UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

SODOKIN Novia

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

ÉTUDE DE LA POLLUTON CHIMIQUE DES RESSOURCES EN EAU : CAS DU LAC TOHO AU SUD-EST DU BÉNIN

Maître de Mémoire

Pr. Waris K. CHOUTI

Professeur titulaire (CAMES)

Maître de Stage

Dr. AVAHOUNLIN Ringo Fernand

Maître assistant des Universités (CAMES)

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

PROMOTION : 2022-2023

DEDICACE

Je dédie ce travail, comme preuve de respect, de gratitude et de reconnaissance à mon père SODOKIN Tonoudé Mathieu et à ma mère HOUEHOUE Marie-Claire qui font la source de mon éducation. Je souhaite qu'ils trouvent à travers ce mémoire le témoignage de leurs efforts et sacrifices.

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu, le Tout puissant pour sa protection tout au long de ce travail. Je n'oublie pas tous ceux qui de près ou de loin par leurs soutiens, conseils et avis ont participé à la rédaction de ce document.

Je tiens à remercier sincèrement :

➢ Professeur Waris K. CHOUTI, pour son précieux encadrement, ses conseils et sa disponibilité à suivre ce travail ;

➢ Docteur Ringo Fernand AVAHOUNLIN, Maître Assistant des Universités CAMES, enseignant chercheur à l'UNSTIM pour son précieux encadrement, ses conseils et sa disponibilité ;

➢ Docteur KOUDERIN Lucie, le chargé des stages au cabinet Hydrogéoclim Bénin pour l'accueil dans sa structure et pour sa bonne humeur et ses conseils avisés ;

➢ Docteurs Firmin M. ADANDEDJI et Ousmane BOUKARI pour leurs précieuses contributions à la réalisation de ce travail, leur sympathie à mon égard et pour tous les sacrifices consentis dans l'élaboration de ce mémoire ;

➢ Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE) ;

➢Docteur Flavien DOVONOU, chef de département d'Hydrologie et de Gestion des Ressources en Eau (HGRE) pour son encadrement, ses aides et sa disponibilité à suivre de loin et de près ce travail ;

➢Docteur ALASSANE Abdoukarim, pour ses conseils, son soutien et son aide ;

➢A tout le personnel du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) en l'occurrence Monsieur Mohamed BOURE SALMANOU pour sa précieuse contribution à la réalisation de ce travail ;

➢ Tous les responsables de la Formation Professionnelle en Hydrologie à l'Institut National de l'Eau (INE) ;

➢ À tout le personnel de Hydrogéoclim Bénin pour la bonne ambiance pendant le temps passé à leur coté et pour leur conseil et leur contribution de près ou de loin à mon travail ;

➢ Tous les enseignants de l'INE qui n'ont ménagé aucun effort pour faire de la formation en hydrologie une formation de référence dans le domaine de l'eau au Bénin et dans la sous-région ;

➢ Tous les Honorables membres du Jury qui apprécieront ce modeste travail ; merci pour le temps que vous sacrifierez au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;

➢ Tous mes camarades d'Hydrologie et spécialement ceux de la promotion 2021-2022 en particulier mes amis d'Ecohydrologie avec qui tout au long des trois (3) années, nous avons partagé des moments de fraternité et d'apprentissage. Merci pour le soutien et l'entraide dont nous avons tous fait preuve ;

➢ Toute ma famille pour l'amour, l'éducation, le soutien, l'orientation et les conseils de tous les jours ;

➢ Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce document, qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

RESUME

La présente étude a porté sur la pollution chimique des eaux du lac Toho. Pour atteindre les objectifs de cette étude, des travaux de terrain et de laboratoire ont été effectués. Les enquêtes de terrain et les analyses de laboratoire ont abouti à des résultats qui permettent de répondre aux objectifs fixés. Les travaux se sont déroulés sur trois (03) sites. Un échantillon d'eau et de sédiments a été prélevé au niveau de chaque site et soumis aux analyses physicochimiques au laboratoire. Les résultats ont été comparés aux normes de la qualité de l'eau et la norme limite en France(NL) pour étudier la pollution chimique des eaux. Les valeurs de température (30.2°C et 32.4 °C), de turbidité (4,5 NTU et 22,11 NTU), du cadmium au niveau des eaux (0 µg/L et 28 µg/L), du cadmium au niveau des sédiments (108,6 mg/kg et 179,2), du cuivre au niveau des eaux (0,4 µg/L et 38 µg/L) et du plomb au niveau des eaux (entre 0 µg/L et 190 µg/L) sont supérieures à la norme de la qualité de l'eau et la norme limite en France. Quant aux analyses des 24 HAP, seuls le Naphtalène, l'Acénaphtène, l'Acénaphtylène et le Fluorène, l'Anthracène, Fluoranthène**,** le Pyrène, le Benzo(c)phénanthrène ne sont pas présents au niveau des trois sites par rapport aux eaux de surface et seul le naphtalène n'est pas présent au niveau des sédiments mais la concentration des HAP présents ne dépassent le critère règlement 2013-57. Avec les résultats issus de l'analyse des paramètres physico-chimiques, nous avions évalué le degré de contamination des sédiments par le calcul de l'Indice de Contamination. Les calculs indiquent que l'Ic du cadmium est supérieur à 10, ce qui est risqué pour les espèces aquatiques et l'homme. Les valeurs des paramètres physicochimiques des eaux et des sédiments permettent de conclure que les eaux et les sédiments du lac Toho sont sujettes à une pollution (chimique) liée aux activités anthropiques en particulier par les activités agricoles : fertilisation des sols grâce aux engrais chimiques, pesticides.

MOTS CLES : Pollution chimique, ressources en eau, lac Toho

ABSTRACT

The present study focused on the chemical pollution of the waters of Lake Toho. To achieve this study, field and laboratory work was carried out. Field surveys and laboratory analyzes produced results that enabled the objectives set to be met. The work took place on three (03) sites. A sample of water and sediments was taken from each site and submitted to physicochemical analyzes in the laboratory. The results were compared to water quality standards (NQE) and the limit standard in France (NL) to study chemical pollution of water. The values of temperature (30.2°C and 32.4°C), turbidity (4.5 NTU and 22.11 NTU), cadmium at water level (0 µg/L and 28 µg/L), cadmium at water level sediments (108.6 mg/kg and 179.2), copper at water level (0.4 µg/L and 38 µg/L) and lead at water level (between 0 µg/L and 190 µg/ L) are higher than the water quality standard and the limit standard in France. As for the analyzes of PAHs, only Naphthalene, Acenaphthene, Acenaphthylene and Fluorene, Anthracene, Fluoranthene, Pyrene, Benzo(c)phenanthrene are not present at the three sites compared to the waters of surface and only naphthalene is not present in the sediments but the concentration of PAHs present does not exceed the regulation 2013-57 criterion. With the results from the analysis of the physicochemical parameters we evaluated the degree of contamination of the sediments by calculating the Contamination Index. Calculations indicate that the IC of cadmium is greater than 10, which is risky. The values of the physicochemical parameters of the waters and sediments allow us to conclude that the waters and sediments of Lake Toho are subject to (chemical) pollution linked to anthropogenic activities, in particular agricultural activities : soil fertilization thanks to chemical fertilizers, pesticides.

KEY WORDS: Chemical pollution, water resources, Lake Toho

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

µS	:Microsiemens
µS/cm	:Microsiemens par centimètre
CLHP	:Chromatographie Liquide à Haute Performance
Cm^2	:Centimètre Carré
ETM	Eléments Traces Métalliques
g/kg	:Gramme par Killogramme
GPS	:Global Positioning System
Ic	Indice de Contamination
Km	:Killomètre
Km^2	:Killomètre carré
m	:Mètre
MAF	:Manitoba Agriculture and Food
mg	:Milligramme
mg/L	:Milligramme par litre
ml	:Millilitre
mmol /L^2	:Millimole par Litre carré
NL	Norme Limite
nm	:Nanomètre
NPK	:Azote Phosphore Potassium
NQE	Norme de la Qualité de l'Eau
OMS	:Organisation Mondiale de la Santé
PNE Bénin	:Partenariat National de l'Eau du Bénin
Ppm	:Partie Par Millions
UICPA	:Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée
UNESCO	:Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la Science et la Culture
µg/L	:Microgramme par Litre

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Description schématique du cycle des éléments traces dans l'environnement..... 15

Figure 2 : Carte de présentation du lac Toho 22

Figure 3 :Précipitation mensuelle dans la commune de Lokossa..... 23

Figure 4 : Carte géologique du lac Toho..... 24

Figure 5 :Carte hydrographique du lac Toho 25

Figure 6 : Carte pédologique du lac Toho..... 27

Figure 7 :Localisation des points d'échantillonnage autour du lac Toho 31

Figure 8 :Graphe montrant les différentes activités menées autour du lac Toho..... 38

Figure 9 : Graphe montrant les engrais utilisés pour l'agriculture..... 38

Figure 10 : Graphe montrant les produits utilisés pour attirer les poissons 38

Figure 11 : Graphe montrant les techniques de pêche 38

Figure 12 : Variations du pH dans le lac Toho 39

Figure 13 : Variation des valeurs de la conductivité électrique dans le lac Toho..... 40

Figure 14: Variation de la température dans le lac Toho 40

Figure 15: Variation de la turbidité dans le lac Toho..... 41

Figure 16 : Variation des TDS dans le lac Toho 42

Figure 17 : Variation des valeurs du Cadmium au niveau des eaux 42

Figure 18 : Variation des valeurs du Cadmium au niveau des sédiments..... 42

Figure 19 : Variation des valeurs du Chrome au niveau des eaux 43

Figure 20 : Variation des valeurs du Chrome au niveau des sédiments..... 43

Figure 21 : Variation des valeurs du Cuivre au niveau des sédiments..... 44

Figure 22 : Variation des valeurs du Cuivre au niveau des eaux 44

Figure 23 : Variation des valeurs du plomb au niveau des sédiments 45

Figure 24 : Variation des valeurs du plomb au niveau des eaux..... 45

Figure 25: Variation des HAP dans les eaux au niveau du lac Toho 46

Figure 26 : Variation des HAP dans les eaux au niveau du lac Toho 46

Figure 27 : Variation des HAP dans les eaux au niveau du lac Toho 47

Figure 28 : Variation des HAP dans les eaux au niveau du lac Toho 47

Figure 29 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho..... 48

Figure 30 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho..... 49

Figure 31 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho..... 49

Figure 32 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho..... 50

Figure 33 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho..... 50

Figure 34 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho..... 51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Toxicité des HAP 12

