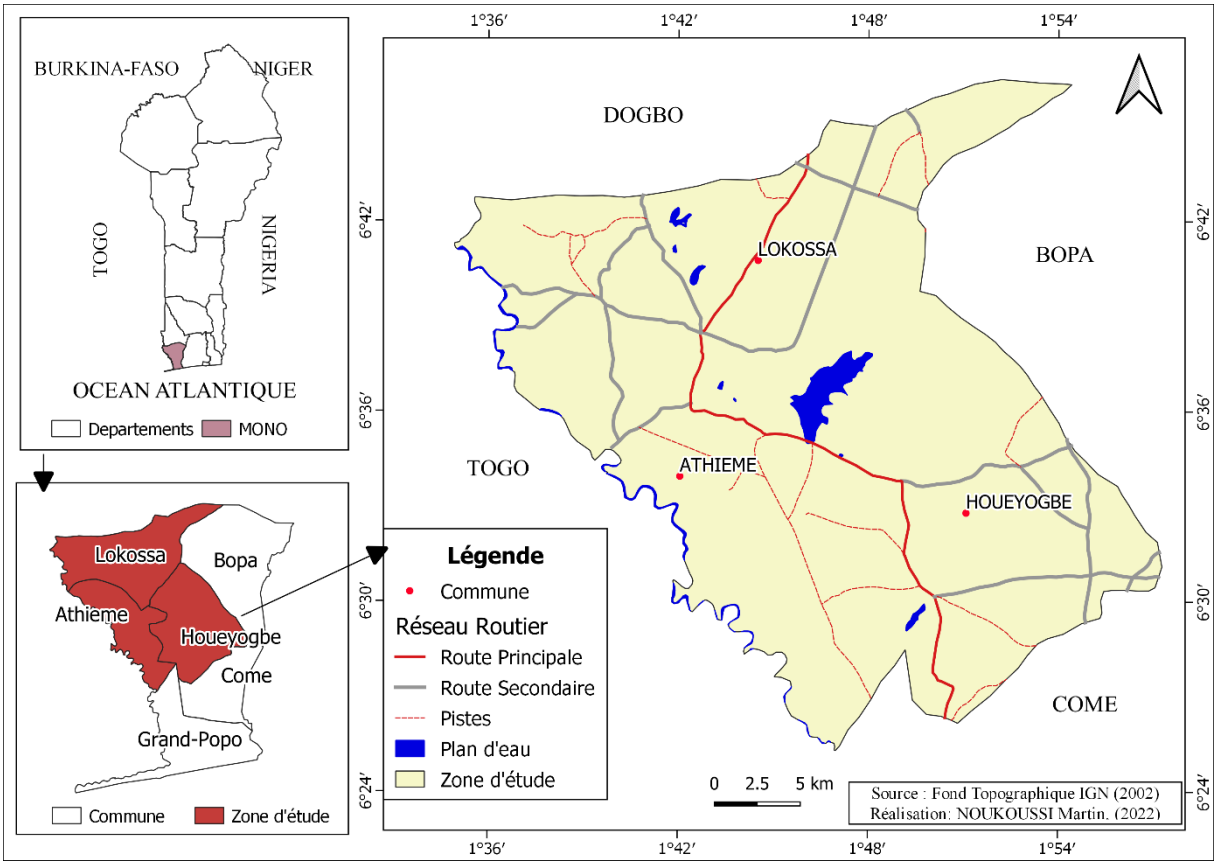


Figure 7 : Carte de la situation géographique de la zone d'études

2.3. Climat et hydrographie

La région où se trouve le lac Toho présente un climat de type subéquatorial caractérisé par deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches alternées de la façon suivante : une grande saison pluvieuse de mi-mars à mi-juillet, une petite saison sèche de mi-juillet à mi-août, une petite saison pluvieuse de mi-août à mi-novembre, une grande saison sèche de mi-novembre à mi-mars [105].

Le lac et ses tributaires constituent le seul réseau hydrographique du secteur. Les rivières qui se jettent dans le lac ont un régime étroitement lié aux précipitations et à la nature des terres qu'elles traversent. Diko possède un lit creusé dans la roche marno-argileuse de la dépression Tchi. Ces roches sont imperméables et le ruisseau perd très peu d'eau par osmose, qui fournit alors un pourcentage élevé de l'eau au lac. L'écoulement du Diko qui débute en mai est plus précoce que celle de la rivière Akpatohoun qui traverse au contraire des roches marno-sableuses [14]. Un écoulement du lac Toho vers le Sazué s'effectue par le chenal de Kpacohadji et celui de Kpinnou. Si du Mono, le Sazué ne reçoit pas beaucoup d'eau, le niveau du lac alimenté par le Diko et l'Akpatohoun devient supérieur à celui de la Sazué, ainsi le lac fournit de l'eau à

cette dernière. Le long de la piste reliant Kpinnou et Don Agbodougbé, le canal Kpacohadji coule en alluvion et se raccordera à la rivière Sazué à environ 800 mètres de la route goudronnée [13]. La température peut atteindre 27,9°C avec une insolation annuelle moyenne de 2024h/an [106]. Ce type de climat est un climat semi-aride qui favorise le gonflement des sols argileux.

2.4. Sols et végétations

2.4.1. Types de sols et occupations des sols

Selon le Centre National des sciences du sol agricole (CENAP), il existe un nombre limité de types de sols dans le sud-ouest du Bénin : les sols ferrallitiques et les sols hydromorphes (Mededa, 1998) cité par [14].

2.4.1.1. Les sols ferrallitiques

On rencontre ces sols sur tous les plateaux du Continental terminal et sur le grès du crétacé dans le sud-ouest du bassin sédimentaire, de la zone climatique côtière et pré côtière, sous des pluviométries moyennes annuelles comprises entre 850 et 1350 mm. La végétation caractéristique est un bush arbustif dans le Sud et une forêt claire au Nord [107]. Les localités se trouvant dans les arrondissements de Lokossa sont caractérisés par les sols alluviaux, les vertisols, les sols hydromorphes de type alluvial et colluvial des vallées des fleuves et lacs assez riches en matières organiques, très fertiles, mais inondés de façon saisonnière par les crues du fleuve Mono [106]. Pour ce qui est des vertisols, ce sont des sols argileux majoritairement smectiques qui gonflent ou se rétractent fortement, suivant les saisons alternativement sèches et humides [57]. Ces argilites moyennement limoneuses possèdent une perméabilité faible, une capacité de rétention élevée, une forte cohérence, une porosité faible et une capacité de gonflement importante. Leur couleur est foncée et homogène, noirâtre en surface du fait de la présence de la matière organique et verdâtre en profondeur où une hydromorphe temporaire est fréquente [106].

En termes de valeur agricole, les ferralitiques ont de bonnes propriétés physiques : profondeur, drainage, perméabilité, mais une faible capacité hydrique et chimique. Ils sont diversement utilisés : pour des plantations forestières, mais surtout pour des cultures de maïs, d'ananas, de niébé, d'arachide et dans le maraîchage [77]. L'utilisation de ces sols dans le bassin sud comprend l'application régulière d'engrais chimiques à base de potassium et le retour des résidus de récolte au sol.

Des sols bien drainés sur les sédiments constituent les sols argilo-sableux du continental terminal : ces sols se développent dans la zone des bancs de sable et recouvrent une partie du plateau d'Agamè. Ils se distinguent par de bonnes propriétés physiques (profondeur, drainage,

perméabilité). De plus, leur fertilité dépendra étroitement de leur histoire culturelle, qui détermine l'étendue des réserves minérales disponibles (principalement d'origine organique), et de la répartition des précipitations qui peuvent largement compenser la rareté de leurs besoins en eau. Les sols ferralitiques hydromorphes sur dépôts argileux du continental terminal sont des sols situés dans des dépressions fermées mal drainées extérieurement sur le plateau. La principale caractéristique de ces sols est la continuité de deux horizons : l'horizon A stérile et l'horizon B de faux gley profond. Le matériau d'origine de ces sols est légèrement plus visqueux que les sols bien drainés, mais les propriétés chimiques sont fondamentalement les mêmes, ce qui entraîne un matériau d'origine médiocre, en particulier le potassium [14].

2.4.1.2. Les sols hydromorphes

Les sols hydromorphes se caractérisent par un manque d'oxygène dû à la saturation temporaire ou permanente des pores en eau. Il en résulte une diminution et une mobilisation partielle du fer et un ralentissement de la décomposition de la matière organique.

Les meilleures conditions pour que ces sols se forment sont des conditions qui les saturent en eau de surface, ralentissant la transformation des résidus végétaux. Ces sols se trouvent le long des cours d'eau et dans les dépressions [108]. Ces sols sont situés sur la rive nord et autour des lacs de la zone de Logbo. La couche supérieure de ces sols marécageux contient de la matière organique peu décomposée. Cet horizon existe du fait de la présence d'eau permanente plus ou moins salée.

2.4.2. Végétation

Les facteurs comme le climat, les sols et les activités humaines ont permis le développement des paysages naturels et humanisés, caractérisés par des savanes arbustives, des prairies marécageuses, des palmeraies et des mosaïques de cultures et de jachères. En effet, la végétation dense originelle a presque disparu et a fait place à des plantations de palmiers à huile et d'arbustes. Cependant, il existe par endroit quelques reliques de forêts faites de teck, de calcera, d'eucalyptus, etc. Certaines essences forestières telles que : Iroko, Sambas, Fromager, Pommier, Acacia se font de plus en plus rares dans la commune [105].

2.5. Géomorphologie et géologie

Du point de vue morphologique, les formations géologiques de cette zone d'étude sont sur le plateau dont l'altitude varie entre cinquante et soixante mètres (50 et 60 m) environ au-dessus du niveau de la mer [108]. Cette zone est située dans la vallée du fleuve Mono et dans la dépression de la Lama. C'est une zone d'altitude relativement basse encaissée entre les

plateaux. Le relief de la commune est monotone à plat, érodé par endroits. Il est marqué par de nombreuses dépressions et des bancs (cordons) de sables et de grès. Selon [105] ces dépressions constituent des bassins versants ou des vallées. Ils sont également constitués des dépôts alluvionnaires formés de sables, d'argiles avec gravier subordonné et niveaux charbonneux. On rencontre aussi des marnes, calcaires et des dépôts sublittoraux internes à barres sous-marines. Les argiles à kaolinites et/ou attapulgites parfois marneuse à minces passées carbonatées bioclastiques et pélitiques-psammitiques, dépôts sublittoraux intermédiaires-externes de l'unité sont aussi rencontrées [106].

2.6. Quelques aspects socio-économiques

Une grande variété de groupes ethniques se rencontre le long du lac Toho. Nous avons les Adja, les Sahouè, les Kotafons, les Watchi, les Xwla, les Mina, les Toffin, les Haoussa et les Yorubas. Les populations riveraines qui utilisent les ressources de ce lac sont localisées dans les communes de Lokossa, de Houéyogbé, et d'Athiémé ; plus précisément dans les arrondissements : Houin (Lokossa) ; Kpinnou (Athiémé) et Zoungbonou (Houéyogbé)[14].

L'agriculture, l'élevage et la pêche, le commerce, l'artisanat, l'exploitation de bois de feu et la transformation de produits sont les principales activités de production. L'agriculture emblave une superficie de l'ordre de 10483 ha soit 47, 65% de l'étendue de la commune. Les principales cultures de cette commune sont le maïs, le manioc, les cultures maraîchères (gombo, piment, tomate, légumes feuilles) et la canne à sucre [105].

2.7. Prélèvements des sols

Dans le but d'avoir une vue d'ensemble et une représentativité des résultats sur la variabilité des différents paramètres du milieu d'études, les sites d'échantillonnages sont sélectionnés en tenant compte des activités agricoles (maraîchage, agriculture, utilisation des fertilisants) menées sur les sols cultivés autour du lac Toho d'une part, et de l'utilisation qui est faite de l'eau des ruisseaux bordant le lac d'autre part. Les sites ont été retenus en fonction de l'incident ayant lieu sur le lac suite à la pollution et du changement de la couleur de l'eau. Le **tableau 1** présente les raisons du choix des stations et leurs coordonnées géographiques.

Tableau IV : Sites d'échantillonnages de la zone d'étude

SITES	LOCALITÉS	COORDONNÉES GÉOGRAPHIQUES	CRITÈRES DE CHOIX
S1	Hounkpotonnou	1°47'11.84"E ; 6°35'53.35"N	Proximité d'un forage utilisable. Présence d'un champ de maïs.
S2	Tohonou Dadahoue	1°47'33.34"E ; 6°36'34.65"N	Pression anthropique présente et permet une estimation de l'impact de l'utilisation des fertilisants vers le lac.
S3	Tohonnou-Fifadji	1°47'22.10"E ; 6°37'7.40"N	Pression anthropique présents champs de maïs et sérieuse, car habitations non loin du lac
S4	Kpinnou	1°45'59.17"E ;6°35'5.12"N	Champs de maraîchage à proximité du lac.
S5	Agontimey	1°45'6.60"E ; 6°36'16.35"N	Zone de maraîchage et de pression anthropique
S6	Kponnou	1°45'25.13"E ; 6°36'36.49"N	Zone de champs de maïs à proximité du lac.
S7	Logbo	1°46'0.42"E ; 6°37'0.65"N	Pression anthropique très importante et des champs de maïs non loin du lac.
S8	Houin	1°45'53.54"E ; 6°38'9.14"N	Zone en pente constituée de plantation de maïs et de palmiers qui permet d'apprécier l'impact des eaux de ruissellement sur le lac.
S9	Duimey	1°46'54.10"E ;6°38'23.33"N	Zone de champs de maïs en pente et proches du lac.

2.7.1. Localisation des sites

Les sites de prélèvement sont sélectionnés pour leur caractère naturel, et du fait qu'ils sont constitués de sols remaniés pour l'agriculture, mais aussi de leurs proximités avec le lac Toho. Il est essentiel pour nous de constater l'état physico-chimique des sols cultivés se trouvant non

loin du lac de manière à vérifier que la contamination des eaux du lac est d'origine anthropique. Ainsi, les sites sélectionnés sont plus proches autant que possible de l'eau du lac, car la plupart sont faits dans des champs se trouvant à la proximité immédiate.

D'autre part, ce choix s'est établi de manière à couvrir les différentes occupations de sols du territoire des trois communes qui se trouvent autour du lac. La campagne d'échantillonnage concerne 09 sites au total se trouvant dans les localités des arrondissements de Zoungbonou, Houéyogbe et Houin. La carte suivante présente la localisation des points d'échantillonnage (sols et eaux).

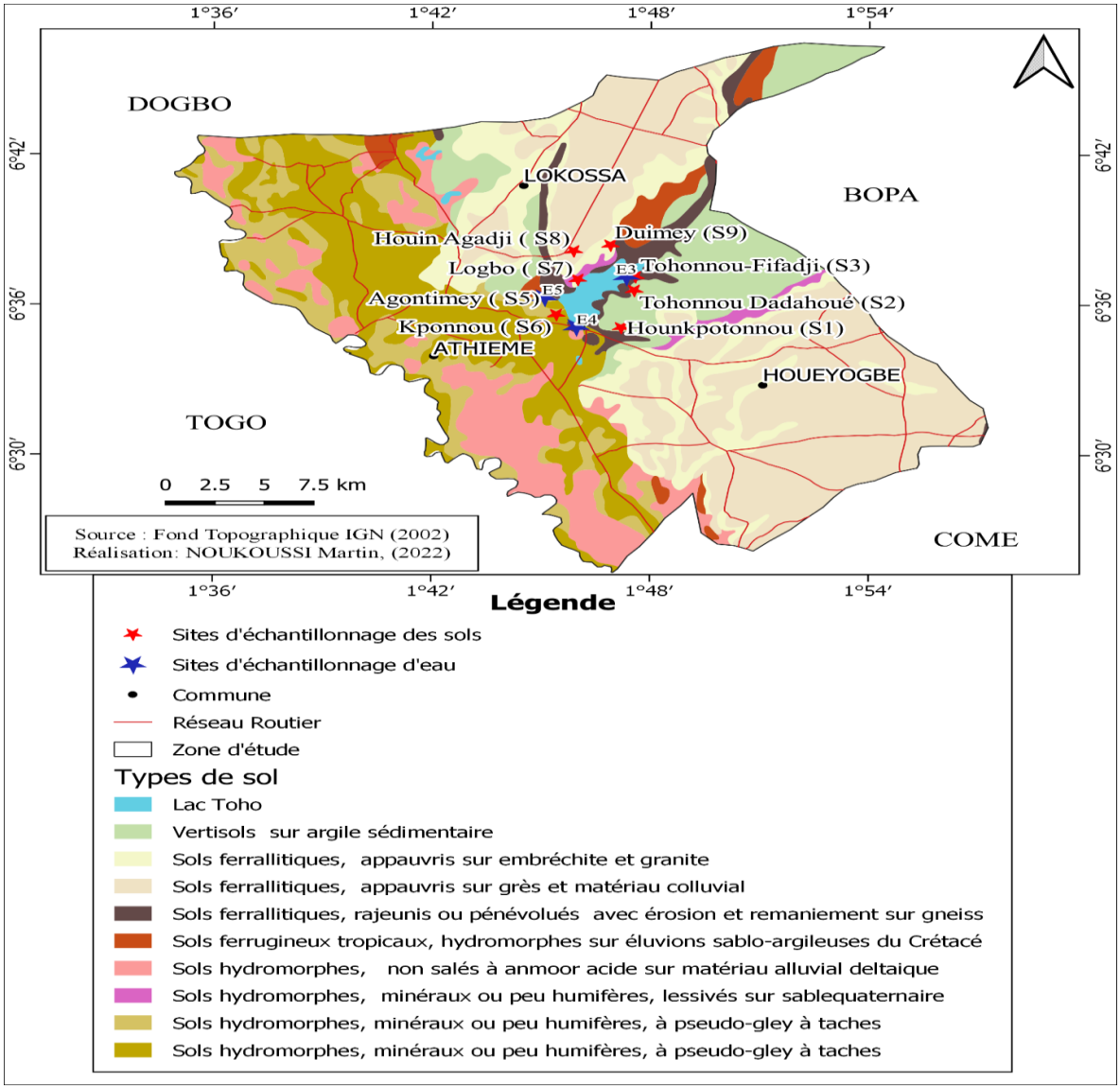


Figure 8 : Localisation des sites de prélèvements des échantillons de sol

2.8. Matériel de terrain

Au cours de notre campagne de terrain, le matériel utilisé se résume dans le tableau **V** :