Tableau 2 : Effets majeurs toxiques et écotoxiques des éléments traces métallique (Sparks, 1998)..... 14

Tableau 3 : Récapitulation des centres de documentation et structures, et des types d'informations 28

Tableau 4 : Typologie de l'échantillonnage dans le département du Mono 30

Tableau 5 : Localisation géographique des sites étudiés..... 32

Tableau 6 : Les matériels et outils utilisés 32

Tableau 7: Classement du sédiment en fonction de l'indice de contamination Ic 36

TABLE DES MATIERES

DEDICACE i

REMERCIEMENTS ii

RESUME iv

ABSTRACT v

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES vi

LISTE DES FIGURES vii

LISTE DES TABLEAUX viii

TABLE DES MATIERES ix

INTRODUCTION 1

Problématique 2

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART 5

1-1 Clarification conceptuelle 5

1-1-1 Pollution chimique 5

1-1-2 Ressources en eau 5

1-2 Généralités sur l'eau 5

1-2-1 Eaux de surface 5

1-2-2 Eaux souterraines 6

1-3 Généralités sur la pollution 6

1-3-1 Pollution 6

1-3-2 Origine de la pollution 7

1-3-3 Classification des polluants 8

1-4 Généralités des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques(HAP) 9

1-4-1 Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques(HAP) 9

1-4-2 Origines des Hydrocarbures aromatiques polycycliques 10

1-4-3 Principales sources de contamination des eaux : contact direct avec l'atmosphère 11

1-4-4 Toxicité 12

1-5 Généralités sur les métaux 13

1-5-1 Sédiments 13

1-5-2 Eléments Traces Métalliques 13

1-5-3 Sources des ETM 15

1-5-4 Toxicité des ETM 16

1-6 Caractéristiques physico-chimiques de l'eau 19

1-6-1 Paramètres physiques 19

1-6 Impacts de la pollution chimique sur les écosystèmes aquatiques et sur le plan sanitaire 20

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 22

2-1 Contexte géographique 22

2-2 Caractéristiques physiques 22

2-2-1 Climat 22

2-2-2 Géologie 23

2-2-3 Hydrographie 24

2-2-3 Activités socio-économiques 25

2-2-4 Pédologie 26

CHAPITRE III : APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES 28

3-1 Collecte des données 28

3-1-1 Recherche documentaire 28

3-1-2 Travaux de terrain 29

- Enquête de terrain 29
- Echantillonnage 30

Critère de choix des points d'échantillonnage 31

3-2 Matériels et outils de collecte des données 32

3-3 Traitement des données 33
3-4 Analyses des paramètres physico-chimiques 33
3-4-1 Paramètres physiques 34
3-4-2 34
3-5 Calculs des indices de contamination des sédiments des ETM 36
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION 37
4-1- RESULTATS 37
4-1-1- Résultats des enquêtes de terrain 37
4-1-2 Résultats des analyses physico-chimiques 39
4-1-2-1 Potentiel d'Hydrogène (pH) 39
4-1-2-3- Température 40
4-1-2-4 Turbidité 41
4-1-2-6 TDS 41
4-1-2-7 Cadmium 42
4-1-2-8 Chrome 43
4-1-2-9 Cuivre 43
4-1-2-10 Plomb 44
4-1-2-1-1 Résultats des HAP au niveau des eaux et des sédiments 45
4-1-3- Résultats des calculs d'Ic 51
4-2 DISCUSSION 52
CONCLUSION GÉNÉRALE 55
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 57
..... 64
ANNEXES 64

INTRODUCTION

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie dans tout écosystème. Elle existe sous forme liquide, solide et gazeux pour subvenir aux besoins de l'homme (Taibi et Agoudjil, 2013). Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), l'eau douce ne représente que 2,5% de l'ensemble des eaux qui couvrent notre planète. Une infirme partie de cette eau, soit environ 0,0007 % est aisément accessible à l'homme dans les cours d'eau, les lacs et les réservoirs (Sossou-agbo, 2013). Parmi les différentes masses d'eau, les plans d'eau représentent 97,8 % des eaux douces superficielles libres dans le monde (UNESCO, 1978). Néanmoins, il faut préserver cette eau douce pour que la pollution ne détruise pas cet écosystème utilisable par les hommes. Ainsi, les ressources en eau sont soumises à une considérable pollution causée par les activités anthropiques (agriculture, industrie, élevage, pêche, usages domestiques etc.) (Adjagodo et al., 2016). L'agriculture, l'une des principales sources de revenue des populations riveraines est à considérer comme origine de pollution due au lessivage par ruissellement des sols auparavant contaminés par les engrais et pesticides. Aussi, l'élevage, les rejets domestiques et industriels constituent également une source non négligeable de la pollution des eaux par les matières organiques et les ETM. De même, les eaux de surface servent de dépotoirs aux déchets divers (déchets domestiques, agricoles et pastoraux) et sont des collecteurs d'eaux usées provenant des agglomérations (Adjagodo et al., 2018).

L'eau est à cet effet polluée par des éléments pathogènes. Ces derniers ne permettent pas aux espèces halieutiques de survivre et mettent en danger la santé des consommateurs. Ainsi, on note une dégradation de la qualité physico-chimique causée par les éléments pathogènes. Les éléments traces métalliques sont aussi des polluants dangereux dans l'environnement. Ils sont naturellement présents mais à des quantités très faibles dans les sols, l'eau et l'air et ne sont pas biodégradables. Les ETM s'introduisent dans l'environnement de diverses manières (extraction minière, combustion de déchets, feux de forêt, fumée de cigarette). Certains métaux sont indispensables aux organismes vivants, d'autres, par contre, ne le sont pas. Les conséquences des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont diverses et bien documentées dans la littérature scientifique. Selon Li et al. , 2014, les HAP sont connus pour leur potentiel cancérigène. Ils ont également des répercussions sur l'environnement (Tao et al., 2018). Les sédiments contaminés par les HAP peuvent devenir une source de contamination pour l'eau et les organismes qui y vivent. C'est ce que Sun et al., 2019 disent examinant comment les sédiments peuvent libérer des HAP dans l'eau environnante.

Le Lac Toho, un lac du Bénin qui se trouve à cheval sur les communes de Lokossa, d'Athiémé et de Houéyogbé n'est pas épargné par ces menaces d'origine anthropique. En effet, les populations vivant autour du lac Toho ne cessent d'y rejeter quotidiennement les déchets de toute nature (matières fécales, eaux usées domestiques…) provenant de leurs activités. Ces déchets accroissent le degré de pollution organique et inorganique du lac, (Kple, 2008). Ainsi, le lessivage de fertilisants et pesticides des plantations aux rivières et aux écosystèmes marins côtiers induit une eutrophisation et une contamination chimique des eaux et des produits de pêche (Hounkpè et al., 2017). Cette pollution chimique, est un problème environnemental qui affecte les eaux de surface (lacs, les rivières et les océans, etc..) à travers le monde. Dans le cas du lac Toho, des études (Kple, 2008 ; Gbaguidi , 2018 ; Dakpo, 2022) ont montré une augmentation significative des niveaux de matière organique, tels que l'azote, le phosphore, les pesticides, les herbicides. Ces substances proviennent principalement des rejets agricoles, des eaux usées domestiques et industrielles, ainsi que des ruissellements urbains.

Problématique

L'eau, une ressource vitale, se raréfie sur Terre. Les changements climatiques, la croissance démographique et la pollution ont tous un impact sur la quantité et la qualité de l'eau disponible.

Cependant, l'eau est de plus en plus polluée par des déchets chimiques provenant de sources telles que les usines, les exploitations agricoles et les zones urbaines. Cette pollution a des conséquences dramatiques et néfastes sur l'écosystème aquatique et la santé humaine. Par ailleurs, les eaux de surface sont exploitées et traitées pour desservir la population en eau potable (Lamizana-Diallo et al., 2008 ; Agbani, 2013). Ainsi, la croissance démographique accompagnée d'une urbanisation rapide cause de nombreuses perturbations pour les milieux naturels (Ghazali et Zaid, 2013). Selon Host et Telle-Lamberton, 2014, le milieu urbain concentre ainsi des populations et activités sur un territoire resserré, lequel doit supporter de nombreux flux. La pollution représente un problème pour l'environnement à cause des rejets dans les rivières et les eaux usées domestiques non épurées représentent la principale source de pollution organique des eaux (Bahroun et Bousnoubra ,2011). Selon Munabi et al., 2009, certaines activités humaines contribuent directement ou indirectement par ruissellement ou drainage à la pollution des eaux de surface et influent sur les caractéristiques des eaux. Ainsi, les ressources en eau sont soumises à une forte pression exercée par les activités anthropiques. Les activités anthropiques à caractère socio-économique couplées à celles des processus naturels (érosion des sols, précipitation, évaporation, ruissellement des eaux fluviales)

accélèrent la dégradation des ressources en eau de surface (Aw et al., 2011). Elles provoquent des perturbations de l'équilibre naturel et accroissent la charge organique de l'eau et des sédiments, puis l'encombrement des ressources en eau, avec des problèmes d'eutrophisation, l'asphyxie de l'environnement aquatique ainsi que les problèmes sanitaires des populations (Ado et al., 2000).

Dans le contexte spécifique du lac Toho, plusieurs activités socio-économiques sont pratiquées. Il s'agit notamment de la pêche, des activités agricoles comme le maraîchage, de l'exploitation du gravier et le transport des biens et des personnes. A cela s'ajoute l'occupation anarchique du périmètre du lac. Plusieurs études ont été réalisées pour évaluer la qualité de son eau et les niveaux de pollution du lac. Le lac Toho, situé au sud du Bénin, a connu à plusieurs reprises la mort des poissons en 2012, 2018 et 2021. D'après les informations de PNE-Bénin, le drame de 2012 est survenu suite à une pluie orageuse qui a modifié la turbidité de l'eau. Ce phénomène a conduit les poissons dans un état de désoxygénation et leur a coûté la vie. En 2018 et 2021, le même drame s'est reproduit sur le même lac avec un changement de couleur. La cause principale évoquée pour ces deux dernières années est le déversement de substances nocives de source inconnue (PNE Bénin, 2021) ayant certainement entrainé la pollution de l'eau et/ou des sédiments. En outre, les études ont montré que le lac Toho est soumis à une pollution aussi bien azotée, phosphorée qu'organique et métallique (Kple, 2008 ; Gbaguidi , 2018). Les causes probables évoquées par ces auteurs sont liées aux activités agricoles caractérisées par l'utilisation des engrais chimiques NPK, des herbicides et des pesticides. Le phosphore contenu dans ces engrais et pesticides peut se retrouver dans les eaux de surface. La forte teneur du phosphore dans ces eaux entraine la prolifération des algues bleu-vert dont la dégradation conduit à la formation des toxines ; l'autre conséquence est l'eutrophisation qui aboutit à une anoxie des eaux ayant pour conséquence la perte de diversité (Dakpo, 2022).

Il s'avère indispensable de redéfinir les stratégies nécessaires pour limiter le degré de pollution des ressources en eau à l'échelle du lac Toho.

La ressource en eau autour du lac Toho est utilisée pour la consommation et les besoins humains. Cette même eau est sujette à la contamination chimique de par les activités anthropiques. La pollution chimique observée au niveau de ce lac augmente le risque de contamination des espèces halieutiques qui influence la santé humaine. C'est la raison principale qui nous a conduit à mener des recherches sur le sujet intitulé : « **Etude de la pollution chimique des ressources en eau : Cas du lac Toho au sud-est du Bénin** ».

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres : le premier chapitre présente l'état de l'art ; le deuxième chapitre présente la structure d'accueil et la zone d'étude ; le troisième chapitre, quant à lui, expose les approches méthodologiques et le quatrième chapitre présente les résultats essentiels et la discussion.

Objectif générale

Evaluer le degré de pollution chimique des eaux et sédiments du lac Toho

Objectifs spécifiques

- Caractériser les activités anthropiques autour du lac Toho ;
- Analyser la qualité chimique des eaux et sédiments du lac Toho ;
- Déterminer le degré de pollution chimique des eaux du lac Toho .

Hypothèses

Les objectifs suscités par cette recherche ont conduit à la formulation d'hypothèses à vérifier :

- Les activités anthropiques autour du lac Toho peuvent être l'agriculture, le commerce, l'élevage et la pêche ;
- Les eaux et sédiments du lac Toho présentent des concentrations élevées en métaux traces, en nutriments et en matières organiques ;
- Les eaux dans le périmètre du lac Toho ont une forte charge en matières organiques.

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

1-1 Clarification conceptuelle

1-1-1 Pollution chimique

La pollution chimique de l'eau devient de nos jours une préoccupation de santé publique qui prend des formes multiples, certaines formes de pollution chimique échappent souvent aux méthodes ordinaires de traitement de l'eau et posent par conséquent des problèmes complexes de pollution ; tant au niveau des eaux de surface qu'au niveau des nappes souterraines (Kourchi, 2010).

1-1-2 Ressources en eau

Les ressources en eau sont l'ensemble des potentialités hydriques qu'offrent le milieu naturel et que l'on peut exploiter à des fins sociales et économiques (Larousse encyclopédique, 2003). Les ressources en eau désignent toutes les sources d'eau disponibles pour une utilisation humaine et environnementale. Cela inclut les eaux de surface telles que les rivières, les lacs, les étangs et les réservoirs, ainsi que les eaux souterraines stockées dans les aquifères. Selon (Houansou, 2010), l'ensemble des potentialités hydriques qu'offre le milieu naturel. Les ressources en eau sont essentielles pour la vie humaine, l'agriculture, l'industrie, la production d'énergie, la santé des écosystèmes et de nombreuses autres activités.

1-2 Généralités sur l'eau

1-2-1 Eaux de surface

Les eaux de surface font référence aux sources d'eau qui se trouvent à la surface de la Terre, telles que les rivières, les lacs, les étangs, les marais, les mares et les océans. Ces eaux sont alimentées par les précipitations, comme la pluie, la neige fondue et la grêle. L'eau de surface constitue une ressource non négligeable voire indispensable à de nombreux usages comme l'irrigation, la production d'eau destinée à la consommation humaine, l'utilisation dans les procédés industriels ou les loisirs (baignade), (Bensiaahmad et Ghalmi ,2013). Elle peut être produite par le ruissellement généré par les précipitations ou l'affleurement des eaux souterraines. Ces eaux de surface ont une qualité plus ou moins régulière selon les rejets qui s'y déversent ou encore selon le ruissellement des pluies (Coulibaly, 2005). Les activités anthropiques à caractère socio-économique couplées à celles des processus naturels (érosion des sols, précipitation, évaporation, ruissellement des eaux fluviales) accélèrent la dégradation des ressources eau de surface (Aw et al.,2011). La pollution des eaux de surface pourrait engendrer diverses maladies telles que : choléra, typhoïde, hépatites, bilharziose et

intoxications chimique (EL Ouali lalami,2010). La qualité de ces eaux de surface est plus ou moins acides, plus ou moins chargées de particules de la terre ou de sol est souvent un élément important pour les cultivateurs, les pisciculteurs et les buveurs (Cosandey, 2003).

1-2-2 Eaux souterraines

Les eaux souterraines sont des réserves d'eau situées sous la surface de la Terre, dans des formations géologiques appelées aquifères. Elles proviennent généralement des précipitations qui s'infiltrent dans le sol et s'accumulent dans des couches perméables, comme les roches poreuses ou les graviers. Les eaux souterraines sont toutes les eaux se trouvant dans les pores, les fissures des roches et dans les sédiments sous la terre, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol et se bénéficient de filtration naturelle importante (Chelli et Djouhri,2013). Ces eaux représentent une importante source d'eau douce pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole et d'autres utilisations. L'eau contenue dans le sol et dans le sous-sol constitue la majeure partie de l'eau qu'utilise l'homme. L'eau souterraine s'écoule vers les sources, les fleuves ou directement dans la mer et elle peut être captée par l'homme grâce à des puits ou des forages (Marsily et Besbes,2017). L'étude a révélé des origines différentes de la contamination des eaux souterraines, à savoir, la contamination par la matière organique due essentiellement à l'utilisation des eaux usées à des fins d'irrigation et à leur infiltration continue, et finalement le retour des eaux d'irrigation (chargées engrais azotés) qui est considéré comme étant la principale origine de la minéralisation et de la pollution des eaux (El asslouj et al.,2007). La source principale de la pollution des eaux souterraines est l'agriculture. Ainsi, l'eau souterraine est étroitement liée aux eaux de surface et est une composante importante du cycle global de l'eau (Felix ,2013). D'après (l'OMS, 2000), L'eau souterraine est d'une composition plus stable que celle des eaux de surface. Sa composition chimique est déterminée par la nature géologique du terrain, puisque l'eau est en contact continu avec le sol dans lequel elle stagne ou circule.

1-3 Généralités sur la pollution

1-3-1 Pollution

La pollution est la présence ou l'introduction de substances, d'énergies ou de facteurs physiques nocifs dans l'environnement, qui causent des dommages à la santé des êtres vivants, à la qualité de l'air, de l'eau, du sol ou à l'équilibre des écosystèmes. La pollution de l'eau est due majoritairement aux activités anthropiques et à quelques phénomènes naturels. Ses effets sont multiples et touchent aussi bien la santé publique que les espèces aquatiques et les organismes terrestres (Chaouki,2016).

1-3-2 Origine de la pollution

1-3-2-1 Pollution agricole

La pollution agricole est causée par les déjections animales mais aussi les produits phytosanitaires/pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) contenus dans les engrais et utilisés dans l'agriculture. Ils pénètrent alors dans les sols jusqu'à atteindre les eaux souterraines. Elle est due surtout à l'utilisation intensive et abusive des engrais (chimiques et organiques) et pesticides. L'agriculture constitue la première cause des pollutions diffuses des ressources en eau (Woito, 2018). Cette pollution est aussi causée par les pesticides (herbicides, insecticides et fongicides). En plus de l'utilisation des pesticides pour protéger les cultures, les agriculteurs utilisent des engrais chimiques pour accroître les rendements. En dehors de l'utilisation des engrais chimiques en agriculture, certains agriculteurs utilisent des engrais organiques (déjections animales et humaines, engrais vert, lisières et résidus de récolte) comme fertilisant. Néanmoins, l'utilisation des composts de qualité en agriculture est une technique pour réduire la pollution des eaux par des produits chimiques (Brainerd et Menon,2014). Mais cette technique peut conduire à une pollution bactériologique si ces composts (déjections animales et humaines, résidus de récolte, etc.) ne sont pas bien traités. Selon (MAF, 2001). De par leur origine métabolique (déjections animales), ces matières organiques en dehors des germes bactériologiques, donnent assez de nitrates lors de la minéralisation. L'agriculture est devenue une cause importante de pollution des sols et des eaux par suite de l'usage systématique des engrais chimiques, organiques et des pesticides.

1-3-2-2 Pollution d'origine domestique

La pollution d'origine domestique provient des ménages, avec les eaux usées provenant des toilettes, les produits d'entretien ou cosmétiques (savons de lessives, détergents), les peintures, solvants, huiles de vidanges, hydrocarbures…. Elle constitue l'ensemble des eaux vannes (toilettes) et les eaux ménagères et se compose surtout de polluants organiques, microbiologiques (microbes dans les eaux vannes) et chimiques (détergent, savon utilisé). En ce qui concerne les matières organiques, ce sont : les excréments (qui contiennent des bactéries, des virus, des parasites), les ordures ménagères, les déjections animales, les déchets végétaux ou animaux, (https://www.cieau.com/connaitre-leau/la-pollution-de-leau/pollution-ressource-eau-comment-reduire/).