Tableau V : Le matériel de terrain

Matériels	Rôles
Sachets plastiques zip	Pour conserver les échantillons
Tarière	Pour creuser des trous dans le sol et le prélèvement d'échantillon de sol
GPS (Global Positioning System)	Géoréférencement les sites d'échantillonnage
Bloc-notes de terrain et un stylo bleu	Pour relever les paramètres de terrain
Un marqueur noir et une bande adhésive	Pour étiqueter les échantillons prélevés
Des bouteilles en plastiques de 1.5 l	Pour prélever l'eau des ruisseaux
Un appareil photo	Prise de photos

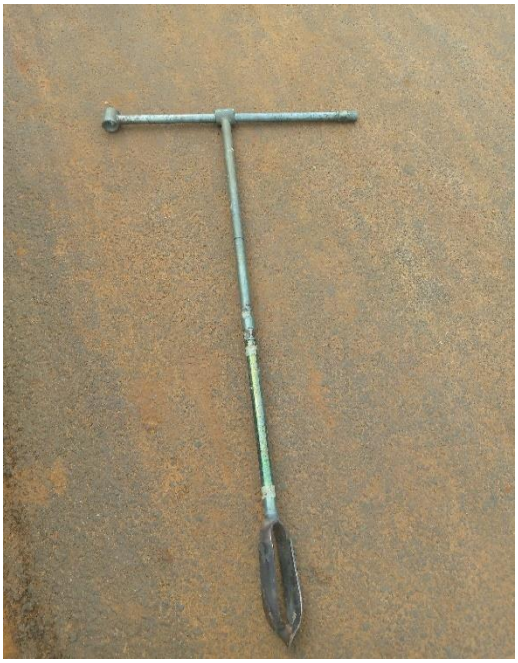


Photo 2 : Tarière cliché (NOUKOUSSI, 2022)



Photo 3 : GPS cliché (NOUKOUSSI, 2022)

2.9. Matériel de laboratoire

Le matériel utilisé au laboratoire se résume dans le tableau VI :

Tableau VI : Les matériels du laboratoire

Matériels
Balance de précision
Étuve pour le séchage des échantillons
Une plaque chauffante pour le chauffage de solutions
La verrerie de laboratoire
Un agitateur magnétique pour assurer un bon mélange lors des différents dosages
Un distillateur pour produire de l'eau distillée
Mortier en agate pour broyer les échantillons secs
PH-mètre
Le four pour la calcination
Conductivimètre



Photo 4 : Balance de précision
cliché (NOUKOUSSI, 2022)



Photo 5 : pH-mètre Cliché (NOUKOUSSI, 2022)

3. Méthode d'échantillonnage

3.1. Échantillonnage du sol

La méthode de prélèvement utilisée pour l'étude est inspirée de celle d'une approche statistique(aléatoire). L'échantillonnage concerne tous les horizons, de surface et de profondeur jusqu'à 90 cm. Sur chaque site, un point est choisi dans les champs cultivés. Un trou pédologique est réalisé manuellement à la tarière pour déterminer la profondeur par horizon du profil sol. Après identification des horizons, un échantillon par horizon est collecté à chaque niveau soit H 30, H 60 et H 90 cm, pour un total de 3 échantillons par site. Ces 3 échantillons unitaires par horizon sont rassemblés pour former un échantillon composite pour un site. Il y a donc autant d'échantillons composites que d'horizons pour chaque site. Les prélèvements par carottage sont effectués manuellement à la tarière (**Photo1**). Sur l'ensemble de notre zone d'étude, nous avons prélevé 09 échantillons composites et conditionnés dans un emballage inerte (sachets plastiques zip de congélation) pour les analyses en ETM et les échantillons d'eau de ruisseau dans des bouteilles en plastique de 1.5 L pour l'analyse des ETM également. L'échantillonnage est une étape très importante puisque de cette phase découlent directement les résultats et interprétations.

3.2. Point d'échantillonnage de l'eau de ruisseau

Le prélèvement des eaux de ruisseaux a été fait au niveau de trois sites : site de Tohonou, site Kpinnou et le site de Kponnou à l'aide des bidons plastiques de 1,5L. Pour la réussite de cette opération, on rince la bouteille en plastique trois fois avec l'eau du ruisseau et on le plonge dans l'eau a 20cm de la surface de l'eau. On le remplit à ras le bord pour qu'il n'y soit pas de bulbe d'air une fois la bouteille pleine. Une fois remplit on la ferme, puis on étiquette cette bouteille avec une étiquette comportant (la date, le lieu, l'heure, les coordonnées géographiques du lieu du prélèvement et le nom du préleveur). Ensuite on le transporte au laboratoire pour les mesures en dehors des paramètres in situ qu'on mesure sur le terrain.

Tableau VII : Sites de prélèvement des eaux

Sites	Localités	Coordonnées	Caractéristiques
E3	Tohonou	N : 6°37'7.9392, E : 1°47'20.38812	Ruisseau situé à proximité du lac.

E4	Kpinnou	N : 6°35'5.118, E : 1°45'59.18	Ce site a été choisi en raison de sa proximité avec le lac et les activités de maraîchages et de pêche qui se font tout autour.
E5	Kponnou	N : 6°36'36.49212, E : 1°45'25.1342	Ce site a été choisi également en raison de sa proximité avec le lac et les activités de maraîchages et de pêche qui se font tout autour.



Photo 6 : Prélèvement d'eaux de ruisseau cliché (NOUKOUSSI, 2022)

3.3. Analyse des échantillons de sol

Une fois l'étape de prétraitement achevée, commence donc celle du traitement proprement dit.



Photo 7 : Broyage d'un échantillon de sol séché cliché (NOUKOUSSI, 2022)



Photo 8 : Échantillon de sol prélevé cliché (NOUKOUSSI, 2022)

3.4. Méthode d'analyse au laboratoire

Cette partie consiste à présenter les différentes méthodes utilisées pour chaque paramètre analysé.

3.4.1. Analyse des paramètres physico-chimiques des sols et des eaux de ruisseaux

Pour évaluer l'état de pollution chimique des sols cultivés autour du lac Toho, les paramètres suivants ont été étudiés sur les échantillons de sols et l'eau de ruisseaux.

- **Humidité des échantillons de sol**

Avant les analyses physico-chimiques, les échantillons doivent subir un prétraitement, phase réalisée au laboratoire de chimie inorganique et de l'environnement. Selon la norme NF X31-100, les échantillons sont homogénéisés (broyages des mottes) et pesés.

L'humidité consiste à déterminer la quantité d'eau contenue dans le sol. Pour mesurer cette dernière, une masse M2 du sol a été prélevée après avoir pesé le plateau vide ayant une masse M1. Le sol prélevé est ensuite séché à l'étuve pendant au moins 48 heures à une température de 100 °C maximum. La phase de séchage se termine lorsque la perte de masse de l'échantillon de sol est inférieure à 5 % après 24h puis une nouvelle masse M3 est mesurée. La teneur d'eau est mesurée par la relation suivante :

$$\text{Humidité} = \frac{(\boldsymbol{M1-M3})}{(\boldsymbol{M2-M1})}$$

M1 : Masse à vide

M2 : Masse de sols humides

M3 : Masse de sols secs

L'échantillon sec est par la suite broyé à l'aide d'un mortier en agate (figure). Une autre partie de l'échantillon est broyée en particules fines et utilisée pour le dosage des ETM et du phosphore total. Il est important de ne pas émotter les éléments grossiers (graviers).

- Détermination du pH (eau) des échantillons de sol

Les mesures de pHeau de chaque horizon de sol ont été réalisées au laboratoire de chimie inorganique et de l'environnement (LACIE/ FAST) selon la norme AFNOR X31-103. Dans un bécher de 50 ml sont ajoutés successivement 10 g de sol sec prétraité et 25 mL d'eau distillée de manière à ce que le rapport eau/sol soit de 2,5 mL/g. La solution de sol est ensuite agitée pendant 15 minutes sur un agitateur magnétique à une température ambiante de 25 ± 2°C.

Ensuite, laisser au repos pendant 30 min à l'abri de l'air ; le pH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre.

- **Matière organique (MO)**

La mesure de la matière organique dite perte au feu des horizons de sol prélevés est également réalisée au laboratoire. Elle consiste à prélever une masse M1 de sols secs prétraités après avoir mesuré le plateau à vide ayant pour masse MO. La méthode par Perte Au feu (PAF) permet d'apprécier la teneur en matières organiques. Elle est basée sur le dosage gravimétrique de la matière organique totale à la calcination (550°C) en conditions sèches, ainsi la masse M2 est obtenu. Il s'agit donc de la perte de poids de l'échantillon par rapport au poids initial après 16 heures de calcination.

$$MO = \frac{C\ org\ x100}{58}$$

C org : Carbone organique

MO : matière organique

- **Carbone organique (CO)**

La mesure du carbone organique se fait grâce à la formule qui permet également de déterminer le taux de carbone organique par convention. Le carbone organique permet de déterminer la quantité de matière organique dans un échantillon de sol. Il est obtenu à partir de cette formule :

$$C\ org = \frac{MO\ x\ 58}{100}$$

C org : Carbone organique

MO : matière organique

- **Alcalinité du sol**

L'alcalinité du sol correspond à la présence des bicarbonates ; carbonates et hydroxydes. La détermination est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué en présence d'un indicateur coloré. Le principe du dosage est le suivant : Après avoir ajouté 0.5 g de sol dans l'erlenmeyer et 20 ml d'acide ensuite agité quelques minutes, prélever une aliquote (V ml) du surnageant à analyser (10 ml) dans un erlenmeyer ; ajouter 2 gouttes de BBT ; Si la solution est colorée en jaune ; titrer avec NaOH 0.01N jusqu'au changement de la coloration jaune (pH 8.4) ; noter le volume lu « X ml ».

$$Alcalinité = \frac{(20-X)\ x\ 0.001\ x\ 60}{2\ x\ m}$$

X : Volume de la soude versé

m : 0.5 g

- **La conductivité électrique (CE) du sol**

La conductivité électrique est utilisée comme un instrument de diagnostic de la salinité des produits organiques. Elle permet de mesurer la concentration en ions de la phase liquide d'un substrat en utilisant la propriété d'une solution aqueuse de conduire l'électricité proportionnellement à sa concentration en ions, d'où l'appellation conductivité électrique. Au laboratoire, pour mesurer ce paramètre nous avons suivi le protocole suivant :

Dans un bécher de 50 ml sont ajoutés successivement 10 g de sol sec et 25 ml d'eau distillée de manière à ce que le rapport eau/sol soit de 2,5. La solution de sol est ensuite agitée pendant 15 minutes sur un agitateur magnétique à une température ambiante de 25 ± 2°C. L'agitation effectuée a pour but de solubiliser les espèces et de mettre en équilibre la composition chimique des deux phases ensuite laissées au repos pendant 30 min à l'abri de l'air ; la mesure du CE est prise à l'aide d'un multiparamètre.

- **Carbone inorganique**

Le carbone inorganique est déterminé par la formule suivante

$$\text{Carbone inorganique} = \frac{1}{5}\ x\ CO_3^{2-}$$

- **Granulométrie**

Le tamisage des échantillons de sols a permis de séparer la fraction grossière (diamètres grains >50 µm) de la fraction fine (diamètres des grains < 50 µm). La fraction grossière retenue est séchée à l'étuve, puis pesée sur une balance de précision au millième de gramme. Le refus ainsi séché et pesé subit un tamisage à sec sur une colonne constituée de six (6) tamis à mailles carrées de la série AFNOR d'arêtes suivantes : 2 mm ; 1 mm ; 0,5 mm ; 0,25 mm ; 0,125 mm ; 0, 063 mm (**Figure**). Le tamisage est effectué par un appareil de type "Rotap" pendant 10 minutes avec une amplitude de 70 vibrations/minute. Ce temps de tamisage permet de réduire raisonnablement l'erreur relative au poids d'une fraction à moins de 2% (Tricart et Cailleux, 1959).



Photo 9 : Appareil bioblock de type Rotap cliché (NOUKOUSSI, 2022)

3.4.2. Extraction du phosphore

La détermination du phosphore inorganique total s'effectue en deux étapes a été faite par la méthode au persulfate de sodium (NF EN ISO 6878). La première consiste en une hydrolyse acide des phosphates présents dans l'échantillon. Dans la deuxième étape, les ions orthophosphate réagissent avec les ions molybdate et les ions antimoine pour former des complexes d'acide phosphomolybdate. Ce dernier est donc réduit par l'acide ascorbique en milieu acide et conduit à l'apparition de bleu de molybdène dont l'absorbance à 708 nm sur le spectrophotomètre AXIOM Vis 721 (D) est proportionnelle à la concentration en ions orthophosphate présents dans l'échantillon.



Photo 10 : Vis spectrophotomètre 721 (D) de marque AXIOM cliché (NOUKOUSSI, 2022)

3.4.3. Éléments traces métalliques dans le sol/sédiment

La méthode n° : APHA 3500 est utilisé pour le dosage des métaux traces se trouvant dans les sols prélevés dans notre zone d'étude. Les métaux analysés sont au nombre de dix et il s'agit entre autres du : Plomb (Pb), Cadmium (Cd), Cuivre (Cu), Zinc (Zn), Fer (Fe), Manganèse (Mn), Nickel (Ni), Chrome (Cr), Arsenic (As) et le Mercure (Hg). Ainsi, le protocole ayant permis la mesure des teneurs en métaux traces dans le sol /sédiment est le suivant :
Peser avec précision 1g ± 0.05g de sol/sédiments séchés à l'air, passer à travers un tamis de 2mm et transférer dans une fiole conique de 250ml. Après cela, il faut ajouter 20 ml de mélange de digestion (1 :2 :2 acides perchloriques : acide nitrique : acide sulfurique) au flacon contenant l'échantillon de sol dans la hotte. Ensuite, chauffer à environ (15-20 min) dans la plaque chauffante jusqu'à ce qu'une fumée blanche soit observée et donc arrêter la digestion et laisser refroidir. Après refroidissement, ajouter 20 ml d'eau distillée et faire bouillir pour mettre le métal en solution.

Ensuite, laissez refroidir davantage et filtrez à travers le papier filtre Whatman 42 dans une fiole volumétrique de 50ml et complétez avec de l'eau distillée, puis transférez dans des bouteilles en plastique pour l'analyse 4200 MP-AES ou AAS.

Les analyses ont été effectuées sur le spectrophotomètre d'émission atomique à microplasma (MP-AES 4200), couplé à un ordinateur et exploité à l'aide de l'interface du logiciel MP-AES. Les concentrations de métaux dans les échantillons solides digérés sont directement obtenues à partir de l'instrument avec l'unité préréglée et appropriée. Lorsqu'une dilution de l'échantillon est nécessaire, l'instrument doit être réglé en conséquence pour refléter le facteur de dilution. Pour la concentration de métaux en solution, la valeur est exprimée en mg/kg ou ppm sur la base du poids sec.

3.4.4. Eléments traces métalliques dans les eaux de ruisseaux

L'analyse des métaux traces a été effectuée en aspirant directement les échantillons liquides acidifiés dans le spectrophotomètre d'émission atomique à micro plasma (MP-AES 4200), couplé à un ordinateur et exploité à l'aide de l'interface logicielle MP-AES.

Les concentrations de métaux dans les échantillons solides digérés sont obtenues directement à partir de l'instrument avec l'unité préréglée et appropriée. Si une dilution de l'échantillon est nécessaire, l'instrument doit être réglé en conséquence pour refléter le facteur de dilution. Pour la concentration de métaux en solution, la valeur est exprimée en milligrammes par litre (mg/L).

3.5. Analyses statistiques et traitement des données

Il peut être intéressant de voir si les occupations de sols cultivés présentent des caractéristiques physico-chimiques proches ou non en relation avec les eaux des ruisseaux. Une analyse en composantes principales (ACP), outil de la statistique descriptif, pourrait permettre de résumer l'information contenue dans les données chimiques. Une ACP est réalisée sur les paramètres descriptifs quantitatifs qui seront discutés en tenant compte de chaque horizon étudié. Cette analyse est faite à partir du logiciel XlStat premium 2018 (4918), un logiciel de développement scientifique spécialisé dans le calcul et l'analyse statistique.

CHAPITRE 3 :
RÉSULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre expose les différents résultats obtenus pour faire ressortir le degré de pollution des sols cultivés autour du lac Toho et leurs impacts sur le lac Toho.

4. RÉSULTATS

4.1. Résultats de l'analyse physico-chimique des sols et l'eau de ruisseaux

Dans cette partie, nous présentons les résultats des paramètres physico-chimiques des sols cultivés et des eaux de ruisseaux autour du lac Toho.

- **pHeau du sol**

La figure 9 présente la variation du pHeau du sol de chaque site. Ce pH varie entre 5.23 et 7.89. Au niveau des sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Dadahoue, Kpinnou, Agontimey et Houin on note une diminution de pH en évoluant vers la profondeur et une augmentation de pH sur les sites de Tohonou-Fifadji, Kponnou, Logbo et Duimey vers la profondeur. La plus forte valeur est observée sur la première profondeur H30 au niveau d'Agontimey et la plus faible valeur est observée à une profondeur de H60 au niveau de Duimey. Les valeurs obtenues sont au-dessus des limites de normes Béninoises des sols fertiles [5,7 à 6,5] [109]. On constate également que les sites Tohonou-Dadahoue, Logbo, Houin et Duimey ont un pH inférieur à 7 et les sites de Houkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Kpinnou, Agontimey, et Kponnou ont un pH supérieur à 7.