1-3-2-3 Pollution industrielle

L'industrie est responsable globalement de la moitié des rejets polluants dans le milieu naturel, l'autre moitié provenant des collectivités locales et de l'activité agricole en ce qui concerne la pollution organique. La pollution industrielle est causée par les rejets de produits chimiques

comme les hydrocarbures ou le PCB rejetés par les industries ainsi que les eaux évacuées par les usines. Les industries agroalimentaires et chimiques (traitement de surface, synthèse de produits chimiques, fabrication et utilisation de colorants, de détergents, de papier, etc.) sont les plus polluantes (Mehmet, 2004).

1-3-2-4 Pollution naturelle

Certains auteurs considèrent que divers phénomènes naturels sont aussi à l'origine de la pollution : par exemple, une éruption volcanique, un épanchement sous-marin d'hydrocarbures, le contact avec des filons géologiques (métaux lourds, arsenic), une source thermo minérale etc.

1-3-2-5 Pollution organique

La pollution organique encore appelée pollution biologique se réfère à la contamination de l'environnement par des substances d'origine biologiques ou organique provenant des sources naturelles ou humaines. Ces substances peuvent provenir de de diverses sources telles que les déchets alimentaires, les déjections animales, les matières végétales en décomposition, les produits chimiques organiques, etc. La pollution organique est un type de pollution chimique provoquée par les polluants carbonés, comme la matière organique (lisier, boues d'épuration, etc. .
(https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-pollution-organique-6709/).

1-3-3 Classification des polluants

1-3-3-1 Les polluants chimiques

Les polluants chimiques d'origine industrielle, agricole ou domestique, tels que les métaux lourds, les pesticides, les herbicides et les produits chimiques toxiques, peuvent se retrouver dans les lacs, les rivières, etc. par le biais des eaux de ruissellement et des rejets. Ces substances peuvent avoir des effets néfastes sur la santé des organismes aquatiques et sur la qualité de l'eau potable.
Les pesticides, les détergents et les micropolluants organiques sont des exemples spécifiques de polluants chimiques qui peuvent avoir un impact significatif sur la qualité de l'eau.

❖ **Les pesticides**

Les pesticides sont des produits chimiques utilisés dans l'agriculture pour contrôler les ravageurs et les mauvaises herbes. Cependant, ces produits chimiques peuvent se retrouver dans des lacs, des rivières, etc… par le biais des eaux de ruissellement. Les pesticides peuvent être toxiques pour les organismes aquatiques, affectant leur santé et leur reproduction. De

plus, certains pesticides persistants peuvent s'accumuler dans les tissus des organismes, entraînant une augmentation de la concentration de ces substances dans la chaîne alimentaire. La pollution par des pesticides et des polluants organiques est principalement perçue au travers de leur présence dans les eaux et dans les denrées alimentaires. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) font partie des polluants organiques persistants, produits principalement par combustion des matières organiques (combustion d'énergies fossiles, feux de forêt). Toxiques pour la santé humaine et l'environnement, ces polluants s'avèrent en règle générale peu biodégradables. Outre leur aptitude au transport sur une longue distance, ils s'accumulent dans les tissus vivants du fait de leur forte solubilité dans les graisses (bioaccumulation). Ils se fixent également aisément sur les matières organiques, les matières en suspension ou les sédiments des cours d'eau. De facto les HAP constituent un indicateur clé du degré de contamination des sols.

❖ **Les détergents**

Les détergents, utilisés dans les produits de nettoyage domestiques et industriels, contiennent souvent des composés chimiques tels que les phosphates et les surfactants. Les phosphates, en particulier, peuvent contribuer à la prolifération d'algues et à la diminution de l'oxygène dissous dans l'eau, affectant ainsi la vie aquatique. De plus, certains surfactants peuvent être toxiques pour les organismes aquatiques.

❖ **Les micropolluants organiques**

Les micropolluants organiques sont des substances chimiques organiques de petite taille, présents dans de nombreux produits et activités humaines. Cela comprend les produits pharmaceutiques, les produits chimiques industriels, les hormones, les produits de soins personnels, etc. Ces micropolluants peuvent se retrouver dans le lac Toho par le biais des eaux usées municipales et industrielles, ainsi que par le ruissellement urbain. Ils peuvent avoir des effets toxiques sur les organismes aquatiques, même à de très faibles concentrations, et peuvent persister dans l'environnement pendant de longues périodes.

1-4 Généralités des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques(HAP)

1-4-1 Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques(HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des polluants pouvant causer des problèmes environnementaux majeurs du fait de leur toxicité. Ils sont omniprésents dans l'environnement à travers différentes sources dont la majorité est anthropique. Une des principales voies d'introduction des HAP dans l'environnement est le traitement du bois

(MDDEFP,2011). Ceux sont des composés organiques constitués de deux ou de plusieurs noyaux benzéniques dont les deux noyaux benzéniques adjacents se partagent au moins deux atomes de carbone. Des hétérocycles et des portions alicycliques peuvent également être présents dans la structure. En général, les HAP se divisent en deux groupes : ceux à faible poids moléculaire (2 à 3 noyaux benzéniques) et ceux à poids moléculaire élevé (plus de 3 noyaux benzéniques). Ils se présentent sous forme de cristaux colorés avec des points de fusion et d'ébullition élevés, une faible pression de vapeur et une faible solubilité dans l'eau (MDDEFP :2008, p28).

Les HAP se forment par évaporation mais sont principalement rejetés lors de la combustion de matière organique (notamment par les moteurs diesel) sous forme gazeuse ou particulaire, la combustion domestique du bois et du charbon qui s'effectue souvent dans des conditions mal maîtrisées (en foyer ouvert notamment) participe également à la présence de HAP dans l'atmosphère. Parmi les HAP, le benzo(a)pyrène est pour l'instant le seul polluant soumis à des valeurs réglementaires,(Hydrocarbure aromatique polycyclique — Wikipédia (wikipedia.org)).

1-4-2 Origines des Hydrocarbures aromatiques polycycliques

Les Hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les eaux et les sols peuvent avoir deux origines : naturelle ou anthropique

1-4-2-1 Origines naturelles

Les HAP sont issus naturellement des éruptions volcaniques et des feux de forêt.

1-4-2-2 Origines anthropiques

Les HAP sont aussi issus des activités anthropiques dont :

- Combustibles fossiles et gaz d'échappement des véhicules ;
- Rejets des fours à coke, industrie pétrolière ;
- Dégradation de produits contenus dans les eaux résiduaires via des bactéries, des algues ou des végétaux (indicateurs de pollution des eaux par les égouts) ;
- Désagrégation des revêtements bitumeux ou asphaltiques internes des canaux de distribution d'eau (indicateur de la dégradation des conduits).

1-4-3 Principales sources de contamination des eaux : contact direct avec l'atmosphère

- Voie d'exposition principale : alimentation c'est à dire la consommation de viande grillée ou brûlée peut augmenter considérablement l'apport ;
- Eau de boisson : moins de 1% de l'apport quotidien ingéré ;
- Inhalation : 1 à 5% de l'apport quotidien total (Quantités beaucoup plus importantes si tabagisme), (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (sfmu.org)).
- La formation des HAP peut avoir de nombreuses origines qui peuvent être regroupées en trois catégories. On peut distinguer :

- Les origines pyrolytiques ;
- Les origines diagénétiques ;
- Les origines pétrogéniques.

Cependant, les deux dernières sont négligeables dans l'atmosphère, en comparaison des sources pyrolytiques.

1-4-3-1 HAP d'origine pyrolytique

Avant l'utilisation du charbon, du pétrole et du gaz naturel comme sources d'énergie, l'apport de HAP d'origine pyrolytique était principalement dû à des phénomènes naturels tels que les feux de forêt et de prairies. Aujourd'hui, c'est l'origine pyrolytique anthropique qui est considérée comme la source majeure de HAP dans l'environnement, notamment à cause des émissions domestiques et industrielles. Les HAP pyrolytiques sont générés par des processus de combustion incomplète de la matière organique à haute température. Les mécanismes mis en jeu lors de leur formation font intervenir la production de radicaux libres par pyrolyse à haute température (≥ 500 °C) de la matière fossile (pétroles, fioul, matières organiques, etc.) dans des conditions déficientes en oxygène. Les HAP d'origine pyrolytique proviennent de la combustion du carburant automobile, de la combustion domestique (charbon, bois…), de la production industrielle (aciéries, alumineries…), de la production d'énergie (centrales électriques fonctionnant au pétrole ou au charbon…) ou encore des incinérateurs. Également, une partie des HAP présents dans l'environnement provient de processus naturels tels que les éruptions volcaniques.

En fonction de l'origine, certains HAP se formeront préférentiellement. Ceci permet de les utiliser comme indicateurs d'origine. Ainsi, les rapports de concentration en différents HAP permettent de calculer des indices moléculaires. Par exemple, si le rapport de la concentration

en anthracène sur celle du phénantrène est supérieur à 10, alors l'origine sera pétrogénique tandis que s'il est inférieur à 10, il sera d'origine pyrolytique.