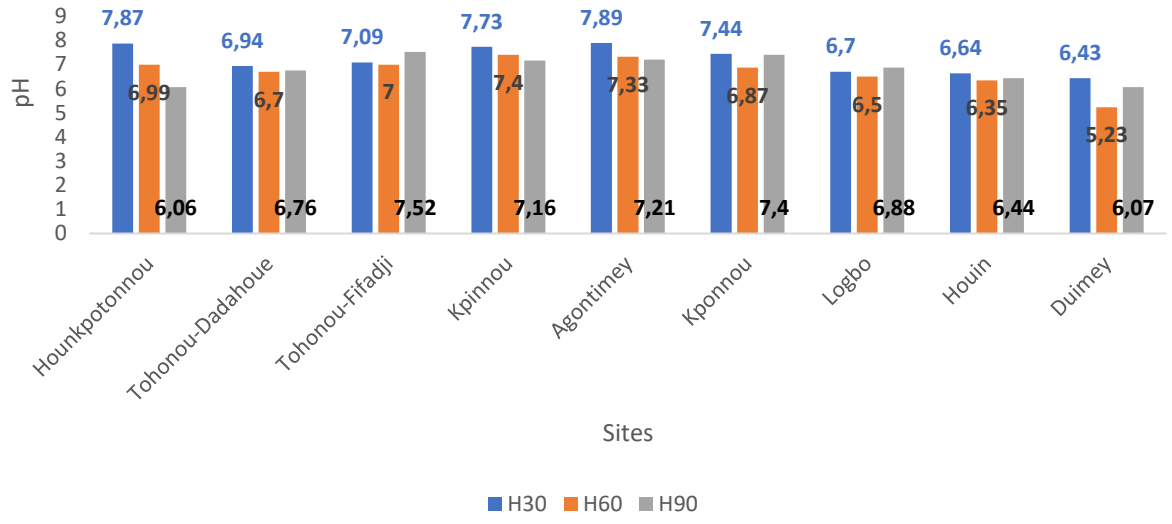


Figure 9 : Variation du pH du sol des sites échantillonnés

Température

La figure 10 nous illustre la variation de la température de l'eau. On note une diminution de la température en évoluant vers la profondeur au niveau du site de Hounkpotonnou et une augmentation au niveau des sites de Tohonou-Dadahoue, Tohonou-Fifadji, Agontimey, Kponnou, Logbo et Duimey en évoluant vers la profondeur. La température des sols varie entre 26.6 °C et 28.9 °C (figure10). Les plus grandes valeurs sont observées sur les sites Logbo et Houin correspondants respectivement à la localité de Logbo et Houin. Tous les échantillons ont des valeurs supérieures à la normale (25 °C).

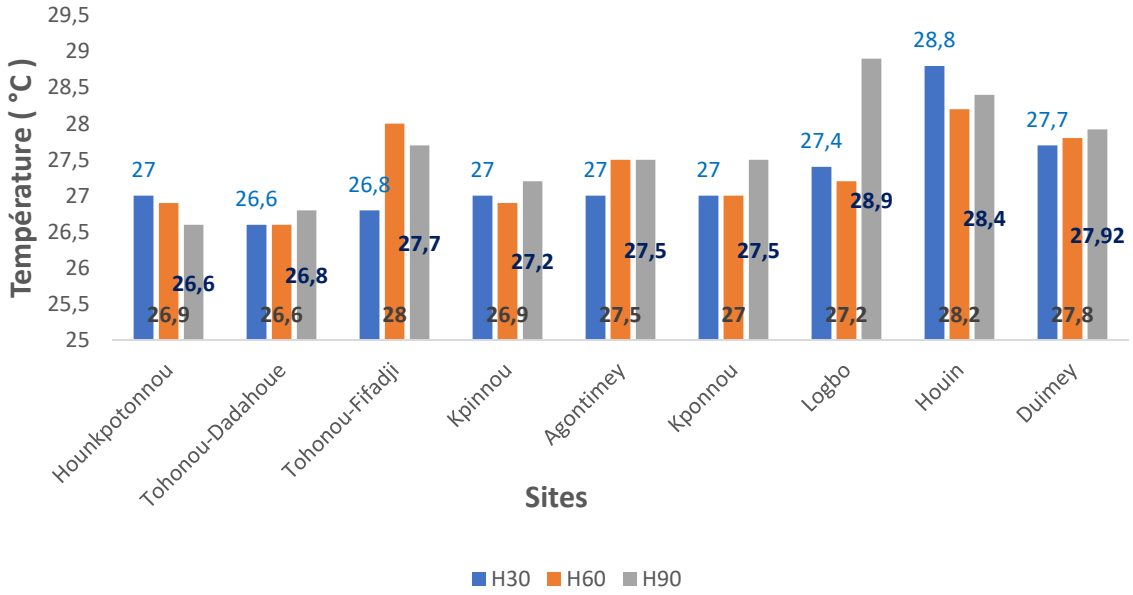


Figure 10 : Variation de température du sol des sites échantillonnés

Humidité

La surveillance de l'humidité du sol est importante, car elle permet la dissolution des nutriments du sol et autres éléments pour favoriser leur biodisponibilité au sol. La figure11 ci-dessous présente la variation de l'humidité du sol cultivé autour du lac Toho. Elle varie entre 8 % et 28 %. On observe une variabilité significative, car elle est décroissante sur les sites Tohonou-Dadahoue, Kpinnou, Logbo et Duimey vers la profondeur et croissante sur les sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Agontimey, Kpinnou et Houin de la surface vers la profondeur.

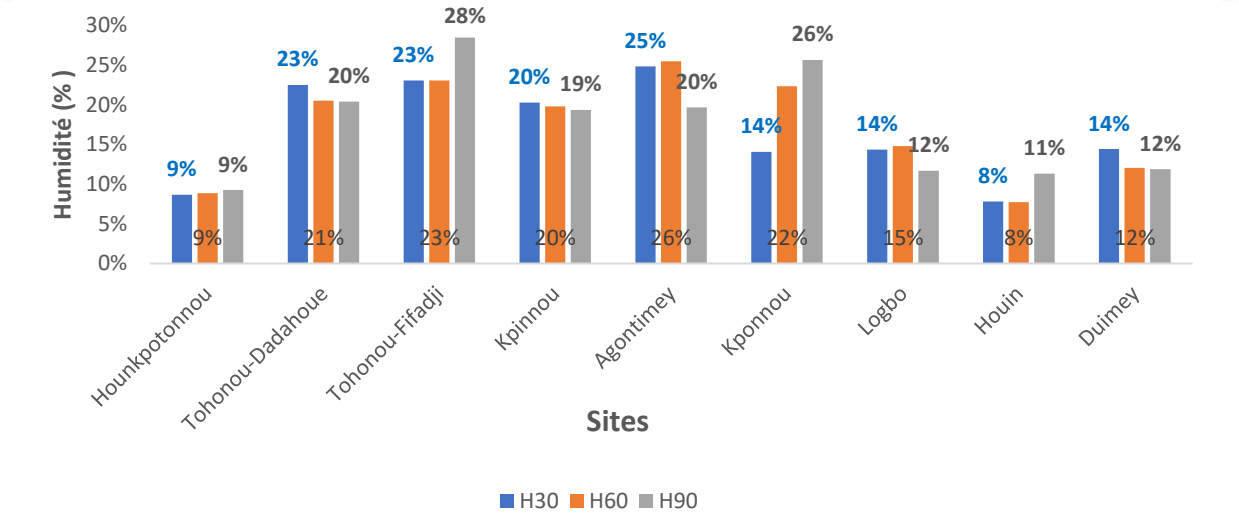


Figure 11 : Variation de l'humidité des sols échantillonnés

Matière organique

La figure 12 présente la variation de la matière organique (MO) qui est quasi présente sur tous les sites échantillonnés. Elle varie entre 3 % et 11 % au niveau des sites. On note une augmentation en matière organique sur les sites Houkpotonnou, Kpinnou, Kponnou, Houin vers la profondeur et une diminution sur les sites Tohonou-Dadahoue, Tohonou-Fifadji, Agontimey, Logbo également vers la profondeur. Cependant, elle reste plus ou moins constante sur le site de Duimey. Elle joue un rôle important dans la fertilité du sol et est un réservoir de nutriments lentement assimilable par les plantes. De façon générale, cette MO est observée au niveau des couches superficielles des sols échantillonnés.

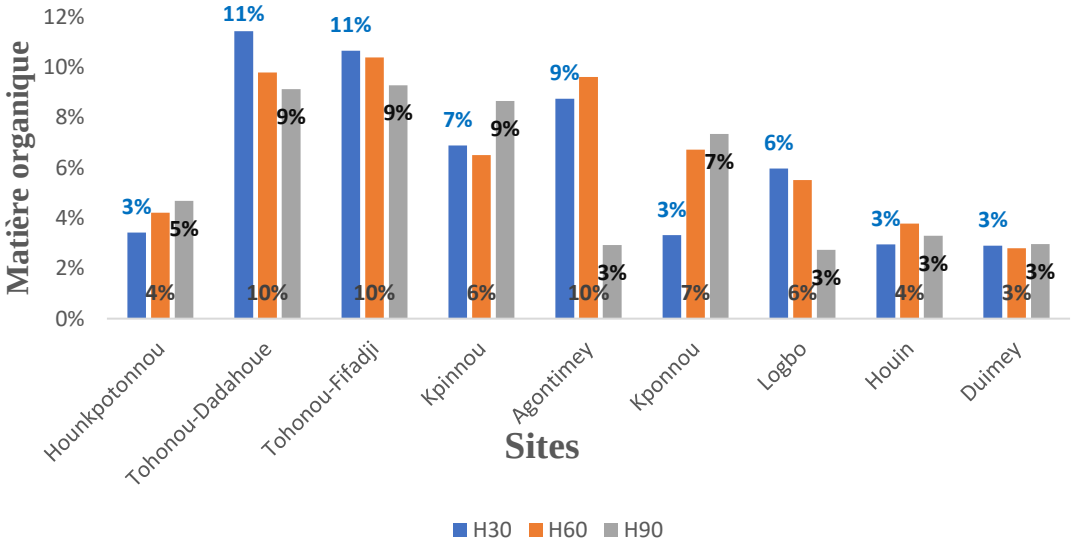


Figure 12 : Variation de la matière organique

Alcalinité

La figure 13 présente la variation des sels dissous au niveau de chaque site. L'alcalinité varie entre 0.12 et 1.68 sur l'ensemble des sites échantillonnés. L'ensemble de cette zone est fait en sol alcalin et donc de nature basique. Elle se trouve en forte concentration sur les sites Houkpotonnou, Tohonou-Dadahoue, Tohonou-Fifadji, Kpinnou, Agontimey, Kponnou et Logbo sauf sur les sites Houin et Duimey où elle est très faible. Aussi, sur les sites Houkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Kpinnou et Logbo, nous constatons une diminution de sels dissous vers la profondeur et sur les Tohonou-Dadahoue et Kponnou une augmentation vers la profondeur.

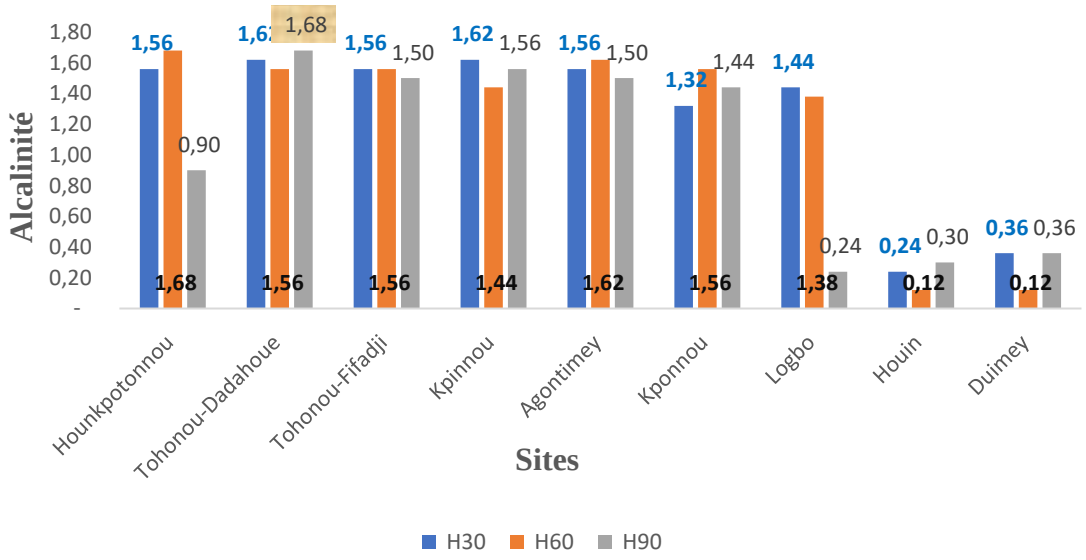


Figure 13 : Variation de l'alcalinité du sol

Conductivité électrique

La figure 14 présente la variation de la conductivité électrique de l'eau du sol. Elle renseigne généralement la teneur d'une eau en sels dissous. De cette figure, il ressort que la conductivité électrique n'est pas homogène sur l'ensemble des sites échantillonnés. La plus forte valeur observée est de 949 µS/Cm et est située au niveau du site de Houin et la plus faible valeur est de 96 µs/Cm au niveau du site de Duimey. On note une augmentation de la conductivité sur les sites Tohonou-Fifadji, Kponnou et Duimey vers la profondeur et une diminution sur les sites Tohonou-Dadahoue, Kpinnou et Houin de la surface vers la profondeur. Sur les sites de Hounkpotonnou, Agontimey et Logbo, on constate une variation non homogène.

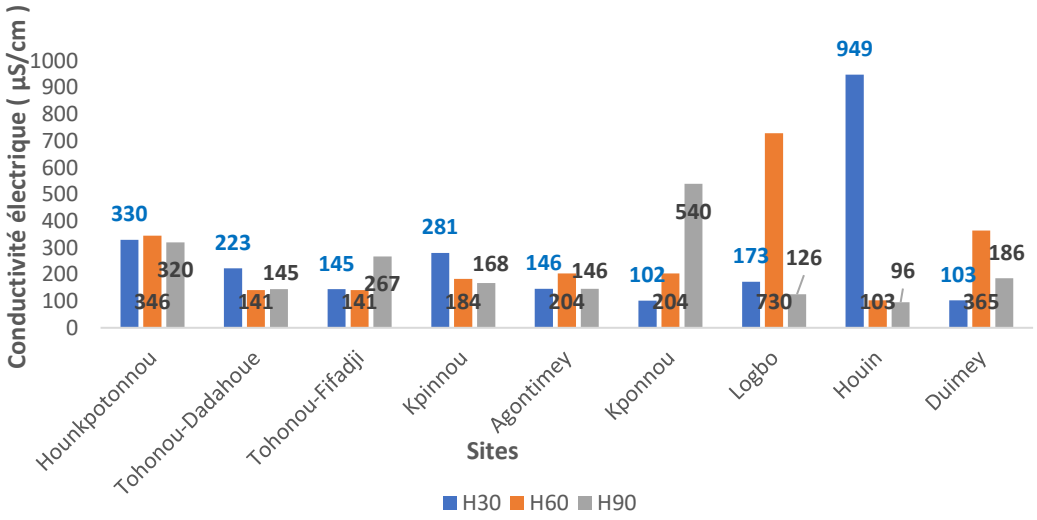


Figure 14 : Variation de la conductivité électrique des sols échantillonnés

Carbone organique

La figure 15 présente la variation du carbone organique. Ce carbone organique varie entre 5% et 20%. La teneur en carbone organique du sol varie de façon considérable de la surface et diminue progressivement dans les profondeurs. En évoluant vers la profondeur, le carbone organique augmente sur les sites de Hounkpotonnou, Kpinnou, Kponnou et Houin tandis qu'elle diminue sur les sites Tohonou-Dadahoue, Tohonou-Fifadji, Agontimey et Logbo. Sur le site de Duimey la teneur reste constante. Cette présence permanente de carbone organique fait de ces sites des milieux riches en matières organiques.

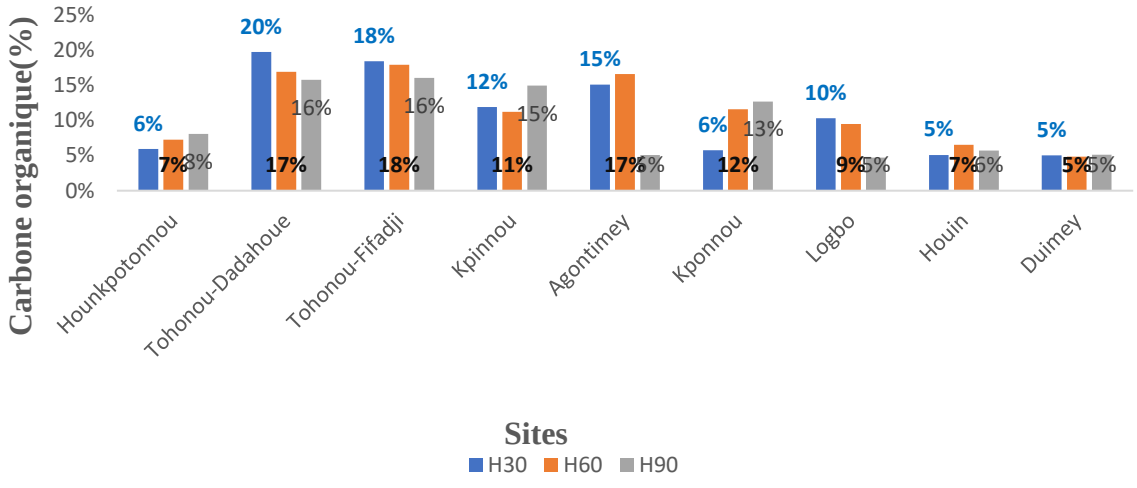


Figure 15 : Variation de la teneur du carbone organique dans le sol

Carbone inorganique

La figure 16 présente la variation du carbone inorganique. Elle varie entre 2% et 34%. En effet, le carbone inorganique du sol est un des composants clés du réservoir mondial de carbone du sol des zones humides et qui jouent un rôle fondamental dans le cycle du carbone. Ce carbone inorganique se trouve donc sur l'ensemble des sites à un fort pourcentage. Il ressort de la figure que le carbone inorganique diminue de la surface vers la profondeur sur les sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Agontimey, Kponnou, Logbo, Houin et Duimey et augmente par contre sur les sites Tohonou-Dadahoue et Kpinnou.