Hydrocarbure aromatique polycyclique — Wikipédia (wikipedia.org)

1-4-4 Toxicité

L'une des raisons ayant conduit au classement des HAP dans la liste des polluants prioritaires de l'EPA est le caractère toxique de certains d'entre eux. Ce sont des molécules biologiquement actives qui, une fois absorbées par les organismes, se prêtent à des réactions de transformation sous l'action d'enzymes conduisant à la formation d'époxydes et/ou de dérivés hydroxylés. Les métabolites ainsi formés peuvent avoir un effet toxique plus ou moins marqué en se liant à des molécules biologiques fondamentales telles que les protéines, l'ARN, l'ADN et provoquer des dysfonctionnements cellulaires. Dans l'alimentaire, la consommation de produits mettant en œuvre certains procédés de séchage, fumage, grillage ou cuisson à haute température, peut fournir un apport très faible en HAP d'origine pyrolytique et en AHC (Amines Hétérocycliques **(en)**). Ce constat a conduit à multiplier les règlementations, par exemple dans l'Union européenne.
(Hydrocarbure aromatique polycyclique — Wikipédia (wikipedia.org))

Tableau 1 : Toxicité des HAP

HAP	Toxicité	Cancérogénèse	Mutagenèse	Rapporté dans
Naphtalène	Modérée	Non confirmée		EPA-TSCA
Acénaphtène	Modérée		Constatée	EPA-TSCA
Acénaphtylène	Modérée		Constatée	EPA-TSCA
Fluorène	Faible		Constatée	EPA-TSCA, CIRC
Phénanthrène	Modérée		Constatée	EPA-TSCA, CIRC
Anthracène	Modérée		Constatée	EPA-TSCA, CIRC
Fluoranthène	Modérée	Non confirmée	Constatée *	EPA-TSCA, CIRC
Pyrène	Modérée	Non confirmée	Constatée *	EPA-TSCA, CIRC
Benzo(a)anthracène	Élevée	Confirmée	Constatée *	EPA-TSCA, CIRC
Chrysene		Confirmée	Constatée *	EPA-TSCA, CIRC
Benzo(b)Fluoranthène		Confirmée	Constatée	CIRC
Benzo(k)Fluoranthène		Confirmée	Constatée	CIRC
Benzo(a)pyrène	Élevée	Confirmée	Constatée *	EPA-TSCA, CIRC
Benzo(e)pyrène		Non confirmée	Constatée *	CIRC

Indéno(1,2,3-cd)pyrène		Confirmée	Constatée	EPA-TSCA, CIRC
Benzo(g,h,i)perylene		Non confirmée	Constatée	CIRC
Dibenzo(a, h)anthracène	Élevée	Confirmée	Constatée *	EPA-TSCA, CIRC

NB :

- (*) Mutagène pour l'Homme ;
- CIRC : Centre international de recherche sur le cancer ;
- EPA-TSCA : Environmental Protection Agency - Toxic Substances Control Act.

Hydrocarbure aromatique polycyclique — Wikipédia (wikipedia.org)

1-5 Généralités sur les métaux

1-5-1 Sédiments

Les sédiments sont définis comme un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses de matières précipitées ayant séparément subi un certain transport (Moukhchan et al., 2011). Un sédiment est un dépôt meuble, continentaux ou marins, qui proviennent de l'altération ou de la désagrégation des roches préexistantes et qui sont transportés par les fleuves, les glaciers ou les vents. Autrement dit les sédiments sont des matériaux comme des graviers, des sables ou de la vase qui ont été transportés par l'eau ou la glace et qui se sont déposés, le plus souvent au fond de la mer, mais aussi dans des lacs, des rivières, et même sur terre. Lorsque les sédiments parviennent dans un lieu de dépôt, ils tombent et s'empilent les uns sur les autres. Les particules de sédimentation peuvent provenir de l'érosion des roches, des sols ou résulter d'une précipitation chimique (précipitation des sels comme les chlorures, les sulfates) et biochimique (accumulation de squelettes d'organismes vivants, des coquilles).

1-5-2 Eléments Traces Métalliques

Les éléments traces sont les 80 éléments chimique, constituants de la croute terrestre continentale, dont la concentration est pour chacun d'entre eux inférieure à 0.1%. Ils ne représentent à eux tous que 0.6% du total, alors que les 12 éléments majeurs interviennent pour 99.4%. Fer, aluminium et manganèse sont les éléments majeurs le plus souvent analysés. Lorsque les éléments traces sont des métaux (par exemple Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn), ils sont nommés « éléments traces métalliques » (ETM), (Baiz : 2009).

Les ETM tels que le cuivre, le zinc, le chrome et le nickel sont indispensables au développement des végétaux et des animaux, cependant à de trop fortes doses ils peuvent se révéler toxique. D'autre, tels que le cadmium, le plomb… dont le caractère indispensable n'a pas été démenti sont potentiellement toxique (Lebourg et al., 1996). Enfin, une des particularités de ces éléments est d'entraîner des effets majeurs sur la santé humaine (caractère

toxique des substances) et/ou sur les écosystèmes (caractère écotoxique des substances) en cas d'exposition (Tableau2), (Sparks, 1998).

Tableau 2 : Effets majeurs toxiques et écotoxiques des éléments traces métallique (Sparks, 1998).

ETM	**Effets**
As	**Toxique, possible cancérigène**
Cd	**Hypertension, dommage sur le foie**
Cr	**Cancérigène sous forme de Cr (VI)**
Cu	**Peu toxique envers les animaux, écotoxique envers les plantes et les algues à des niveaux modérés**
Hg	**Toxique chronique et aigue**
Ni	**Allergies de peau, maladies respiratoires, possible cancérigène**
Pb	**Toxique**
Se	**Essentiel à faibles doses, Toxique à doses élevées**
Zn	**Ecotoxique pour les végétaux à de fortes teneurs**

A la différence des substances organiques dont l'état chimique est bien défini, les métaux comme tous les éléments présentent un polymorphisme chimique dépendant à la fois de leur forme et du composé minéral ou organique dans lequel ils sont incorporés (Ramade, 2002). Certains des éléments en trace font partie des éléments toxiques qui passent des champs vers les eaux des écosystèmes. On les retrouve principalement dans les eaux usées industrielles et municipales (Cd, Cu, Pb, Zn), les précipitations atmosphériques, et les eaux provenant de l'activité agricole (Hg, Cu, Pb). Contrairement à d'autres polluants, comme les hydrocarbures dérivés du pétrole, et aux déchets qui envahissent l'environnement au vu de tout le monde, les éléments traces métalliques s'accumulent subrepticement, pour finir par atteindre des seuils toxiques. Les problèmes associés à la contamination par les métaux lourds ont été tout d'abord mis en évidence dans les pays industriellement avancés en raison de leurs déversements industriels plus importants (FAO, 2009). Parmi ces éléments, nous allons étudier le cuivre (Cu), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le plomb (Pb). Comme tous les composants chimiques de la croûte terrestre, les éléments traces participent aux grands cycles biogéochimiques qui comprennent de grands réservoirs dont l'Atmosphère, l'Océan, les Continents (Figure1). Ils

passent par la végétation et les animaux. Les activités anthropiques constituent un facteur fondamental qui interfère dans ces cycles, les accélère et augmente par voie de conséquence leurs teneurs dans l'écosystème. Les Eléments Traces Métalliques (ETM : Cd, Co, Cu, Cr, Ni, Pb, Sb et Zn) sont dispersés dans l'atmosphère à la suite de processus naturels et anthropiques. Les écosystèmes forestiers, même éloignés de sources de pollutions aigues, sont sous l'influence d'apports atmosphériques. Leur interaction importante avec l'atmosphère les rend sensibles à cette pollution. Ils font l'objet d'une protection vis-à-vis de la pollution atmosphérique par la définition de charges critiques. L'impact potentiel des ETM dans les écosystèmes forestiers est fortement lié à leur dynamique aux interfaces atmosphère/végétation et sol/solution. En effet, le couvert forestier modifie les apports atmosphériques et la solution de sol est le vecteur principal des ETM vers la biosphère et les eaux de surface et souterraines.

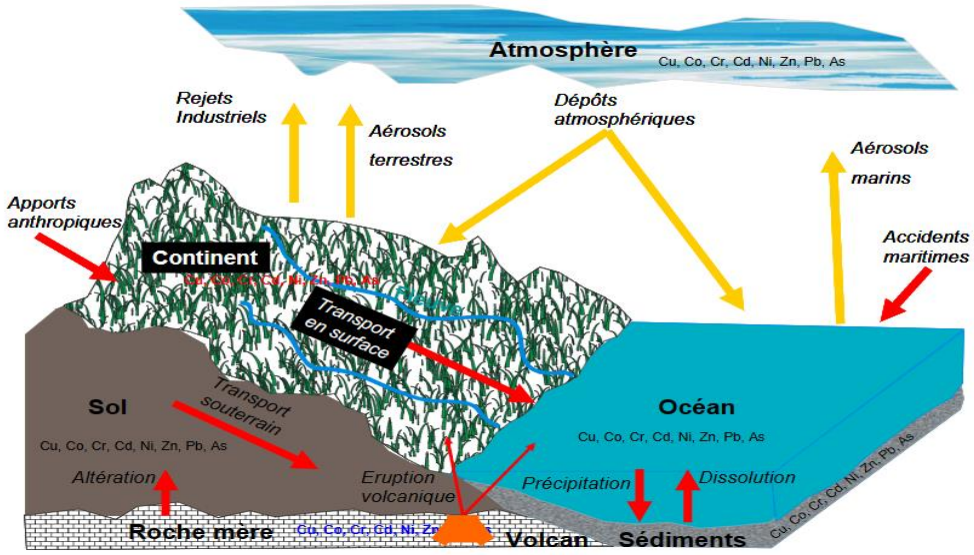


Figure 1: Description schématique du cycle des éléments traces dans l'environnement

(N'Guessan Y. M., 2008)

1-5-3 Sources des ETM

Les éléments traces métalliques dans les eaux et les sols peuvent avoir deux origines : naturelle ou anthropique (Villaneau et al., 2008).

1-5-3-1 Sources naturelles

Les ETM présents naturellement dans les sols sont issus de l'hérités des matériaux parentaux (ou roche mères) dont ces sols sont issus par altération biogéochimique (Mathieu et al., 2008). Le fond pédogéochimique naturel (FPGN) est la concentration d'un élément chimique dans un sol (que ce soit un élément majeur ou un élément en trace) résultant des évolutions

naturelles, géologiques et pédologique (Baiz, 2009). Les contaminations des sols par les éléments en traces y sont relativement fréquentes, du fait par exemple du régalage sur les parcelles agricoles des boues de curage des cours d'eau et canaux, des rejets des industries, du recyclage en agriculture des boues de stations d'épuration des eaux (Sterckeman et al., 2007).

1-5-3-2 Sources anthropiques

Les contaminations liées à l'activité agricole résultent essentiellement des effluents d'élevages et des engrais qui représentent des apports en ETM dans les sols. Les substances apportées au sol dans le cadre de l'activité agricole contiennent toutes des ETM.