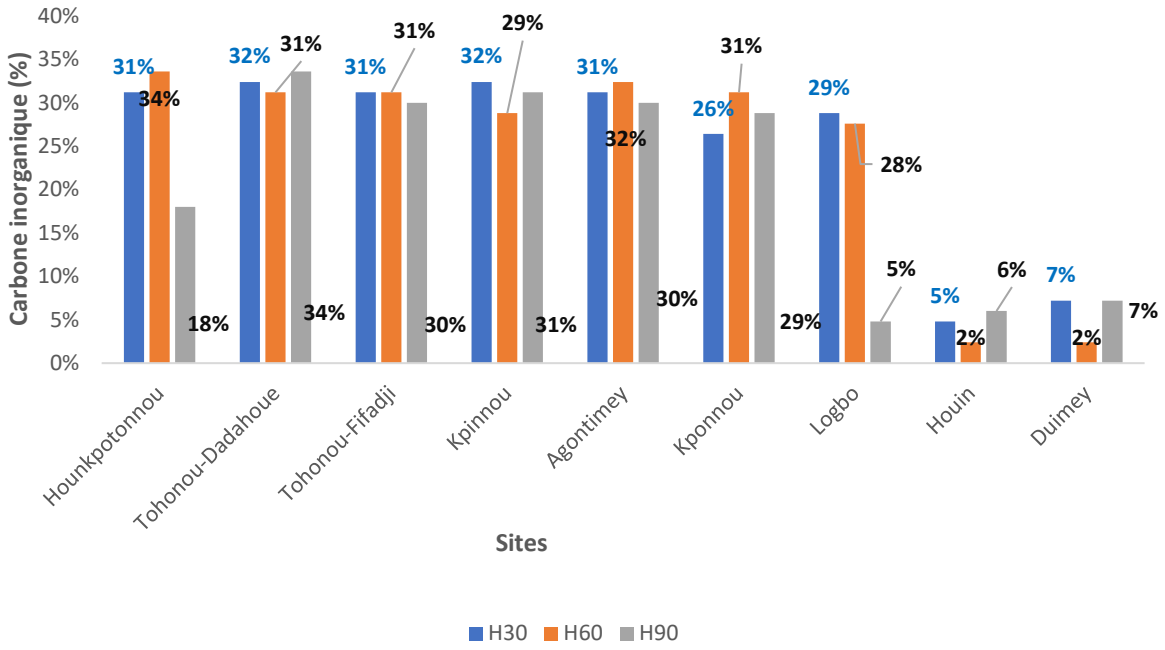


Figure 16 : Variation de la teneur du carbone inorganique

Carbone total

La figure 17 montre qu'il y a une diminution de carbone total sur les sites Hounkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Agontimey, Kponnou et Logbo de la surface vers la profondeur et une augmentation sur les sites Tohonou-Dadahoue, Kpinnou, Houin et Duimey en évoluant vers la profondeur. Elle présente la variation du carbone total dans les sols de chaque site échantillonné. Le carbone organique total varie entre 5% et 44%. Il nous permet d'évaluer la quantité de matière organique présente dans des échantillons de sols prélevés.

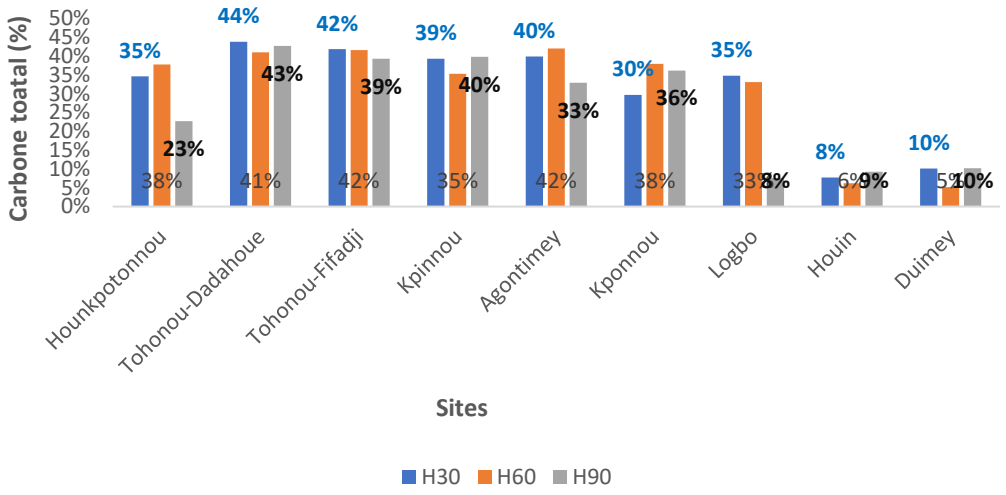


Figure 17 : Variation du carbone total dans le sol

Granulométrie

La figure 18 présente les différentes fractions du sol de notre zone d'étude. L'ensemble des sols échantillonnés est riche en sable du site Hounkpotonnou à Duimey. On constate aussi que l'argile est en faible proportion sur la majorité des sites sauf à Agontimey et à Duimey qui présente de fortes proportions. Les limons sont inexistants sur l'ensemble des sols.

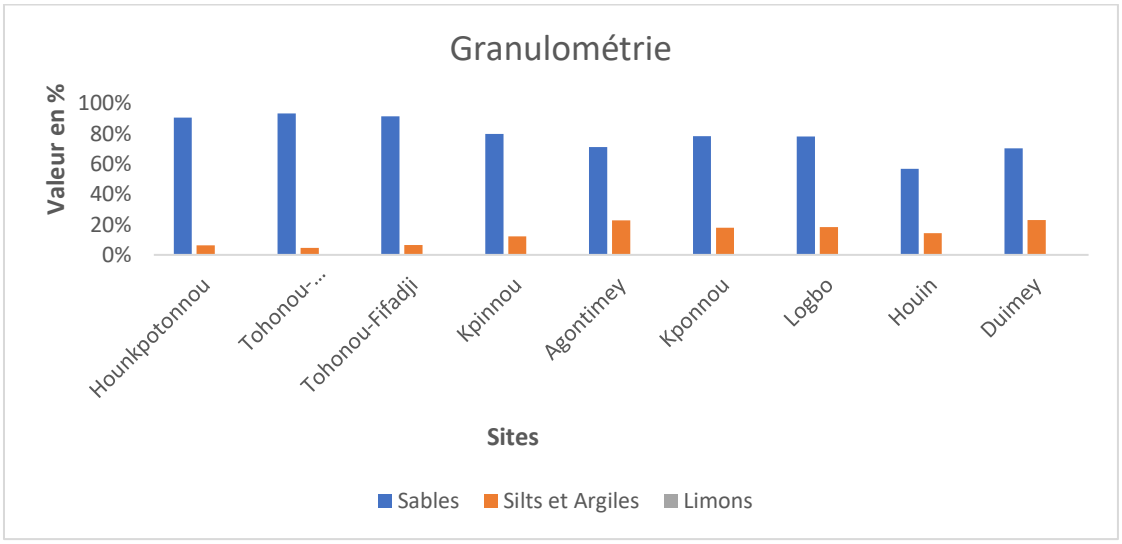
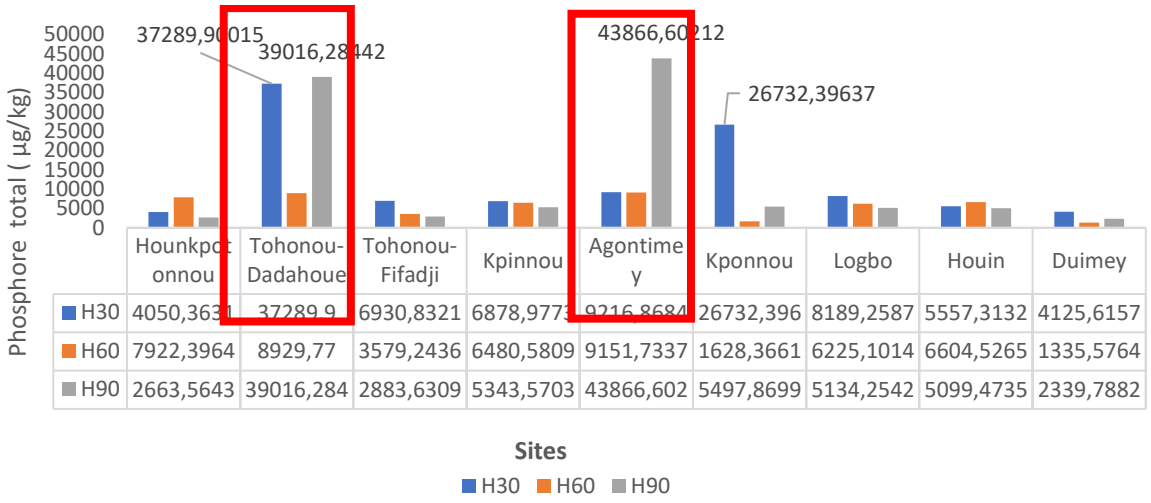


Figure 18 : Différentes fractions du sol

Phosphore total

La figure 19 présente la variation de la teneur en phosphore total au niveau des sols cultivés de notre zone d'étude. On observe une variation significative au niveau de certains sites de la surface vers la profondeur. Elle varie entre 1336 µg/kg et 43867 µg/kg. En évoluant vers les profondeurs, on constate que le phosphore diminue sur les sites de Hounkpotonnou, Tohonou-

Fifadji, Kpinnou, Logbo, et Houin par contre augmente sur les sites de Tohonou-Dadahoue, Agontimey et Duimey. Elle est remarquable au niveau des sites Tohonou-Dadahoue, Agontimey et Kponnou où les concentrations atteignent environ les 44 000 µg/kg.



	Hounkpotonnou	Tohonou-Dadahoue	Tohonou-Fifadji	Kpinnou	Agontimey	Kponnou	Logbo	Houin	Duimey
H30	4050,3631	37289,9	6930,8321	6878,9773	9216,8684	26732,396	8189,2587	5557,3132	4125,6157
H60	7922,3964	8929,77	3579,2436	6480,5809	9151,7337	1628,3661	6225,1014	6604,5265	1335,5764
H90	2663,5643	39016,284	2883,6309	5343,5703	43866,602	5497,8699	5134,2542	5099,4735	2339,7882

Figure 19 : Variation de la teneur en phosphore total du sol

4.2. Résultats des teneurs en ETM des sols cultivés et des eaux de ruisseaux autour du lac Toho

Les teneurs en éléments traces métalliques se présentent comme suit dans les sols cultivés autour du lac Toho.

4.2.1. Résultats d'analyse des teneurs en ETM des sols cultivés autour du lac Toho

- **Plomb**

D'après la figure 20, nous constatons que le plomb est quasi- inexistant sur l'ensemble des sites échantillonnés sauf sur les sites Hounkpotonnou, Agontimey et Logbo. Aussi, les concentrations en plomb sont observées à partir d'une profondeur de 60 à 90 cm à des proportions de 0.002 mg/kg au niveau des sites de Hounkpotonnou et Logbo tandis qu'on observe une baisse au niveau du site Agontimey une faible concentration de 0.001 mg/kg.

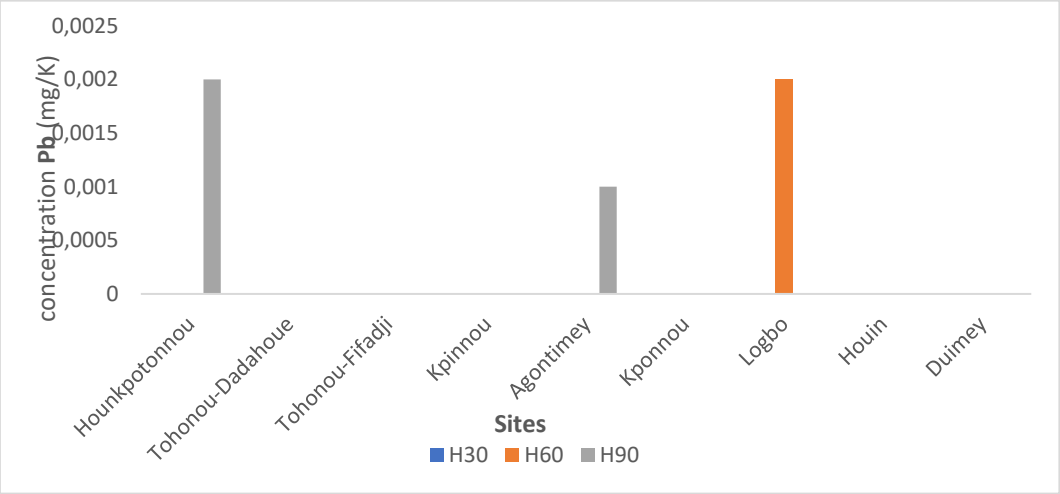


Figure 20 : Variation du plomb

Chrome

La figure 21 présente la variation de l'élément chrome au niveau des sols cultivés. Il ressort de l'analyse que de la surface vers la profondeur de H30 à H90, la concentration varie entre 0.036 mg/kg et 0.046 mg/kg, mais reste constante au niveau des sites Tohonou-Dadahoue à Logbo puis augmente au niveau des sites Houin et Duimey. On note également au niveau du site à l'horizon 60 cm une concentration importante 0.047 mg/kg, mais par la suite reste variable suivant les horizons et les sites. Dans les profondeurs, on remarque que la concentration varie très faiblement d'un horizon à un autre puis diminue de surface vers la profondeur.



Figure 21 : Variation du chrome

Mercure

La figure 22 présente la concentration du mercure dans les sols. Après analyse, nous constatons que le mercure est absent dans les sols cultivés entourant le lac.

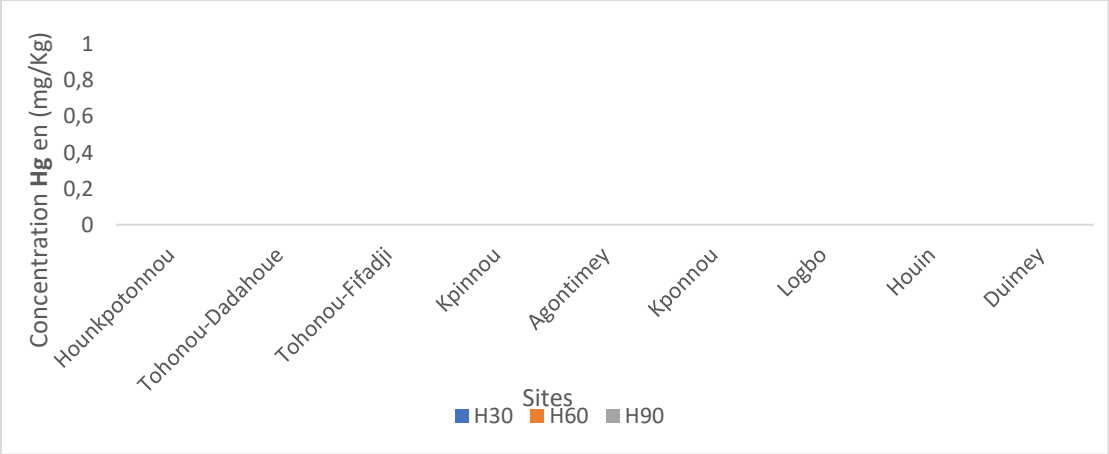


Figure 22 : Variation du mercure

- **Cadmium**

La figure 23 présente la concentration du Cadmium dans les sols cultivés. Après analyse le cadmium est quasi-absent à la surface du sol, mais se retrouve particulièrement sur les sites Hounkpotonnou, Agontimey et Duimey à partir des profondeurs de 90 cm. On note aussi que les concentrations diminuent progressivement des sites de Hounkpotonnou (0.003mg/kg), site Agontimey (0.002 mg/kg) et le site Duimey (0.001 mg/kg).

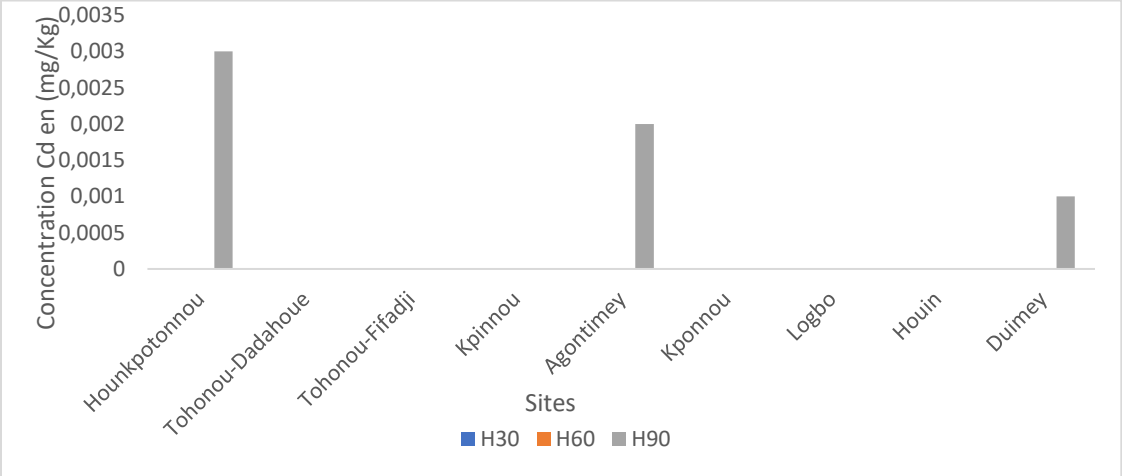


Figure 23 : Variation du Cadmium

- **Nickel**

La figure 24 montre que le Nickel est présent dans tous les horizons du sol et sa concentration varie de 0.02 à 0.17 mg/kg suivant les sites et horizons. On observe de très faibles concentrations qui se traduisent par une diminution vers la profondeur notamment sur les sites de Tohonou-Dadahoue, Kpinnou, Kponnou, Houin et Duimey tandis qu'elle augmente sur les sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Agontimey et Logbo vers la profondeur. On note aussi que sur le site de Tohonou-Dadahoue, le Nickel est absent sur les horizons H30 et H90 cm.