1-5-4 Toxicité des ETM

Les métaux sont parmi les plus anciens toxiques connus, ceci est lié à leur usage ancien. Il y a eu pendant une très longue période, une absence totale de préoccupation en ce qui concerne leur impact sur la santé de l'homme, ainsi que sur l'environnement. De plus, ils sont bioaccumulables, d'où des effets à plus ou moins long terme. Une caractéristique importante des métaux au plan toxicologique est qu'ils ont la capacité de réagir dans les processus biologiques après la perte d'électron(s). Ils présentent en outre la particularité d'être à faible dose pour nombre d'entre eux essentiels dans le métabolisme, mais ils peuvent devenir toxiques à dose plus élevée. Ils se distinguent également de nombreuses autres substances toxiques par le fait qu'ils ne sont pas métabolisés dans l'organisme, exception faite de l'arsenic qui subit une méthylation hépatique. Ils sont aussi parfois susceptibles de changer de valence, comme le chrome, ce qui constitue une autre voie de détoxication (Goullé et al., 2012). Certains métaux sont impliqués dans des pathologies neurologiques. C'est par exemple le cas du Cu dans la maladie de Wilson. Il s'agit d'une maladie génétique autosomique récessive caractérisée par une accumulation de ce métal dans divers organes dont le foie et le cerveau. Elle est provoquée par une mutation dans un gène codant pour une ATPAse, ATP7B, qui est une pompe à Cu, et s'accompagne une accumulation cellulaire de Cu.

1-5-5 Cadmium

Le cadmium est un métal blanc argent légèrement bleuté, très malléable et ductile. Il a des propriétés similaires au Zn (Pan et al., 2012).

Dans les sols, Le Cd est moins susceptible d'être adsorbé que les autres ETM divalents, et il est de ce fait plus mobile. Sa biodisponibilité est majoritairement gouvernée par le pH du milieu. En effet, dans les sols acides bien drainés, le Cd a une forte mobilité, du fait de sa faible adsorption par la MO, les argiles et les oxydes ; dans de telles conditions, le transfert sol-plante du Cd est très élevé (Kabata-Pendias,2011). Dans les sols neutres à alcalins, la mobilité et la biodisponibilité du Cd sont faibles, et à un pH 7, le Cd peut co-précipiter avec

CaCO3 ou précipiter sous forme de CdCO3 ou de phosphates de Cd (Pan et al., 2012). Le cadmium est un élément non essentiel et présente une toxicité élevée. Les plantes représentent la principale voie pour l'entrée de Cd dans la chaîne alimentaire. Chez l'homme, l'exposition chronique excessive au Cd peut entraîner une insuffisance rénale, une pathologie osseuse (Itaï, décrit au Japon), voire favoriser une hypertension artérielle. Chez les mammifères de façon générale, le Cd est cancérogène et présente des effets génotoxiques et cytotoxiques, conduisant finalement à l'inhibition de la prolifération cellulaire et l'apoptose. Chez les plantes, le Cd peut provoquer l'inhibition de la photosynthèse, la respiration et le métabolisme de l'azote, ainsi que d'une diminution de l'absorption de l'eau et des nutriments minéraux (Deckert, 2005 ; Meda et al., 2007). Les apports anthropiques de Cd dans les sols sont importants via les activités industrielles (apport atmosphérique), l'amendement des engrais phosphatés et l'épandage des PRO (composts, boues de station d'épuration…) (Kirkham, 2006 ; Li et al., 2012 ; Mahdavi et Jafari, 2010). Pour ces raisons, le comportement du Cd est plus fréquemment étudié par de nombreux chercheurs que les autres ETM. De ce fait, il est surveillé en priorité pour préserver la qualité des récoltes, surtout des cultures maraîchères (notamment la laitue, le chou et l'épinard) qui sont des accumulatrices de Cd dans les parties consommées (Tremel-Schaub et I. Feix, 2005). Le cadmium peut causer des dommages aux reins, des problèmes respiratoires, des troubles osseux et des problèmes de prostate. Compte tenu de sa toxicité, la teneur en Cd dans les eaux superficielles destinées à l'alimentation est fixée, par les directives du conseil des communautés européennes, à 0,001 mg/L ; suivant le traitement susceptible d'être appliqué, il peut être acceptable d'utiliser une eau contenant jusqu'à 0,005 mg/L de Cd (Rodier et al, 1996).

1-5-6 Chrome

Le chrome est un oligo-élément essentiel, présent dans les tissus sous forme de chrome trivalent. C'est un métal ubiquitaire qui présente principalement trois valences : 2+, 3+, 6+. En milieu professionnel, la principale voie de pénétration dans l'organisme est inhalatoire. Le métabolisme et la toxicité du chrome varient en fonction des dérivés. Les dérivés divalents sont très instables et se transforment en dérivés trivalents. Les dérivés solubles du chrome hexavalent sont plus facilement absorbés que les dérivés insolubles. : La toxicité des dérivés trivalents est moindre en raison de leur faible absorption. Les principaux effets toxiques sont de nature allergique et cancérogène, (Chrome et composés - EM consulte (em-consulte.com)).

Le chrome dans l'environnement peut avoir une origine naturelle (chromite FeCr204) ou provenir de l'activité humaine (métallurgie, tannage, industrie des colorants, incinération…), laquelle constitue l'apport majoritaire dans notre société industrielle. L'altération et l'érosion des roches ainsi que, la précipitation de la pluie sont les sources considérables de libération du chrome dans l'environnement et son acheminement vers les eaux de surface et les eaux souterraines (Ramade, 2000). La concentration en chrome varie selon le type d'eau et sa localisation. Elle est comprise entre 0,1 et 0,6 µg/l dans les eaux douces par exemple, dans les eaux de mer elle varie de 0,2 jusqu'à 50 µg/l (Bacha, 2011). Le chrome peut causer des irritations de la peau, des problèmes respiratoires, des dommages rénaux et un risque accru de cancer.

1-5-7 Cuivre

Le cuivre est un métal de « **transition 1** ». C'est un oligo-élément indispensable à la vie en faible quantité, toxique en quantité plus importante (IFEN, 2007). La concentration limite de cuivre dans l'eau de boisson est de 2 mg/L et de 2500 mg/L dans les sols (Boulanger et Nikolaidis, 2003). La teneur limite pour un nombre d'organismes aquatiques est très basse et de l'ordre de 5 ppm.

Il est un élément du groupe 11, de la période 4, un élément du bloc « **d** » métal de transition chalcophile. Dans le tableau périodique des éléments, le cuivre est de la même famille que l'argent et l'or, parce que tous possèdent une orbitale « **s** » occupée par un seul électron sur des sous-couches « **p** » et « **d** » totalement remplies, ce qui permet la formation de liaisons métalliques (configuration électronique Ar 3d10 4s1). Les trois métaux de ce « groupe du cuivre » ont un caractère de noblesse et de rareté accru, du cuivre semi-noble à l'or véritablement noble, le premier caractère s'expliquant par leur rayon atomique faible et leur compacité d'empilement atomique, leur potentiel d'ionisation plus important à cause des sous-couches d, leur point de fusion relativement élevé et leur faible réactivité ou relative inertie chimique. Naturellement présent dans la croûte terrestre, le cuivre (à faible dose) est essentiel au développement de toute forme de vie. Il est majoritairement utilisé par l'Homme sous forme de métal. Le cuivre, aujourd'hui métal usuel, est le plus ancien métal utilisé par l'Homme. Le point de fusion n'est pas trop élevé, et la facilité de réduction de l'oxyde de cuivre, souvent par un simple feu de bois, est remarquable, (Cuivre — Wikipédia (wikipedia.org)).

1-5-8 Plomb

Le plomb est un métal de couleur gris bleuâtre, qui vire au blanc en s'oxydant. Il est dense et malléable. Il est présent sous diverses formes dans tous les compartiments environnementaux (hydrosphère, stratosphère, biosphère, atmosphère, mais surtout dans la croûte terrestre et le sol). Dans ces derniers, il se trouve sous formes inorganiques (acétates, nitrates, carbonates, sulfates ou chlorures) ou organiques (chélates d'acides fulviques) (Pan et al., 2012). Il est moins biodisponible que les autres ETM (Van der Perk, 2013). Le facteur pH joue un rôle important dans le transfert du plomb du sol vers les végétaux. L'adsorption et/ou absorption sur les oxydes de Fe et Al est aussi importante (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Le plomb est un contaminant écotoxique dans l'environnement. Le plomb peut causer des dommages au cerveau et au système nerveux, des problèmes de comportement et d'apprentissage, des troubles digestifs, des problèmes rénaux et une anémie. Généralement, la concentration en plomb des eaux de surface non contaminées ne dépasse pas 10 µg/l. Les directives du conseil des communautés européennes fixent pour les eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire un niveau guide de 0,05 mg/L et pour les eaux destinées à la consommation humaine, une concentration maximale admissible 0,05 mg/L. L'OMS, quant à elle, a fixé la valeur guide à 0,01 mg/L.

1-6 Caractéristiques physico-chimiques de l'eau

1-6-1 Paramètres physiques

1-6-1-1 Conductivité électrique

La conductivité permet de mesurer la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs, par contre les composés organiques ne le sont pas (Habi et Haddad, 2019). Elle est une caractéristique physico-chimique de l'eau liée à la concentration des substances dissoutes et leur nature. La conductivité électrique standard s'exprime généralement en millisiemens par mètre (mS/m) à 20°C. La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 µS/cm.

1-6-1-2Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le ph est une mesure de l'activité chimique des protons ou ions hydrogène en solution. Notamment, en solution aqueuse, ces ions sont présents sous forme d'ions hydronium (ion H+ hydraté, ou ion H3O+). Le pH est une échelle logarithmique qui varie de 0 (très acide) à 14 (très basique ou alcalin). La valeur 7 correspond à une solution neutre. Il traduit l'acidité, alcalinité ou la neutralité d'une eau et mesure l'activité des ions H+ contenus dans cette eau. Le pH a une influence majeure sur les formes physico-chimiques du métal et des composants métalliques dans l'environnement aquatique, du fait qu'il contrôle la solubilité et la concentration des métaux (Gendronneau, 2006).