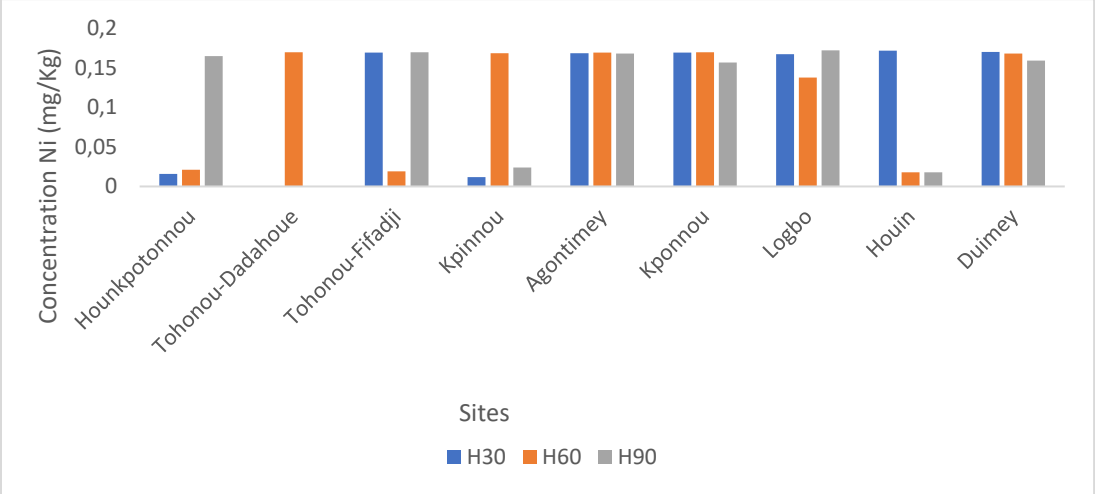


Figure 24 : Variation du nickel

Arsenic

La figure 25 montre la variation de la teneur de l'arsenic sur les sols. Nous constatons que l'arsenic est totalement absent dans les sols cultivés se trouvant autour du lac Toho.

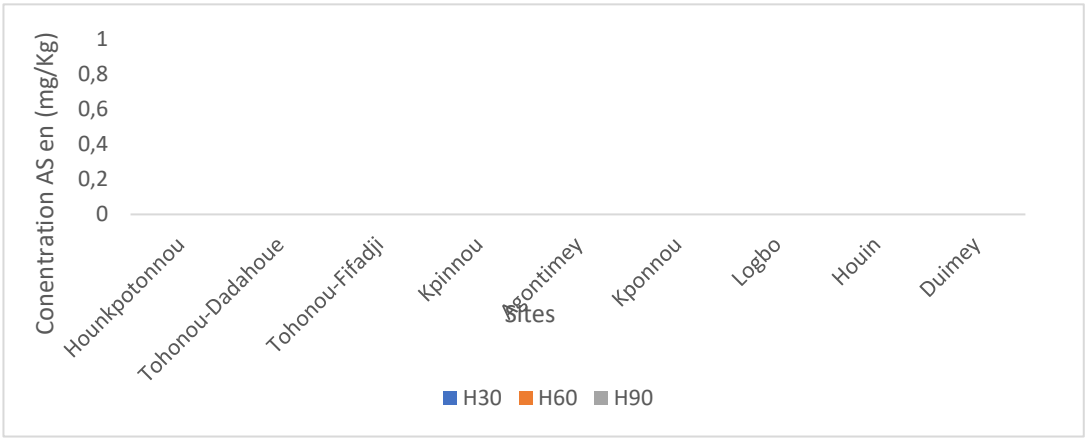


Figure 25 : Variation de l'arsenic

Manganèse

La figure 26 montre la variation du manganèse sur les différents sites échantillonnés. Le manganèse est présent dans tous les horizons du sol et les concentrations varient d'un site à un autre suivant les profondeurs. La concentration en manganèse décroit sur les sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Dadahoue, Agontimey et Duimey vers la profondeur par contre sur les sites Tohonou-Fifadji, Kpinnou, Kponnou, Logbo et Houin une augmentions vers les profondeurs. La plus grande valeur sur le site Tohonou-Dadahoue et la plus petite sur le site Duimey.

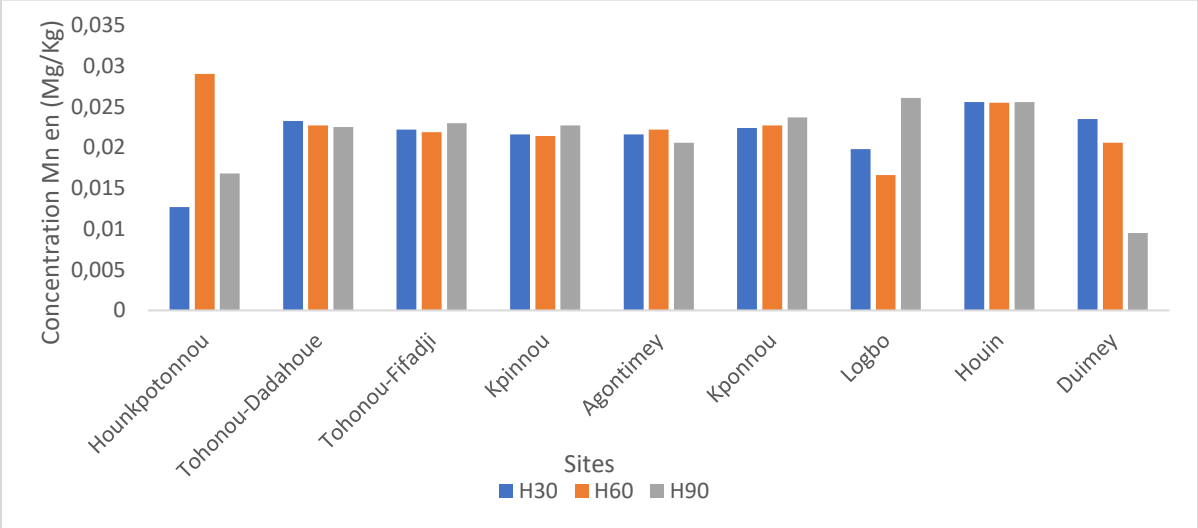


Figure 26 : Variation du manganèse

Cuivre

La figure 27 présente la variation du cuivre sur les sols échantillonnés. Après analyse, il ressort de cela que le cuivre se trouve de façon significative dans les sols cultivés autour du lac Toho. Sa concentration varie entre 0.22 et 0.6 mg/kg. On note une diminution de sa concentration sur les sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Kpinnou, Kponnou et Houin en évoluant vers la profondeur et une augmentation sur les sites Tohonou-Dadahoue, Agontimey et Duimey. Sur le site de Houin uniquement, il est resté constant.

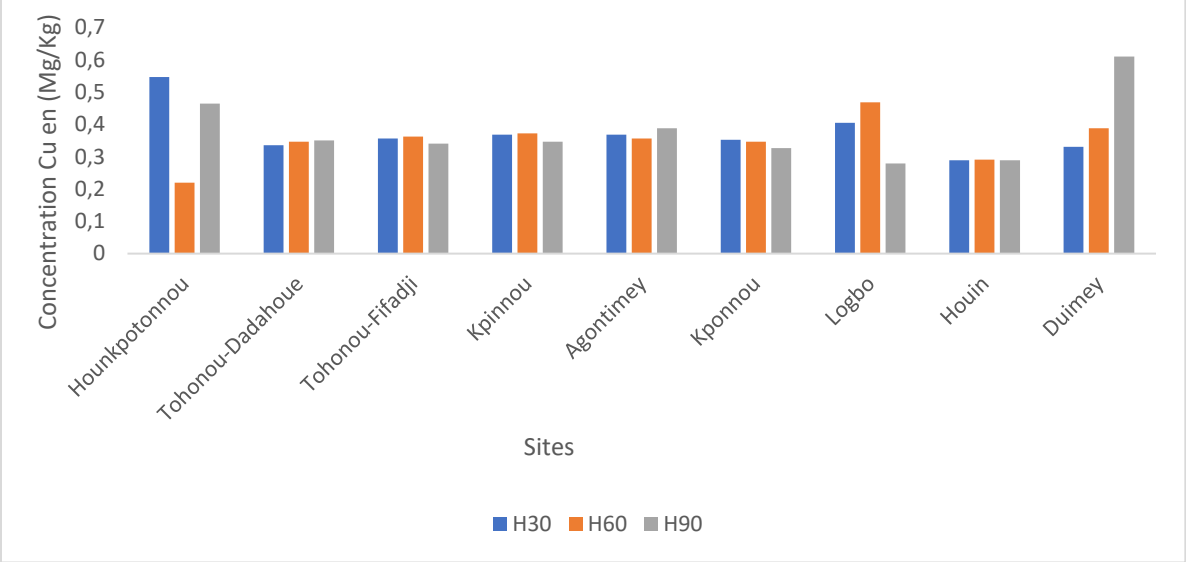


Figure 27 : Variation de cuivre

- **Zinc**

La figure 28 montre que le zinc se trouve dans le sol des différents sites échantillonnés. On remarque que sa concentration à la surface H30 du sol au niveau des sites de Hounkpotonnou et Logbo est très faible. De même au niveau du site de Duimey en profondeur H90 cm on constate que sa concentration diminue significativement par rapport au site de Hounkpotonnou où on retrouve son pic pour 0.075 mg/kg. Sur les sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Kpinnou, Kponnou, Logbo et Houin en évoluant vers la profondeur la concentration en zinc augmente, mais diminue sur les sites Tohonou-Dadahoue, Agontimey et Duimey vers la profondeur.

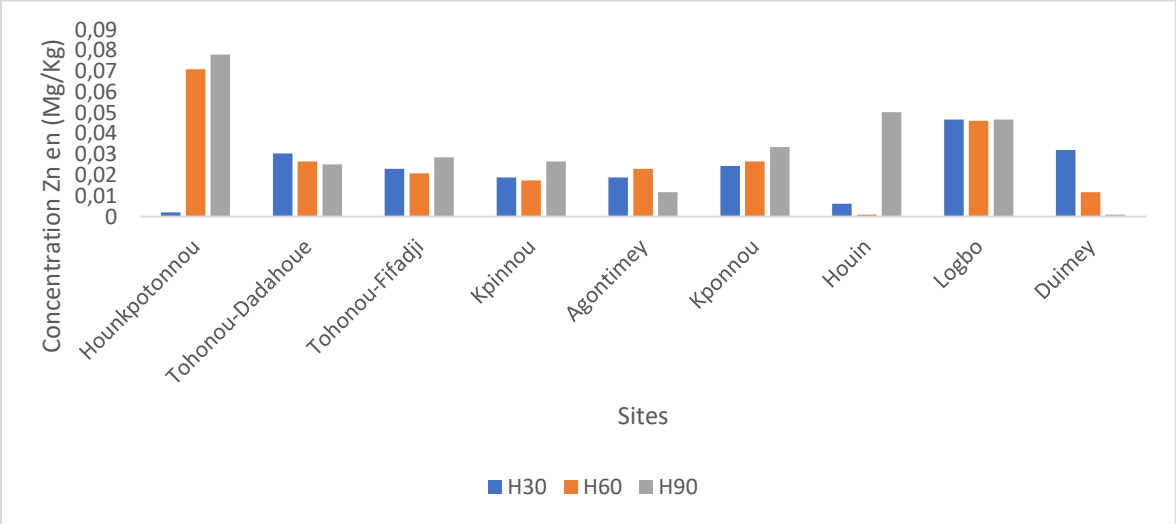


Figure 28 : Variation de zinc

- **Fer**

La figure 29 présente la concentration en fer sur les sites échantillonnés. Le fer est totalement présent dans tous les compartiments de la zone d'étude puisqu'on le retrouve avec des concentrations presque constantes. On note également que malgré sa disponibilité dans les sols de notre zone d'étude, en suivant son évolution vers la profondeur sa concentration augmente sur les sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Dadahoue, Agontimey et Duimey, mais diminue sur sites Tohonou-Fifadji, Kpinnou, Kponnou, Logbo de la surface vers la profondeur et reste constante sur le site Houin. La plus grande concentration est observée sur le site de Duimey (2.7 mg/kg) et la plus petite au niveau du site Hounkpotonnou 1.7 mg/kg.

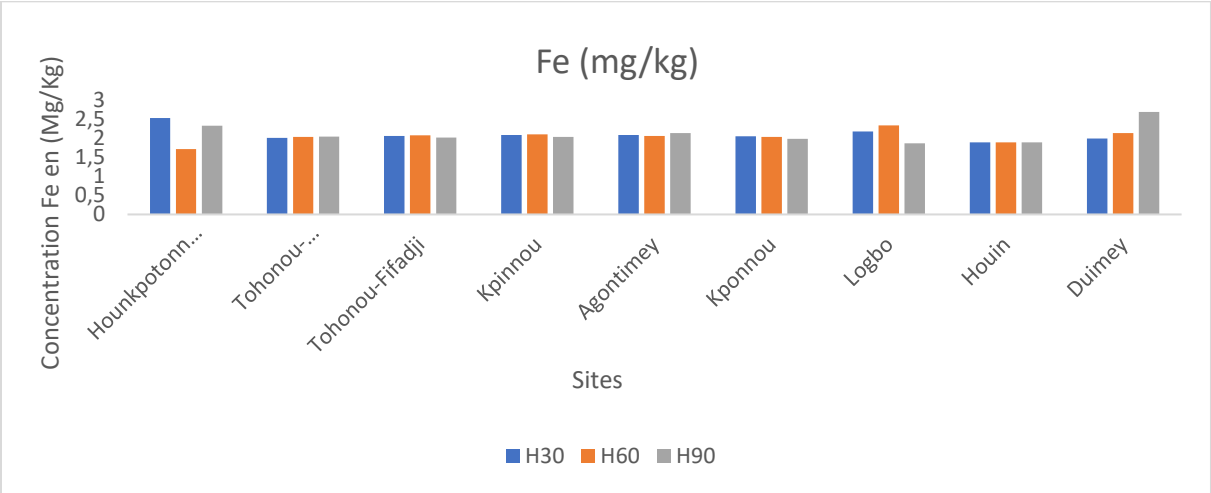


Figure 29 : Variation de fer

4.3. Étude comparative des ETM

La figure 30 ci-dessous présente une analyse comparative des éléments traces métalliques dans les sols cultivés autour du lac Toho. Il ressort qu'au niveau de l'ensemble que c'est le fer qui domine. Ce dernier se trouve en forte proportion environ 2 .7 mg/Kg par rapport aux autres métaux qui font moins de 1 mg/Kg. Aussi, le fer est présent sur la surface du sol, mais aussi au niveau intermédiaire on trouve le Nickel dont la teneur est inférieure à 0.5 mg/Kg. Dans les profondeurs de ces différents sites entourant le lac, on trouve une faible quantité de cuivre. Sur l'ensemble seulement six métaux à savoir le chrome, du nickel, du manganèse, du cuivre, du zinc et le fer présentent des concentrations significatives par aux autres métaux arsenic, plomb, cadmium et le mercure.



Figure 30 : Analyse comparative des ETM

4.4. Résultats d'analyse des teneurs en ETM des eaux de ruisseaux autour du lac Toho

La figue 31 présente la variation de la teneur des éléments traces métalliques dans les eaux des ruisseaux autour du lac Toho. Sur l'ensemble des sites où l'eau de ruisseau a été échantillonnée, on constate que seulement six métaux sont disponibles, il s'agit du chrome, du nickel, du manganèse, du cuivre, du zinc et le fer et les autres sont absents dans le milieu. Seuls le cuivre et le fer sont abondants dans les eaux de ruisseau.

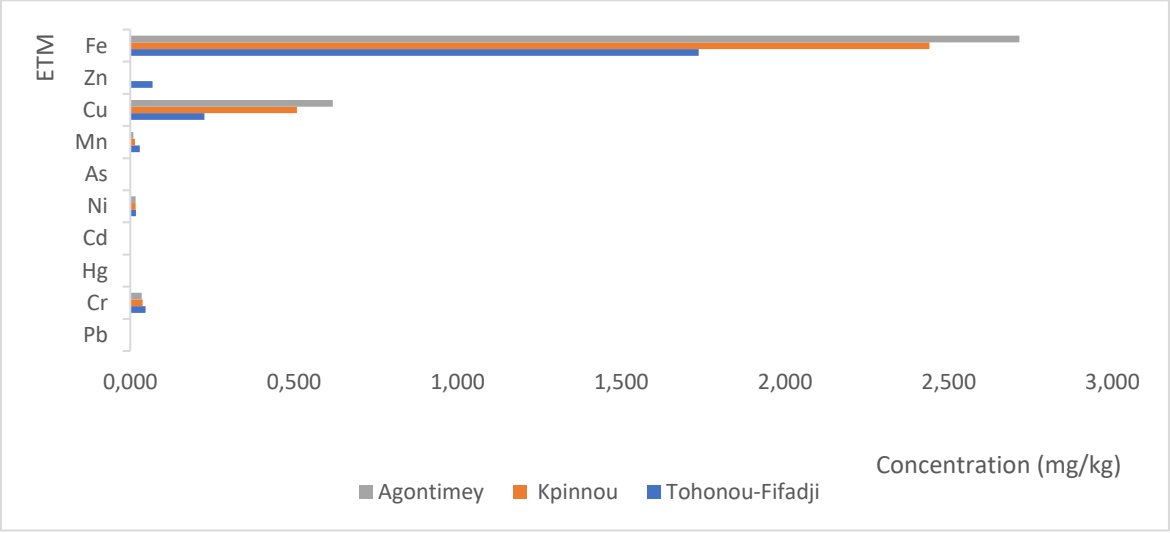


Figure 31 : Variation des teneurs en ETM dans les ruisseaux autour du lac Toho

4.5. Résultats des analyses en composantes principales (ACP)

Dans le but d'établir une relation entre les différents éléments traces métalliques suivant les horizons et pour mieux évaluer l'effet des activités anthropiques sur la qualité des sols cultivés

autour du lac Toho, un traitement statistique ACP a été appliqué à l'ensemble. Pour cela, 09 sites qui correspondent aux sols échantillonnés ont subi le traitement des données par l'analyse en composantes principales. Nous avons utilisé 21 variables : Pb90, Cr30, Cr60, Cr90, Cd90, Ni30, Ni60, Ni90, Mn30, Mn60, Mn90, Cu30, Cu60, Cu90, Zn30, Zn60, Zn90, Fe30, Fe60, Fe90. Les deux premières composantes de la figure 32 représentent 69.60% de la variance total. La composante 1 (47.12% de la variance totale) ont teneurs élevées en Fe30, Pb90, Cu30, Cr60, Mn60, Zn60, Mn30, Cr30, Cr60 suivant la profondeur et à la teneur en argile et de la formation des oxydes de fer ainsi qu'à la réduction des propriétés des sols en pHeau, en EC et la composante 2 (22.48% de la variance totale) ont des teneurs élevées en Fe90, Cr90, Mn90 dans les horizons de 90 cm. Les variables explicatives sont généralement proches du cercle de corrélation. Toutes les variables sont donc bien représentées sauf Ni30, Ni90 et Zn30. Sur la figure 32, Fe30, Pb90, Cu30 sont fortement corrélés entre eux et moyennement corrélé avec le Cd90, mais aussi avec la composante 1. De même, Mn60 et Cr60 sont fortement corrélés entre eux, mais moyennement corrélés avec Zn90. Aussi, Cr30 et Mn30 sont fortement corrélés entre eux, mais aussi avec la composante 2. Les teneurs obtenues de ces métaux peuvent résulter des actions combinées de leurs teneurs dans la roche mère et aussi de leur capacité à s'accumuler dans des sols altérés.