1-6-1-3 Température

La température est l'ensemble des conditions atmosphériques, variables, traduites subjectivement en sensations chaud et froid, et dont l'appréciation exacte est fournie par thermomètre ou multi-paramètre. La température doit donc être obtenue par le biais d'une sonde ou d'un thermomètre à l'alcool, qu'on immerge dans le cours d'eau jusqu'à l'obtention d'une lecture stable. Il est préférable de garder le thermomètre, ou la sonde, immergé pendant la lecture afin d'éviter l'influence de la température ambiante (Hébert et Légaré,2000). En fait, la majorité des paramètres de qualité de l'eau, tels les paramètres physiques, chimiques et biochimiques, sont dépendants de la température de l'eau.

1-6-1-4 Turbidité

La turbidité est la mesure de l'aspect plus ou moins trouble de l'eau ; c'est l'inverse de la limpidité. Elle est exprimée en Unités de Turbidité Néphélométriques (UTN). L'aspect trouble de l'eau est causé par la présence des particules en suspension (l'argile et les limons), des précipités chimiques (le manganèse et le fer), des particules organiques (des débris de plantes),

de plancton et des organismes microscopiques. La turbidité doit être due à la mauvaise qualité de l'eau de source, à un mauvais traitement et, dans les réseaux de distribution, au remaniement de sédiments et de biofilms ou à l'intrusion d'eau souillée par des fissures dans le réseau et autres déficiences (OMS, 2017). Il faut éliminer cette turbidité afin de favoriser une désinfection efficace de l'eau de consommation (Rejsek,2002).

1-6-1-5 Salinité(S)

La salinité(S) est la mesure de la quantité de sels dissouts dans un volume donné d'eau. La quantité de sels dissous dans un liquide agit également sur la pression osmique de celle-ci (Chouti,2011). Cette salinisation est causée par plusieurs facteurs dont une surexploitation des eaux souterraines ce qui entraîne l'intrusion des eaux marines (Diallo, 2006).

1-6-1-6 Solide Totaux Dissous(TDS)

Les Solide Totaux Dissous encore appelés les TDS signifie le total des solides dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Il est composé de sels inorganiques tels que (calcium, magnésium, potassium et sodium) et des carbonates (nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates) ainsi que quelques matières organiques (Chouti, 2011), Il présente une corrélation avec la conductivité et la salinité. Des sources d'eau minérales contiennent de l'eau avec un taux élevé de solides dissous parce qu'elles ont coulés à travers des régions où les roches contiennent beaucoup de sels (Bouchebbah et Ayache, 2011).

1-6 Impacts de la pollution chimique sur les écosystèmes aquatiques et sur le plan sanitaire

La pollution de l'eau, quel que soit sa nature (organique, chimique ou microbiologique) peut avoir des conséquences désastreuses, en se traduisant par des effets très spécifiques dus aux particularités écologiques propres aux milieux aquatiques (Ramade 2002). Les conséquences de la pollution chimique sont multiples et alarmantes Tout d'abord, elle entraîne un dégagement de gaz toxiques, des troubles (irritations, maux de tête), voir les maladies comme des cancers (du sang, du système nerveux, des poumons, du cœur, du foie, des reins, de la peau).

Au niveau de l'écosystème, une disparition d'espèces, une biodiversité réduite et des modifications de dominance entre les populations sont les impacts qui peuvent survenir et modifier le fonctionnement de l'écosystème.

En ce qui concerne la santé humaine (Les conséquences sanitaires sont celles à prendre en compte en priorité). Les produits chimiques toxiques présents dans l'eau peuvent s'infiltrer dans les sources d'eau potable, ce qui expose les populations locales à des risques accrus de

maladies gastro-intestinales, de troubles endocriniens et de cancers. De plus, la détérioration de la qualité de l'eau menace les activités de pêche et les industries qui dépendent des rivières, des cours d'eaux, des lacs, etc…, entraînant ainsi des conséquences économiques négatives pour la région. Les différentes activités menées par les populations ont des incidences sur l'équilibre et la durabilité des écosystèmes aquatiques. Plusieurs études menées sur les plans d'eau du Bénin ont montré une pollution de plus en plus inquiétante de ces écosystèmes aquatiques et les dangers auxquels sont exposés les organismes qui y vivent (Hounkpè et al, 2017).

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2-1 Contexte géographique

Le lac Toho est situé au sud du département du Mono entre 6 35' et 6°40' de latitude Nord et 1° 45' et 1°50' de longitude Est. Il fait partie du bassin du Mono. Ce dernier couvre une superficie de 374 km² et se trouve dans le complexe Ouest des zones humides du Sud Bénin. D'une superficie de 9,6 km² à l'étiage et de 15 km² en période de crue, il 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 (Ahouansou et al., 2003). Le lac Toho se trouve à cheval sur les communes d'Athiémé, de Lokossa et de Houéyogbé. Sa profondeur moyenne est de 3,05 m.

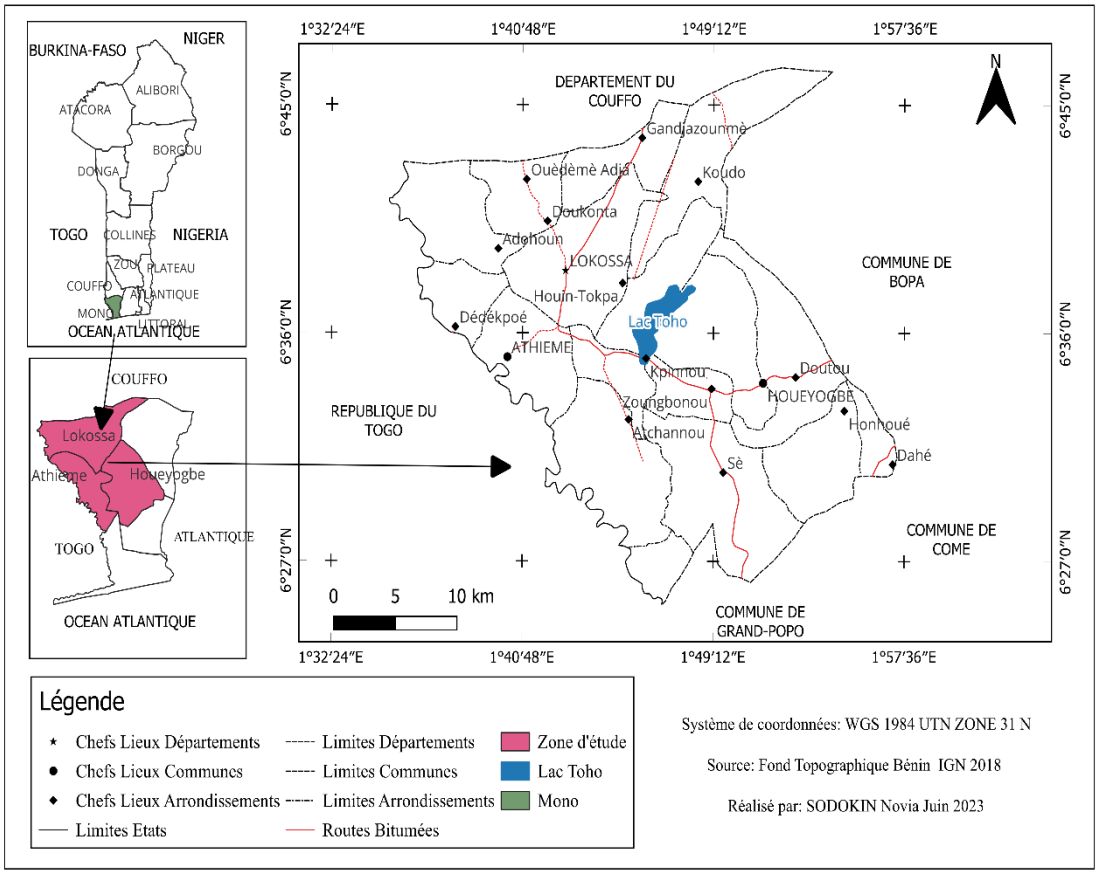


Figure 2 : Carte de présentation du lac Toho

2-2 Caractéristiques physiques

2-2-1 Climat

La zone de lac Toho est influencée par un climat subéquatorial caractérisé par deux saisons sèches (mi-juillet à mi-septembre et de mi-novembre à mi-mars) et deux saisons pluvieuses

(de mi-mars à mi-juillet et de mi-septembre à mi-novembre) dominées par les vents continentaux et l'harmattan (Lederoun et al., 2015, Codjo et al., 2020). Les précipitations annuelles varient entre 7 mm et 161,70 mm. L'humidité relative est très élevée et varie de 65% en janvier à 80,6% en juin (Ahouansou et al., 2008).