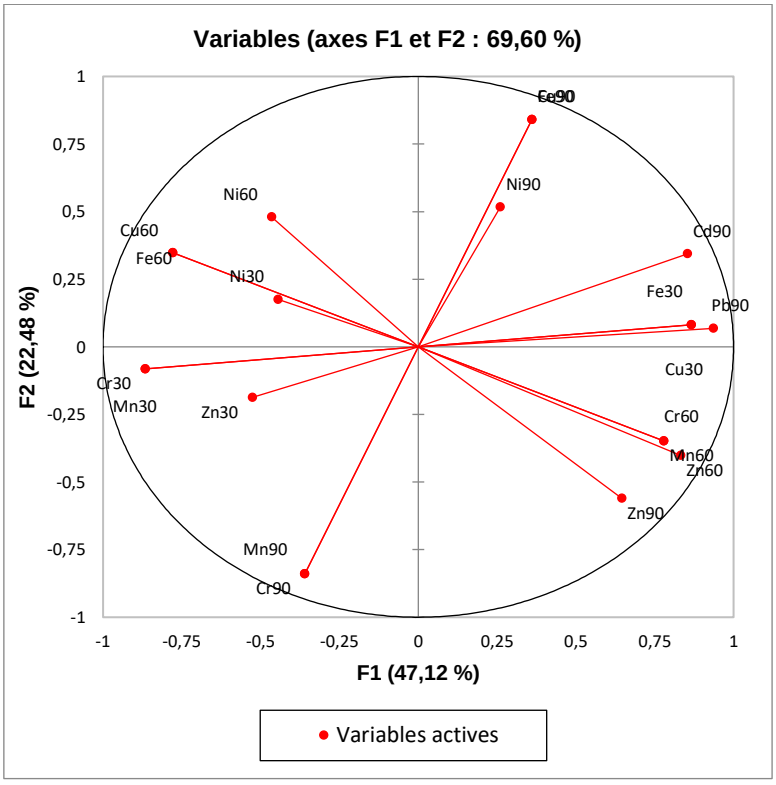


Figure 32 : Cercle de corrélation montrant la répartition des éléments traces métalliques

De la figure 33 les sites de Hounkpotonnou et Agontimey sont riches en Pb, Cd, Cu et Fe dans l'horizon 90 cm et les éléments tels Cr, Mn, Zn et Ni sont uniquement dans les horizons 60 cm. Aussi, le Zn, Mn et Cr sont abondants dans les horizons 30 cm du site 8 et Ni est présent seulement dans les horizons 30 cm des sites Tohonou-Dadahoue, Kponnou et Duimey. On note une forte présence de Mn et Cr dans les horizons 90 cm des sols du site Tohonou-Fifadji. De même, les éléments Cu et Fe se retrouvent dans les horizons 30 cm des sols et aussi le Zn et Ni dans les horizons 90 cm des sols des sites Kpinnou et Logbo.

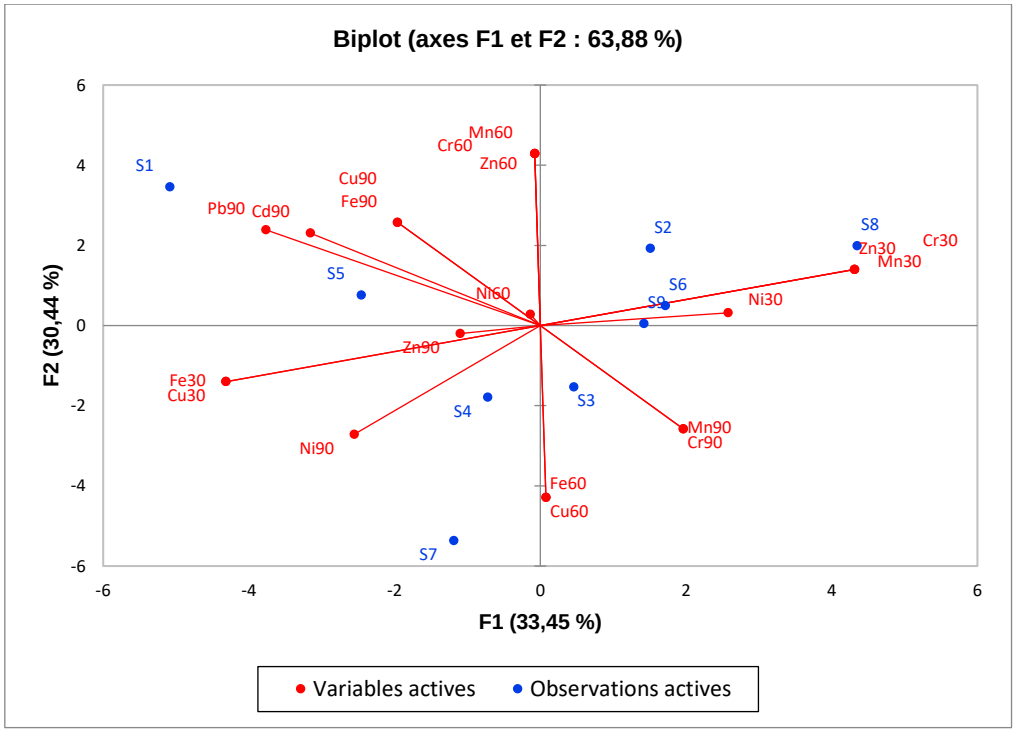


Figure 33 : Répartition des sites d'échantillonnage sur le graphe factoriel

Analyse en composante principale entre les différents paramètres

De la figure 34, montre la relation entre les différents paramètres physico-chimiques et des éléments traces métalliques afin de mieux évaluer l'effet de la pollution anthropique sur la qualité des sols cultivés autour du lac Toho. Pour cela 9 sites correspondants aux prélèvements des sols ont subi un traitement des données pour l'analyse en composante principale ACP. A cet effet, nous avons 15 variables : Cr30, Ni30, Mn30, Zn30, Fe30, pH30, T°C30, Humidité30, CE30, CO30, CI30, CT30, Alcalinité30 et MO30. L'analyse du plan factoriel des composante 1 et 2 de la figure 34 montre 82.99% de la variance totale. La composante 1 possède une variance de 52.99% exprimé par l'humidité, MO, CT, Alcalinité et le pH. La composante 2 possède une variance de 30.00% exprimé par la température T°C et la CE conductivité électrique. Les variables explicatives sont celles proches du cercle de corrélation. La plupart des variables sont représentatives sauf le Ni30, le pH30 et le CE30. L'humidité, la matière

organique (MO), l'alcalinité, le carbone organique et le carbone total sont fortement corrélés entre eux mais aussi avec l'axe F1. La température, le Zn30 et Mn30 sont moyennement corrélés entre eux, mais aussi avec l'axe F2.

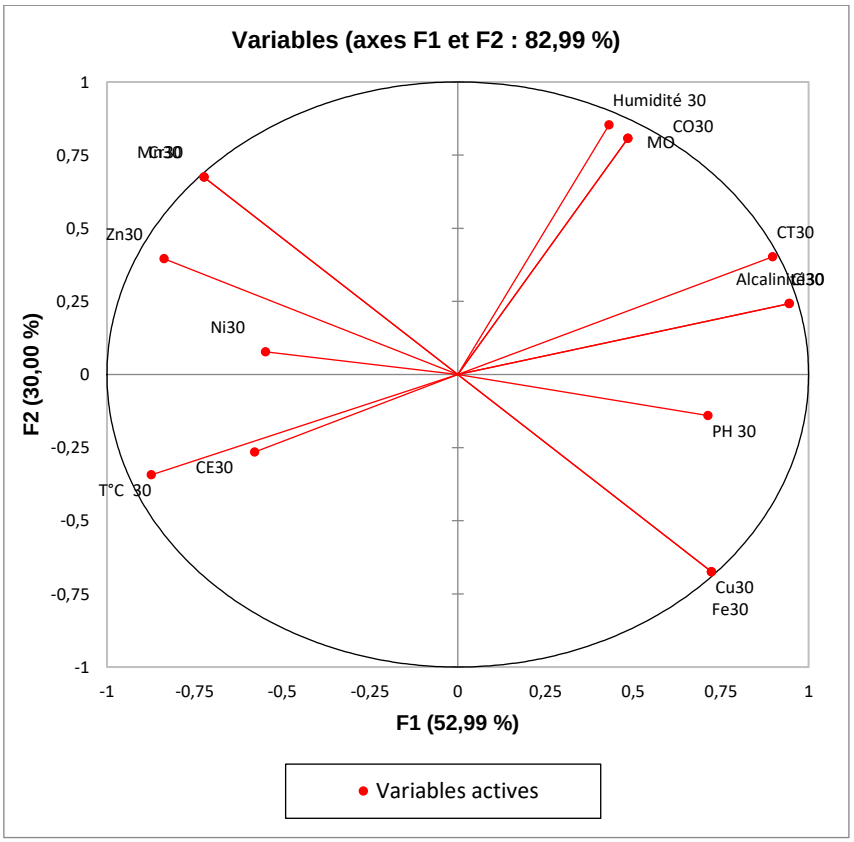


Figure 34 : Corrélations entre variables et facteurs, la projection des variables dans l'espace des Composantes F1 et F2.

La figure 35 présente la répartition des paramètres physico-chimiques suivant les sites. La matière organique, le carbone organique et l'humidité sont parfaitement corrélés entre eux, mais aussi avec le carbone et l'alcalinité sur les sites de Hounkpotonnou à Agontimey. De même, le pH et les éléments traces métalliques comme le fer et le cuivre sont fortement corrélés sur les sites de Hounkpotonnou et Logbo. Aussi, la température et la conductivité électrique sont corrélées avec le nickel, le zinc, le chrome et manganèse dans les horizons 30 cm du sol sur les sites Agontimey, Houin et Duimey.

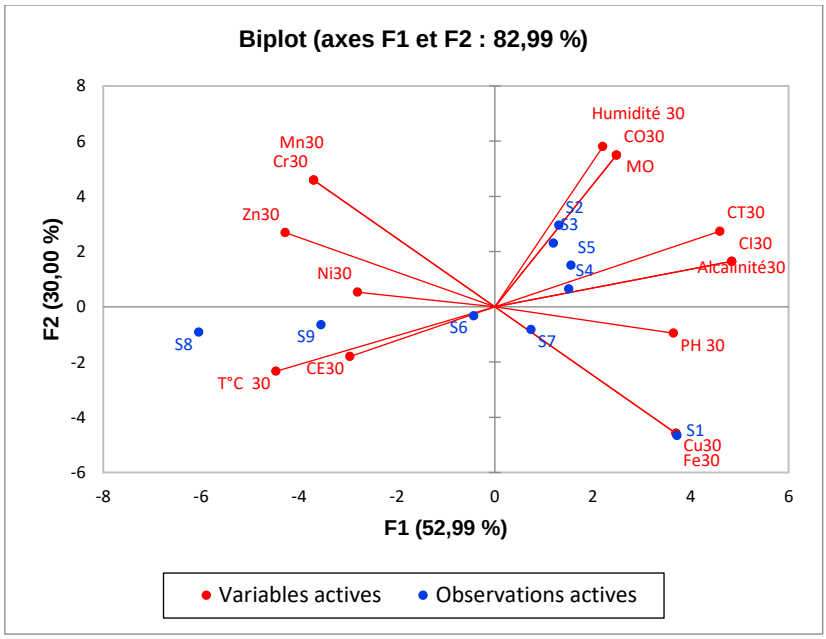


Figure 35 : Répartition de différents paramètres des sites d'échantillonnés sur le graphe factoriel

5. DISCUSSION

D'après les différentes études et enquêtes réalisées dans notre zone d'étude, il ressort de cela que les populations riveraines du lac Toho pratiquent plusieurs activités dont les principales sont l'agriculture et la pêche. Ces activités entrainent une augmentation des éléments chimiques dans ce plan d'eau et ont des effets indésirables sur les espèces aquatiques qui y vivent. Pour augmenter leur rendement, les agriculteurs utilisent divers produits de fertilisation sur le sol. Les propriétés du sol reflètent les facteurs dominants de la formation du sol telles que le matériau parental, le climat, l'organisme et le relief. De même, le comportement des éléments chimiques dans l'environnement ainsi que la prédominance d'une forme particulière dépendent de plusieurs paramètres physico-chimiques.

Les résultats obtenus dans notre zone d'étude ont montré que les sols cultivés autour du lac Toho présentent des pHeau comprise entre 7.89 et 5.23. Les valeurs de pHeau obtenues sont au-dessus des limites de normes Béninoises des sols fertiles [6.6 - 7.2] et conformes aux valeurs de Amonmide et *al.*,2019 [109] qui indique que le pH est situé 5.35 et 7.9. Le pH du sol est considéré comme le principal facteur contrôlant la biodisponibilité des éléments traces métalliques dans le sol [56]. Un pH acide a tendance à favoriser la solubilité des ETM et accroît leur biodisponibilité tandis qu'à l'inverse un pH basique a tendance à diminuer leur mobilité. Aussi (Igue et al., 2013) [110] indique que les valeurs de pH des sols du Bénin sont situées entre 6,6 et 7,2 dans les zones de culture. Étant un paramètre prépondérant, le pH fixe les

concentrations des différentes espèces en solutions [111]. Cependant, les conditions acides sont favorables à la mobilisation des éléments traces [36]. Le pH du sol joue également un rôle important dans la mobilité des métaux traces et constitue un facteur important qui influence la solubilité du métal et donc sa toxicité [112].

Les valeurs observées de la température se situent entre 26,3 °C et 28,9 °C et peuvent être justifiées par les conditions climatiques ou l'heure de l'échantillonnage. Certes, toute variation brusque de ce paramètre entraine une perturbation dans l'équilibre de l'écosystème aquatique. La température constitue un facteur de différenciation écologique, car elle agit sur toutes les phases du développement des plantes [113]. Elle peut être à la base de plusieurs réactions chimiques dans le sol.

En dehors de la température, l'humidité constitue un paramètre essentiel. La surveillance de l'humidité du sol est importante et permet la dissolution des nutriments du sol et autres éléments pour favoriser leur biodisponibilité. Les résultats obtenus montrent que l'humidité varie entre 3 % et 36 % vers les profondeurs. Elle est abondante sur les sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Agontimey, Kponnou et Houin dont la plupart se trouvent à proximité immédiat du lac et les autres étant un peu plus éloignés. Dans les zones de bas-fonds, les couches superficielles sont plus humides et renferment plus d'eau compte tenu de nature argileuse de cette partie du sol de ces localités (figure 18).

Pour ce qui concerne la matière organique, elle occupe un rôle important dans les cycles diagenétiques, car elle est le carburant (réducteur) à l'origine de nombreuses transformations dans les sédiments, en présence de bactéries [114]. La concentration de la matière organique obtenue après analyse dans cette étude est comprise entre 3 à 11 %. Dans la majorité des sites, la couche superficielle renferme un fort taux de la matière organique et diminue avec la profondeur. Ainsi, selon (Grandière et *al*.,2007) [115] la proportion de la M.O séquestrée qui est localisée dans les fractions fines du sol est plus importante que celle localisée dans les autres fractions. C'est ce qui explique d'ailleurs de fortes proportions sur la couche superficielle du sol des sites de Tohonou-Dadahoue, Tohonou-Fifadji, Agontimey et Logbo comparés aux autres. Selon les études menées par (Bassala et *al*., 2008) [116] les sites à sols très sableux et ont de très faibles teneurs en matière organique. Or, les sols sahariens sont généralement connus pour être carencés en matière organique et en éléments minéraux indispensables aux végétaux. Ces sols ont généralement une teneur en matière organique (MO) inférieure à 0,1 % [117] ; [118] ; [21] ; [119].

Quant à la conductivité électrique (CE), elle permet d'évaluer rapidement et approximativement la minéralisation globale. Sa mesure constitue une appréciation du degré de minéralisation de

l'eau du sol. Dans les sols au niveau des couches superficielles la conductivité électrique est généralement inférieure 1000 µS / Cm. Les valeurs de conductivité dans tous les sites sont supérieures à 96 µS/Cm et atteignent 949 µS/Cm sur le site de Houin, ce qui peut entrainer une perturbation du milieu. Ceci peut s'expliquer par le lessivage des sols qui draine les sels en profondeur et par la consommation d'une partie des éléments minéraux apportés, par les plantes et la faune du sol [120].

Le phosphore est un élément rare dans la biosphère, et indispensable à la vie des plantes. De ce fait, il tend à devenir un facteur limitant primordial dans de nombreux écosystèmes aussi bien terrestres qu'aquatiques dont il conditionne donc la productivité. À partir des résultats de notre étude, il ressort que la fraction organique prédomine sur la couche supérieure du sol. On observe une affinité du phosphore avec la matière organique sur les couches dues à la forte teneur de la matière organique enregistrée. La fraction liée au fer prédomine sur la couche inférieure à partir de 60 Cm. Cette observation est due à la nature ferrallitique du sol. La première couche du sol est constituée des débris, des feuilles mortes et autres, en dessous de cette couche se trouve le sol riche en fer pour la majorité des sites. Le phosphore apporté au sol sous forme d'engrais évolue vers des formes de moins en moins biodisponibles. Les risques de pollution des sols seront liés à l'entrainement de particules ou à la présence de formes organiques. Dans les hydrosystèmes, les risques d'eutrophisation dépendront du phosphate soluble, mais également des équilibres entre phosphore soluble et phosphore présent sur les matières en suspension ou dans les sédiments [22]. La disponibilité du phosphore est sujette à plusieurs processus physico-chimiques comme la précipitation, l'adsorption et la réorganisation microbienne. C'est ce qui explique la diminution du phosphore total [121] dans le sol des sites de Hounkpotonnou, Tohonou-Fifadji, Kpinnou, Kponnou, Logbo, Houin et Duimey. La pollution des sols et des plans d'eau en Afrique est souvent le résultat d'une extrême pauvreté, du sous-développement économique et social [122]. Elle est parfois due à l'ignorance des populations qui ne perçoivent pas les conséquences des différents rejets et comportements qu'elles occasionnent, ou non-respects des lois-cadres sur l'environnement. Les éléments minéraux présents dans les sols peuvent avoir des éléments traces qui ont des propriétés toxiques, généralement en faible quantité [36]. Les différentes analyses effectuées dans le cadre de ce travail de recherche ont permis d'avoir des résultats importants qui témoignent que six métaux traces prédominent sur l'ensemble des sites constitués majoritairement d'argiles et de sables. Comme les sols agricoles sont sensibles à l'accumulation de métaux lourds par l'utilisation d'engrais et d'autres produits agrochimiques [55] ; [123] ; [124]. De plus, les métaux lourds retrouvés sur les sols cultivés sont également dans les eaux de ruisseaux après analyse et nous permettant d'établir la relation entre les sols cultivés et les eaux du lac. Selon [125] ce sont des contaminants omniprésents qui

se déposent dans le milieu environnemental et s'accumulent dans les masses d'eau, le sol, les plantes et même les organismes. Les concentrations mesurées de chaque métal trace dans le sol nous ont permis de constater que certains métaux sont résiduels donc provenant de la roche mère. Cependant, le fer prédomine sur l'ensemble des sites échantillonnés compte tenu de la nature ferrallitique des sols. Il se retrouve en forte proportion dans les deux premiers horizons H30 et H60 cm.

CONCLUSION

CONCLUSION

En définitive, les sols cultivés autour du lac Toho constituent un vecteur de la contamination des eaux du lac par les éléments traces métalliques et du phosphore. Ces dernières sont favorisées par les activités anthropiques dont l'agriculture est au premier plan par usage des engrais chimiques. Ainsi, le sol joue son rôle de réacteur biologique et physico-chimique de sorte que leur transfert à travers le sol soit suffisamment lent. Au fil du temps et compte tenu de nature du sol, les éléments traces métalliques et le phosphore sont en partie métabolisés par les organismes vivants et mis en circulation dans la chaîne alimentaire.

Les résultats obtenus au terme de cette étude montrent que le lac est sous l'influence d'une pollution métallique et de phosphore en tenant compte de leur seuil. Les analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux de ruisseaux révèlent que ces eaux sont contaminées aux éléments traces métalliques dont présente un risque de toxicité.

De même, nos analyses ont révélé que les sols cultivés autour du lac Toho ne sont soumis à une contamination que par les éléments traces métalliques pour les eaux de ruisseaux en général et par endroit pour les sols cultivés. La qualité chimique des sols présentes donc de risque pour les ressources aquatiques du lac qui sont dans à proximité.

La répartition des éléments traces métalliques (Cr, Ni, Cu, Mn, Zn et Fe) dans les sols échantillonnés montre que les concentrations des ETM étudiés varient selon les sites, ceci peut être la preuve de l'existence de sources localisées de contamination.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES ET WEBOGRAPHIES

[1] AZONSI F, TOSSA A, KPOMASSE M, LANHOUSSI F, ZANNOU A, et GOHOUNGOSSOU A, « AZONSI F., TOSSA A., KPOMASSE M., LANHOUSSI F., ZANNOU A., GOHOUNGOSSOU A., 2008 : atlas hydrographique du Bénin : un système d'information sur l'hydrographie. Cotonou (Bénin), 22p - Recherche Google », 2008. https://docplayer.fr/58113844-Atlas-hydrographique-du-benin-un-systeme-d-information-sur-l-hydrographie.html (consulté le 7 octobre 2022).

[2] « MOJISOLA F., 2008 : création d'une aire marine protégée au Bénin (Afrique de l'Ouest). Rapport de stage, 20p. »

[3] « Les changements générés par cette dynamique ont impacté négativement l'équilibre écologique du paysage (Arouna,2016) - (consulté le 7 octobre 2022).

[4] « Au Bénin, le mystère des poissons morts du lac Toho ». https://www.lemonde.fr/afrique/article/2018/05/25/au-benin-le-mystere-des-poissons-morts-du-lac-toho_5304638_3212.html (consulté le 8 octobre 2022).

[5] A. H. Bu-Olayan et B. V. Thomas, « Research Article: Validating mercury levels in catfish Netuma thalassina (Rüppell, 1837) during and aftermath 'fish kill' in Kuwait Bay », *Iran. J. Fish. Sci.*, vol. 19, n° 6, p. 3151-3159, nov. 2020.

[6] R. A. Olowu *et al.*, « Determination of Heavy Metals in Fish Tissues, Water and Sediment from Epe and Badagry Lagoons, Lagos, Nigeria », *J. Chem.*, vol. 7, p. 215-221, NaN/NaN/NaN, doi: 10.1155/2010/676434.

[7] A. E. Houssainy, « Apports de géochimie sédimentaire des éléments traces métalliques dans deux zones côtières méditerranéennes urbanisées : Beyrouth (Liban) et Toulon (France) », phdthesis, Université de Toulon. Consulté le: 10 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03267841

[8] « Protos. (2011). Livre bleu Bénin : « l'eau, l'assainissement, la vie et le développement humain durable » 101 p. - RefSeek ». https://www.refseek.com/search?q=%EF%83%98%09Protos.+%282011%29.+Livre+bleu+Benin+%3A+%C2%AB+l%E2%80%99eau%2C+l%E2%80%99assainissement%2C+la+vie+et+le+d%C3%A9veloppement+humain+durable+%C2%BB+101+p. (consulté le 11 octobre 2022).

[9] C. Baron et A. Bonnassieu, « Les enjeux de l'accès à l'eau en Afrique de l'Ouest : diversité des modes de gouvernance et conflits d'usages », *Mondes En Dév.*, vol. 156, n° 4, p. 17-32, 2011, doi: 10.3917/med.156.0017.

[10] O. Z. Ibrahim *et al.*, « Distribution spatiale des éléments traces métalliques dans les sols de la zone aurifère de Komabangou au Niger », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 13, n° 1, Art. n° 1, mai 2019, doi: 10.4314/ijbcs.v13i1.43.

[11] A. A. Ouattara, N. Sangare, K. P. dit A. N'goran, K. M. Yao, A. Trokourey, et T. Diaco, « Evaluation de la contamination des éléments traces métalliques dans les sédiments de la rivière N'zi, Côte d'Ivoire: », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 15, n° 5, Art. n° 5, 2021, doi: 10.4314/ijbcs.v15i5.38.

[12] C. Zhang *et al.*, « Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability », *Environ. Int.*, vol. 73, p. 270-281, déc. 2014, doi: 10.1016/j.envint.2014.08.010.

[13] G. J. Gbaguidi, « Contribution à la protection contre des pollutions chimiques des systèmes lentiques en région tropicale : le lac Toho au sud-Benin, Afrique de l'ouest », *Mém. Master*, p. 95, 2018.

[14] E. Kple, « CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA POLLUTION ORGANIQUE ET AZOTEE DES EAUX DU LAC TOHO DANS LE DEPARTEMENT DU MONO », EPAC/UAC, Technical Report, 2008. Consulté le: 12 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: http://biblionumeric.epac-uac.org:8080/jspui/handle/123456789/499

[15] W. K. Chouti, Nelly Kelome, Dorcas Honvou, et N. E. Chitou, « Etude de la spéciation du cuivre et du zinc dans les sédiments de la lagune côtière, de Togbin à Grand-Popo (Sud-Ouest Bénin) - ». https://docplayer.fr/182187038-Etude-de-la-speciation-du-cuivre-et-du-zinc-dans-les-sediments-de-la-lagune-cotiere-de-togbin-a-grand-popo-sud-ouest-benin.html (consulté le 11 octobre 2022).

[16] A. Aucejo, J. Ferrer, C. Gabaldón, P. Marzal, et A. Seco, « Diagnosis of boron, fluorine, lead, nickel and zinc toxicity in citrus plantations in Villarreal, Spain », *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 94, n° 3, p. 349-360, mars 1997, doi: 10.1007/BF02406067.
[17] S. Faucher, « Développement de méthodes d'évaluation de la teneur en éléments trace pour la qualité sanitaire des récoltes », Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, 2013. Consulté le: 15 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: http://www.theses.fr/2013PAUU3042/document
[18] X. Mao, R. Jiang, W. Xiao, et J. Yu, « Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: a review », *J. Hazard. Mater.*, vol. 285, p. 419-435, 2015.
[19] R. Ahmad *et al.*, « Phytoremediation potential of hemp (Cannabis sativa L.): identification and characterization of heavy metals responsive genes », *CLEAN–Soil Air Water*, vol. 44, n° 2, p. 195-201, 2016.
[20] M. V. P. Campos, « Contribution à l'étude des transporteurs de phosphate de la famille PHT1 chez le Peuplier (Populus trichocarpa Torr. & Gray) et le champignon ectomycorhizien Laccaria bicolor (Maire) PD Orton », PhD Thesis, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2008.
[21] P. Dutil, « Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara », PhD Thesis, Sc. nat.: Strasbourg: 1971; no 694., 1971.
[22] K. ben aissa, « Effet du mode d'apport de la fumure phosphatée sur une culture de blé en sol calcaire », masters, Université Mohamed Khider - Biskra, 2017. Consulté le: 5 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: http://thesis.univ-biskra.dz/3070/
[23] N. RAKOTOZANDRINY, « ETUDE ET MODELISATION DE LA BIODISPONIBILITE DU ETUDE ET MODELISATION DE LA BIODISPONIBILITE DU PHOSPHORE DANS UN SOL CULTIVE DE MADAGASCAR E MADAGASCAR E MADAGASCAR EN FONCTION EN FONCTION EN FONCTION DES PRATIQUES CULTURALES PRATIQUES CULTURALES », PhD Thesis, Université d'Antananarivo, 2009.
[24] I. C. R. Holford, « Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants », *Soil Res.*, vol. 35, n° 2, p. 227-240, 1997.
[25] C. Morel *et al.*, « Evolution sur 12 ans de la solubilité, mobilité et lixiviation du phosphate dans un sol ayant massivement reçu du lisier », *Etude Gest. Sols*, vol. 44, n° 4, p. 403-418, 2004.
[26] G. Gangbazo, J. Roy, et A. Le Page, « Capacité de support des activités agricoles par les rivières : le cas du phosphore total », mars 2005. https://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1145/ (consulté le 6 novembre 2022).
[27] C. Hahn, V. Prasuhn, C. Stamm, et R. Schulin, « Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 153, p. 65-74, 2012.
[28] N. OUERD, « Traitement d'effluents liquides d'industries agroalimentaires par procédé biologique à boues activées », PhD Thesis, 2010.
[29] J.-M. Dorioz, « Mécanismes et maitrise de la pollution diffuse agricole : le cas du phosphore et sa portée générale », *BASE*, janv. 2013, Consulté le: 6 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=9790
[30] H. Vanden Bossche, « Devenir du phosphore apporte sur les sols et risques de contamination des eaux de surface. Cas des boues de stations d'epuration », PhD Thesis, Rennes 1, 1999.
[31] M. Hafidi, W. Badri, M. Kaemmerer, et J. C. Revel, « Comparaison des méthodes d'extraction chimique et biologique pour la détermination du phosphore assimilable », *Rev. Marocaine Sci. Agron. Vét.*, vol. 14, n° 3, p. 43-48, 1994.
[32] F. van Oort, D. Baize, et M. Thiry, « Les sols pollués à l'épreuve de l'expertise pédologique. », *Etude Gest. Sols*, vol. 29, p. 5-29, févr. 2022.
[33] G. H. Bolt et M. G. M. Bruggenwert, *Soil chemistry. A. Basic elements.* Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.
[34] F. Van Oort, J. Labanowski, T. Jongmans, et M. Thiry, « Le devenir des polluants métalliques dans les sols: révélateur d'impacts de l'activité humaine sur la pédogenèse », *Etude Gest. Sols*, vol. 14, n° 4, p. 287-303, 2007.
[35] D. Lang Burak, F. van Oort, T. Becquer, E. Foy, et M. P. Ferreira Fontes, « Unravelling zinc and lead distributions in dolomitic and metapelitic soils of the Brazilian Central Plateau: insight from

physical fractionation, optical microscopy and X-ray microfluorescence », *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 64, nº 1, p. 131-144, 2013, doi: 10.1111/ejss.12006.
[36] M. ROBERT, « Différents types de transfert du sol vers les hydrosystèmes: dissous ou particulaire, latéral ou vertical », *HYDROSYSTÈMES*, p. 13, 1996.
[37] B. W. Bache, « G. Sposito 1989. The Chemistry of Soils. xiii+ 277 pp. Price\pounds 25.00 (hard covers). New York, Oxford: Oxford University Press. ISBN 0 19 504615 3. », *Geol. Mag.*, vol. 127, nº 2, p. 190-191, 1990.
[38] M. A. E. H. Aggoun, M. Ramdane, et S. Boulahbel, « Etude comparative de l'effet des faibles doses de chlorure de Nickel et chlorure d'aluminium sur quelques paramètres chez la lapine gestante », 2020.
[39] J.-B. Sirven, « Détection de métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS) », PhD Thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2006.
[40] « ETM dans les sols ». https://www.u-picardie.fr/beauchamp/duee/perrono/perrono.htm (consulté le 8 novembre 2022).
[41] C. Juste, P. Chassin, A. Gomez, M. Linères, et B. Mocquot, « Les micro-polluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines », 1995.
[42] D. Baize, « Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France): Références et stratégies d'interprétation. Programme ASPITET », *Teneurs Total. En Éléments Traces Métalliques Dans Sols Fr.*, p. 1-410, 1997.
[43] X. Li et I. Thornton, « Chemical partitioning of trace and major elements in soils contaminated by mining and smelting activities », *Appl. Geochem.*, vol. 16, nº 15, p. 1693-1706, 2001.
[44] D. Baize et F. van Oort, « Potentially harmful elements in forest soils », in *PHEs, environment and human health*, Springer, 2014, p. 151-198.
[45] M. Thiry, F. van Oort, J. Thiesson, et B. Van Vliet-Lanoe, « Periglacial morphogenesis in the Paris basin: insight from geophysical survey and consequences for the fate of soil pollution », *Geomorphology*, vol. 197, p. 34-44, 2013.
[46] R. B. Daniels, « Pedology, a field or laboratory science? », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 52, nº 5, p. 1518-1519, 1988.
[47] A. Haouat et E. (Rapporteur) Leghouchi, « Étude de la spéciation des métaux lourds (Pb, Cr, Cd et Zn) dans le sol de la zone humide « Ghedir Béni Hamza, el Kennar » à la wilaya de Jijel », Thesis, 2012. Consulté le: 2 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/handle/123456789/4039
[48] E. CHARBONNIER, « Caractérisation et interprétation des teneurs naturelles en éléments traces métalliques et métalloïdes sur le territoire du SAN Ouest Provence », *Mém. Master Espace Rural Environ. Univ. Bourgogne*, 2014.
[49] « Modelling trace metal background to evaluate anthropogenic contamination in arable soils of south-western France », *Geoderma*, vol. 206, p. 112-122, sept. 2013, doi: 10.1016/j.geoderma.2013.04.023.
[50] E. Tessier, « Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/métalloïdes dans la rade de Toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité », PhD Thesis, Université de Toulon, 2012.
[51] T. Sterckeman, F. Douay, N. Proix, et H. Fourrier, « Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in the North of France », *Environ. Pollut.*, vol. 107, nº 3, p. 377-389, mars 2000, doi: 10.1016/S0269-7491(99)00165-7.
[52] D. Bouquet, « Gestion in situ des sols de jardins potagers modérément contaminés en plomb », PhD Thesis, Nantes, 2018.
[53] J. C. Echeverria, M. T. Morera, C. Mazkiaran, et J. J. Garrido, « Competitive sorption of heavy metal by soils. Isotherms and fractional factorial experiments », *Environ. Pollut.*, vol. 101, nº 2, p. 275-284, 1998.
[54] A. Tessier et D. R. Turner, *Metal speciation and bioavailability in aquatic systems*. Wiley Chichester, 1995.
[55] B. J. Alloway, « Sources of heavy metals and metalloids in soils », in *Heavy metals in soils*, Springer, 2013, p. 11-50.

[56] M. C. Ramos, « Metals in vineyard soils of the Penedès area (NE Spain) after compost application », *J. Environ. Manage.*, vol. 78, n° 3, p. 209-215, 2006.
[57] D. Baize, A. française pour l'étude du sol, et M.-C. Girard, *Référentiel pédologique 2008*. Editions Quae, 2009.
[58] V. J. Camobreco, B. K. Richards, T. S. Steenhuis, J. H. Peverly, et M. B. McBride, « Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns », *Soil Sci.*, vol. 161, n° 11, p. 740-750, 1996.
[59] C. Dère, « Mobilité et redistribution à long terme des éléments traces métalliques exogènes dans les sols: Application à des Luvisols pollués par 100 ans d'épandage d'eaux usées brutes dans la plaine de Pierrelaye », PhD Thesis, ENGREF (AgroParisTech), 2006.
[60] E. Remon, « Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques: vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution », PhD Thesis, Université Jean Monnet-Saint-Etienne, 2006.
[61] L. Bailly, A.-M. Desaulty, P. Lach, W. Kloppmann, et I. Duhamel-Achin, « Mesurer l'or et assurer sa traçabilité depuis son origine ; métrologie des poudres et de l'or fondu », *Ann. Mines - Réal. Ind.*, vol. vembre 2018, n° 4, p. 54-59, 2018, doi: 10.3917/rindu1.184.0054.
[62] A. Mahar *et al.*, « Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review », *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 126, p. 111-121, 2016.
[63] C. S. Lee, X. Li, W. Shi, S. C. Cheung, et I. Thornton, « Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics », *Sci. Total Environ.*, vol. 356, n° 1-3, p. 45-61, 2006.
[64] S. S. Huang *et al.*, « Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China », *Chemosphere*, vol. 67, n° 11, p. 2148-2155, 2007.
[65] U. S. E. P. A. O. of Emergency et R. Response, *Risk assessment guidance for superfund*. Office of Emergency and Remedial Response, US Environmental Protection Agency, 1989.
[66] J. O. Nriagu, « A History of Global Metal Pollution », *Science*, vol. 272, n° 5259, p. 223-223, avr. 1996, doi: 10.1126/science.272.5259.223.
[67] M. C. Newman, *Fundamentals of ecotoxicology*. CRC press, 2009.
[68] R. F. Shore et B. A. Rattner, *Ecotoxicology of wild mammals*. Wiley Chichester, 2001.
[69] R. Eisler, *Lead hazards to fish, wildlife, and invertebrates: a synoptic review*. US Fish and Wildlife Service, Patuxent Wildlife Research Center, 1988.
[70] O. H. Pattee et D. J. Pain, « Lead in the environment », *Handb. Ecotoxicol.*, vol. 2, p. 373-399, 2003.
[71] M. I. Lone, Z. He, P. J. Stoffella, et X. Yang, « Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives », *J. Zhejiang Univ. Sci. B*, vol. 9, n° 3, p. 210-220, mars 2008, doi: 10.1631/jzus.B0710633.
[72] « Les types de sols | Alloprof ». https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-types-de-sols-s1330 (consulté le 31 octobre 2022).
[73] J. Chapelle, « Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Mise à jour 2015. », *Rapp. Sur Ressour. En Sols Monde-N° 106*, 2018.
[74] Y. Takata *et al.*, « Major soil types », in *The Soils of Japan*, Springer, 2021, p. 69-132.
[75] H. Obara, T. Ohkura, Y. Takata, K. Kohyama, Y. Maejima, et T. Hamazaki, « Comprehensive soil classification system of Japan first approximation. », *Nogyo Kankyo Gijutsu Kenkyusho Hokoku Bull. Natl. Inst. Agro-Environ. Sci.*, n° No.29, p. 1-73, 2011.
[76] Q. T. Tran, K. S. Araki, et M. Kubo, « An investigation of upland soil fertility from different soil types », *Ann. Agric. Sci.*, vol. 66, n° 2, p. 101-108, déc. 2021, doi: 10.1016/j.aoas.2021.07.001.
[77] I . Youssouf et M. Lawani et Centre national d'agropédologie, CENAP, « Rapport sur les ressources en sols du monde - 98 ». https://www.fao.org/3/Y3948F/y3948f05.htm#P0_0 (consulté le 1 août 2022).
[78] « Centre national d'agropédologie, CENAP. https://www.fao.org/3/Y3948F/y3948f05.htm#TopOfPage - Recherche Google ». https://www.google.com/search?hl=fr&q=Centre+national+d%27agrop%C3%A9dologie,+CENAP.+https://www.fao.org/3/Y3948F/y3948f05.htm%23TopOfPage (consulté le 31 octobre 2022).

[79] F. Bigorre, « Influence de la pédogenèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques. Mécanismes d'évolution et éléments de prévision », PhD Thesis, Thèse de doctorat: Université Henri Poincaré Nancy I (France), 2000.
[80] L. L'HUILLIER, T. Jaffré, et A. Wulff, « Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie », 2010.
[81] C. P.-C. E. BIOLOGIQUE, « UNIVERSITE FRANÇAISE DU PACIFIQUE », PhD Thesis, Université Paul Sabatier (Toulouse, 1999.
[82] G. Marquet, P. Keith, et E. Vigneux, *Atlas des poissons et des crustacés d'eau douce de Nouvelle-Calédonie*. Service du patrimoine naturel, 1999.
[83] A. Lagrange, « Etudes écologique et microbiologique des espèces du genre Costularia (Cyperaceae) pionnières des sols ultramafiques de Nouvelle-Calédonie: applications à la restauration écologique.. », PhD Thesis, Université de Nouvelle Calédonie, 2009.
[84] T. Becquer, E. Bourdon, et L. L'Huillier, « Mobilité du nickel dans les sols ferrallitiques ferritiques du Sud de la Nouvelle-Calédonie », *Ecol. Milieux Sur Roches Ultramafiques Sur Sols Métallifères*, p. 57-63, 1997.
[85] T. Jaffré, R. D. Reeves, et T. Becquer, *Ecologie des milieux sur roches ultramafiques et sur sols métallifères*. ORSTOM, 1997.
[86] D. Baize et M. C. Girard, *Referentiel pedologique. Principaux sols d'Europe*. INRA, 1992, p. 222 p. Consulté le: 1 novembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://hal.inrae.fr/hal-02846205
[87] F. Trolard, « Les" oxydes" de fer des latérites et des sols hydromorphes: géochimie, minéralogie et modélisations thermodynamiques », PhD Thesis, UCL-Université Catholique de Louvain, 1997.
[88] R. H. Howeler et D. R. Bouldin, « The diffusion and consumption of oxygen in submerged soils », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 35, n° 2, p. 202-208, 1971.
[89] J. Berthelin, « Processus microbiens intervenant dans les sols hydromorphes en regions temperees: incidence sur la pedogenese », 1982.
[90] R. Charlatchka et P. Cambier, « Influence of Reducing Conditions on Solubility of Trace Metals in Contaminated Soils », *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 118, n° 1, p. 143-168, févr. 2000, doi: 10.1023/A:1005195920876.
[91] B. E. Davies, « Heavy metal contaminated soils in an old industrial area of Wales, Great Britain: source identification through statistical data interpretation », *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 94, n° 1, p. 85-98, 1997.
[92] X. Wang *et al.*, « Pedological characteristics of Mn mine tailings and metal accumulation by native plants », *Chemosphere*, vol. 72, n° 9, p. 1260-1266, 2008.
[93] M. K. Jamali *et al.*, « Heavy metals from soil and domestic sewage sludge and their transfer to Sorghum plants », *Environ. Chem. Lett.*, vol. 5, n° 4, p. 209-218, 2007.
[94] V. Göhre et U. Paszkowski, « Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation », *Planta*, vol. 223, n° 6, p. 1115-1122, 2006.
[95] S. L. Robin, C. Marchand, B. Ham, F. Pattier, C. Laporte-Magoni, et A. Serres, « Influences of species and watersheds inputs on trace metal accumulation in mangrove roots », *Sci. Total Environ.*, vol. 787, p. 147438, 2021.
[96] N. Annabi-Trabelsi *et al.*, « Concentrations of trace metals in phytoplankton and zooplankton in the Gulf of Gabès, Tunisia », *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 168, p. 112392, 2021.
[97] S. Cannicci, D. Burrows, S. Fratini, T. J. Smith III, J. Offenberg, et F. Dahdouh-Guebas, « Faunal impact on vegetation structure and ecosystem function in mangrove forests: a review », *Aquat. Bot.*, vol. 89, n° 2, p. 186-200, 2008.
[98] D. M. Alongi, « Present state and future of the world's mangrove forests », *Environ. Conserv.*, vol. 29, n° 3, p. 331-349, 2002.
[99] D. R. Cameron, M. Nyborg, J. A. Toogood, et D. H. Laverty, « Accuracy of field sampling for soil tests », *Can. J. Soil Sci.*, vol. 51, n° 2, p. 165-175, 1971.
[100] M. W. Leo, « Nutrients in Soils, Heterogeneity of Soil of Agricultural Land in Relation to Soil Sampling », *J. Agric. Food Chem.*, vol. 11, n° 5, p. 432-434, 1963.
[101] L. C. Hammond, W. L. Pritchett, et V. Chew, « Soil sampling in relation to soil heterogeneity », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 22, n° 6, p. 548-552, 1958.

[102] R. G. Hemingway, « Soil-sampling errors and advisory analyses », *J. Agric. Sci.*, vol. 46, n° 1, p. 1-8, 1955.
[103] D. F. Ball et W. M. Williams, « Variability of soil chemical properties in two uncultivated brown earths », *J. Soil Sci.*, vol. 19, n° 2, p. 379-391, 1968.
[104] V. Codjo, A. Zannou, et G. Biaou, « Baisse des ressources halieutiques du lac Toho au Sud du Bénin: Perceptions des pêcheurs et efficacité des pratiques de gestion et stratégies d'adaptation », *Tropicultura*, vol. 36, n° 4, p. 713-721, 2018.
[105] DJENONTIN Ignace, « MONOGRAPHIE COMMUNALE DE LOKOSSA », 2006. https://docplayer.fr/68064824-Monographie-communale-de-lokossa.html (consulté le 13 octobre 2022).
[106] H. Zetome, E. C. Adjovi, S. V. Gbaguidi, Y. Kiki T., C. L. Zinsou, et I. Dhossouvi, « Mise en évidence de la diversité des sols de Lokossa », p. 123, 2019.
[107] https://www.fao.org/3/Y3948F/y3948f05.htm#P0_0 (Consulté le 10 mai 2022).
[108] H. Zetome, E. C. Adjovi, S. V. Gbaguidi, Y. Kiki T., C. L. Zinsou, et I. Dhossouvi, « Mise en évidence de la diversité des sols de Lokossa », 2019, Consulté le: 1 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://biblionumeric.epac-uac.org:9443/jspui/handle/123456789/2823
[109] I. Amonmide, 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 », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 13, n° 3, Art. n° 3, sept. 2019, doi: 10.4314/ijbcs.v13i3.
[110] A. M. Igue *et al.*, « Evaluation de la fertilité des sols au sud et centre du Bénin », *Bull. Rech. Agron. Bénin*, p. 12-23, 2013.
[111] L. Gandois, « Dynamique et bilan des Elements Traces Métalliques (ETM) dans des écosystèmes forestiers français. Modélisation, spéciation et charges critiques. », phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009. Consulté le: 22 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00741901
[112] F. Matech, F. Zaakour, K. Moustarhfer, Z. Chemsi, I. Benazzouz, et N. Saber, « CONCENTRATIONS EN ELEMENTS TRACES METALLIQUES DANS LES SOLS IRRIGUES PAR LES EAUX USEES VERSEES DANS L'OUED MERZEG (CASABLANCA–MAROC) », *Eur. Sci. J.*, vol. 10, n° 29, 2014.
[113] P.-L. Giffard, *L'arbre dans le paysage sénégalais. Sylviculture en zone tropicale sèche*. GERDAT-CTFT, 1974.
[114] A. El Houssainy, « Apports de géochimie sédimentaire des éléments traces métalliques dans deux zones côtières méditerranéennes urbanisées: Beyrouth (Liban) et Toulon (France) », PhD Thesis, Université de Toulon, 2020.
[115] I. Grandière *et al.*, « Distribution granulo-densimétrique de la matière organique dans un sol argileux sous semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches », *Etude Gest. Sols*, vol. 14, n° 2, p. 117-133, 2007.
[116] J.-P. O. Bassala, M. M'Biandoun, J. A. Ekorong, et P. Asfom, « Evolution de la fertilité des sols dans un système cotonnier-céréales au Nord Cameroun: diagnostic et perspectives », *SOMMAIRE/INHOUD/SUMARIO*, vol. 26, n° 4, p. 240-245, 2008.
[117] Y. Daoud et A. Halitim, « Irrigation et salinisation au Sahara algérien », *Sci. Chang. PlanétairesSécheresse*, vol. 5, n° 3, p. 151-160, 1994.
[118] M. T. Halilat, « Etude expérimentale de sable additionné d'argile. Comportement physique et organisation en conditions salines et sodiques », 1998.
[119] P. Rognon, « Les conséquences de la sécheresse sur la pédogenèse », *Sci. Chang. PlanétairesSécheresse*, vol. 5, n° 3, p. 173-184, 1994.
[120] B. B. Rouina, K. Gargouri, M. Abichou, A. Rhouma, S. Magdich, et S. Jilani, « L'épandage des margines sur les terres agricoles: résultats et gestion pratique », *Commun. Orale*, vol. 7.
[121] C. Plassard *et al.*, « Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol », *Innov. Agron.*, vol. 43, p. 115-138, 2015.
[122] S. E. Laouini, B. H. Boubaker, et S. Ladjel, « INFLUENCE DES EAUX USEES URBAINES DOMESTIQUES SUR LA DEGRADATION DE LA QUALITE DES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE DE LA ZONE OUED SOUF LA STATION D'EPURATION DE KOUININE (STEP1) ».

[123] M. Bigalke, A. Ulrich, A. Rehmus, et A. Keller, « Accumulation of cadmium and uranium in arable soils in Switzerland », *Environ. Pollut.*, vol. 221, p. 85-93, 2017.
[124] S. Ruyters, P. Salaets, K. Oorts, et E. Smolders, « Copper toxicity in soils under established vineyards in Europe: a survey », *Sci. Total Environ.*, vol. 443, p. 470-477, 2013.
[125] H. Qi, B. Zhao, L. Li, X. Chen, J. An, et X. Liu, « Heavy metal contamination and ecological risk assessment of the agricultural soil in Shanxi Province, China », *R. Soc. Open Sci.*, vol. 7, n° 10, p. 200538, doi: 10.1098/rsos.200538.

Table des matières

REMERCIEMENTS ii
RESUME iv
SOMMAIRE v
LISTE DES FIGURES vii
LISTE DES PHOTOS viii
LISTE DES TABLEAUX ix
LISTE DES ACRONYMES x
INTRODUCTION GÉNÉRALE 1
CHAPITRE 1 : 5
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE 5
1.1. Introduction 6
1.2. Généralité sur le phosphore dans l'environnement 7
1.3. États du phosphore dans le sol 7
1.4. Les sources anthropiques de phosphore 8
1.5. Comportement du phosphore dans le sol et sa biodisponibilité 9
1.5.1. Dans le sol 9
1.5.2. Dans l'eau 10
1.6. Généralités sur les éléments traces métalliques (ETM) 11
1.7. Importance du facteur lithographique sur la présence des ETM 11
1.8.1. Types d'éléments traces métalliques 13
1.8.2. Variabilités diverses 14
1.9. Facteurs d'accumulation des ETM dans les sols 14
2. Comportement des ETM dans le sol 15
3. Toxicologie des ETM 16
4. Écotoxicité des ETM 17
5. Typologie des sols et sols ultramafiques 18
5.1. Sols limoneux 21
5.2. Sols argileux 22
5.3. Sols ferrallitiques ferriques 22
5.4. Sols hydromorphes 23
5.5. Mangroves 24

6. Variabilités d'un type de sols à un autre 24
Conclusion 25
CHAPITRE 2 : 26
CADRE D'ÉTUDE, MATÉRIEL ET MÉTHODE 26
2-CADRE D'ÉTUDE 27
2.1. Travaux de terrain 27
2.1.1. Visite prospective 27
2.1.2. Acquisition des données 27
2.2. Situation géographique 28
2.3. Climat et hydrographie 29
2.4. Sols et végétations 30
2.4.1. Types de sols et occupations des sols 30
2.4.1.1. Les sols ferrallitiques 30
2.4.1.2. Les sols hydromorphes 31
2.4.2. Végétation 31
2.5. Géomorphologie et géologie 31
2.6. Quelques aspects socio-économiques 32
2.7.1. Localisation des sites 33
2.8. Matériel de terrain 34
2.9. Matériel de laboratoire 36
3. Méthode d'échantillonnage 37
3.1. Échantillonnage du sol 37
3.2. Point d'échantillonnage de l'eau de ruisseau 37
3.3. Analyse des échantillons de sol 38
3.4. Méthode d'analyse au laboratoire 39
3.4.1. Analyse des paramètres physico-chimiques des sols et des eaux de ruisseaux 39
3.4.2. Extraction du phosphore 42
3.4.3. Éléments traces métalliques dans le sol/sédiment 42
3.4.4. Eléments traces métalliques dans les eaux de ruisseaux 43
3.5. Analyses statistiques et traitement des données 43
CHAPITRE 3 : 45
RÉSULTATS ET DISCUSSION 45

4. RÉSULTATS 46
4.1. Résultats de l'analyse physico-chimique des sols et l'eau de ruisseaux ... 46
4.2. Résultats des teneurs en ETM des sols cultivés et des eaux de ruisseaux autour du lac Toho 53
4.2.1. Résultats d'analyse des teneurs en ETM des sols cultivés autour du lac Toho 53
4.3. Étude comparative des ETM 59
4.4. Résultats d'analyse des teneurs en ETM des eaux de ruisseaux autour du lac Toho 60
4.5. Résultats des analyses en composantes principales (ACP) 60
5. DISCUSSION 64
CONCLUSION 68
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 70
Table des matières 78