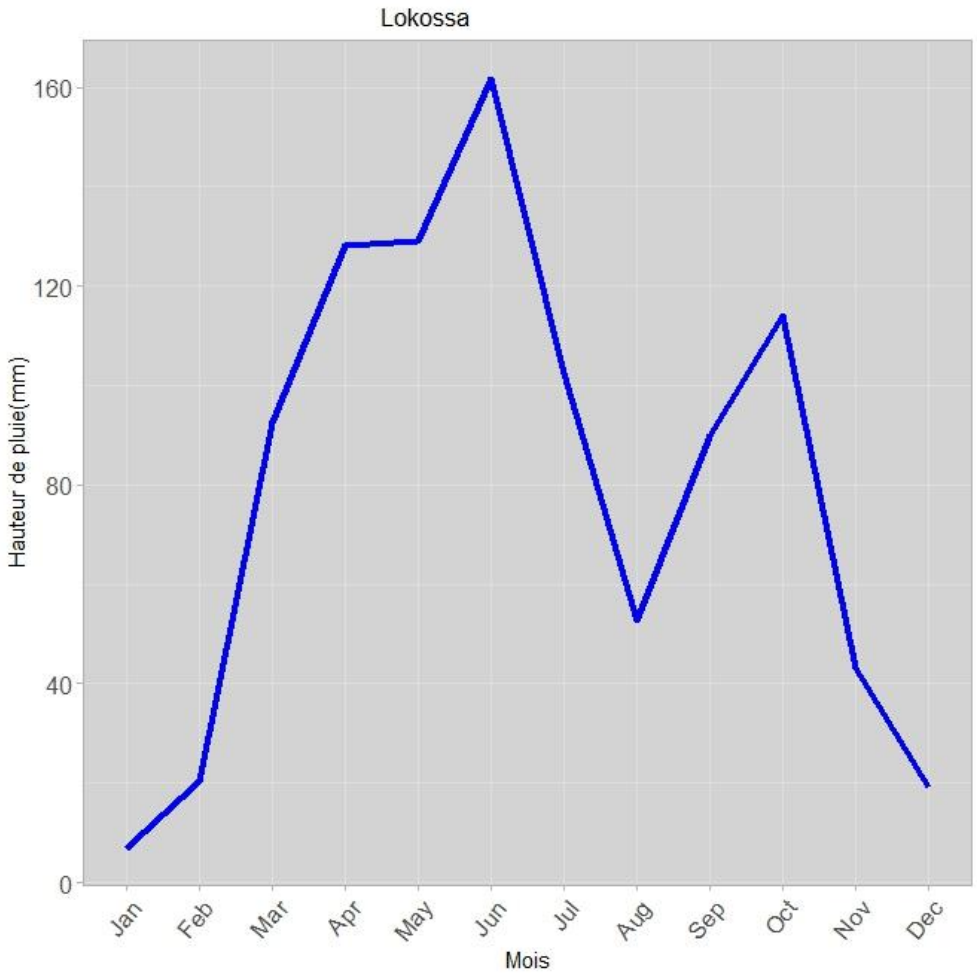


Figure 3 :Précipitation mensuelle dans la commune de Lokossa

2-2-2 Géologie

Les formations géologiques autour du Lac Toho 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 (Zetome, 2019). Située dans la vallée du fleuve Mono et dans la dépression de la Lama, il s'agit d'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 (Djenontin,2006), 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 (Zetome, 2019).

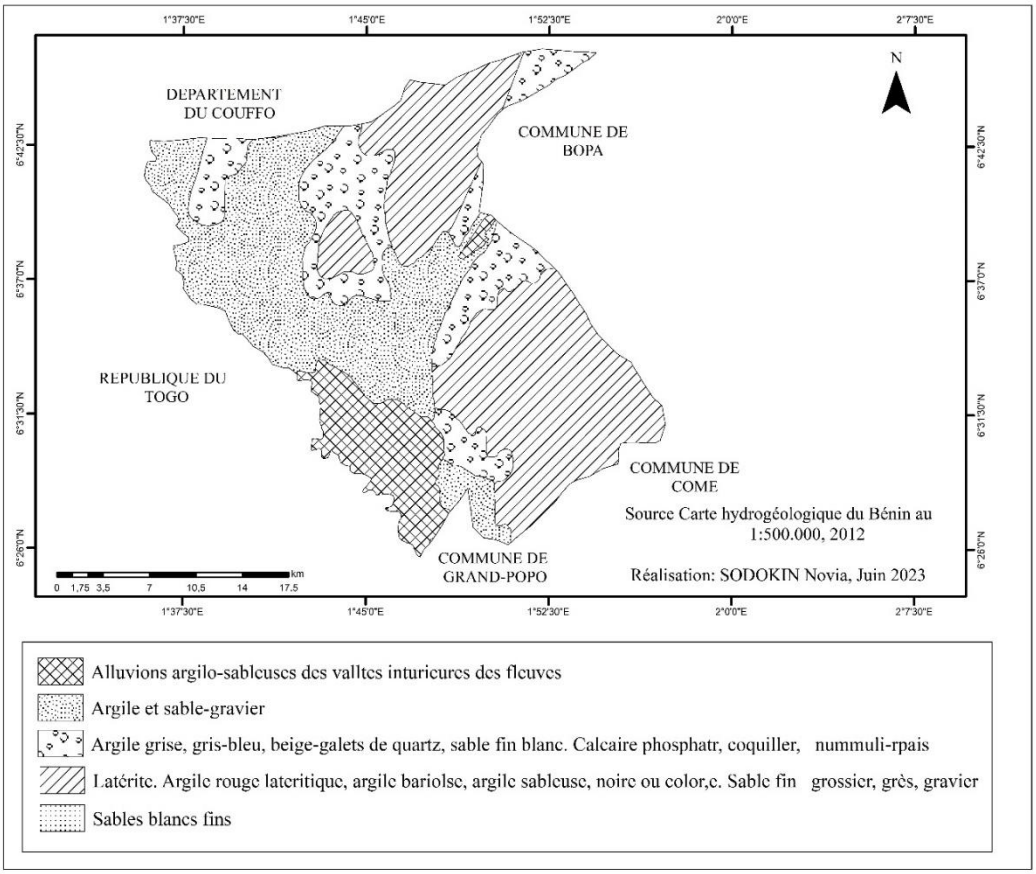


Figure 4 : Carte géologique du lac Toho

2-2-3 Hydrographie

Le lac Toho est l'un des plus importants lacs de la périphérie de la vallée alluviale du bassin du Mono . Cette vallée alluviale est caractérisée par un réseau hydrographique dégradé et complexe. Ce lac a trois principaux tributaires : le Diko, l'Akpatohoun et le chenal de Kpacohadji qui joue à la fois les rôles de tributaire et d'exutoire. Le Diko et l'Akpatohoun alimentent le lac,(Lac Toho — Wikipédia (wikipedia.org)).

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 (Kplé,2008).

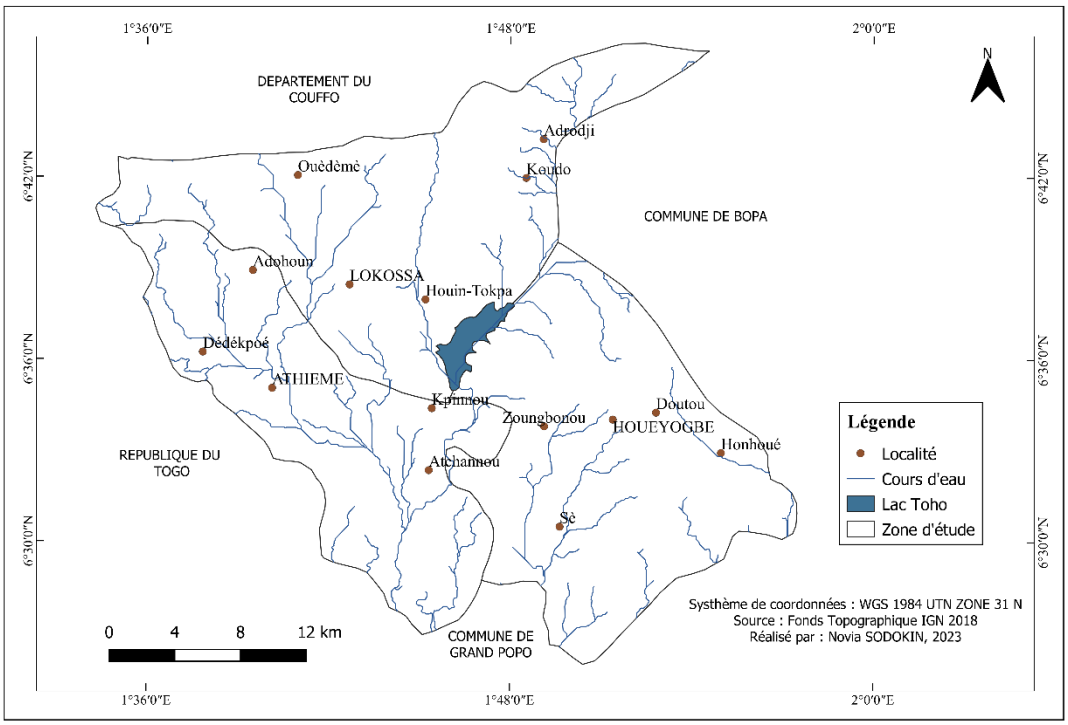


Figure 5 :Carte hydrographique du lac Toho

2-2-3 Activités socio-économiques

L'agriculture, l'élevage et la pêche, le commerce sont les principales activités de production.

2-2-3-1 Agriculture

Les groupes ethniques dont les Adja, les Sahouè, les Kotafons, les Watchi, les Xwla, les Mina, les Toffin, les Haoussa et les Yorubas qui se rencontrent le long du lac Toho considèrent l'agriculture comme une activité essentielle. Ils la pratiquent sur les plaines inondables en saison morte, principalement pour cultiver du maïs, du manioc, des haricots, de la canne à sucre, la banane, la tomate, le palmier etc.

2-2-3-2 Commerce

Le commerce le plus pratiqué est celui de la vente des poissons. 50% des pêcheurs vendent leurs poissons à leurs épouses, 47% à toute mareyeuse et 3% à tout client. En outre, il a été constaté que plusieurs marchands fidélisent leurs fournisseurs en préfinançant le matériel de pêche, soit en offrant aux pêcheurs repas ou tout autre cadeau. En plus du commerce de poissons, il existe des foyers de transformation des tubercules de manioc en gari et du vin de palme en sodabi (Ahouansou, 2003).

2-2-3-3 Elevage

L'élevage est perçu comme une activité secondaire et pratiquée par la plupart de la population. Cette activité concerne essentiellement les volailles, les ovins, les caprins, les bovins et les porcins.

2-2-3-4 Pêche

La pêche est la principale source de revenus de la population. Elle est pratiquée de façon individuelle ou collective par la majeure partie des riverains. Plusieurs engins et techniques de pêche sont utilisés par les pêcheurs. Les plus couramment utilisés sont :

- les filets (éperviers, filets maillants ou filets dormants) ;
- les lignes à hameçons individuels ou multiples (palangres) ;
- les barrages et les nasses-pièges ;
- le filet de barrage ou « mêdokpokonou » ;

2-2-4 Pédologie

Nous avons les sols ferralitiques et les sols hydromorphes :

Sols ferralitiques

On distingue deux types de sols ferralitiques :

- Les sols bien drainés sur sédiment meuble argilo-sableux du continental terminal qui couvrent la portion du plateau d'Agamé. Ils se remarquent par de bonnes caractéristiques physiques (profondeur, drainage, pénétrabilité) avec une fertilité liée aux réserves minérales disponibles (d'origine organique principalement) ainsi que la répartition des précipitations qui peut compenser dans une large mesure, l'exiguïté de leur besoin en eau (Kplé, 2008).

- Les sols ferralitiques hydromorphes sur sédiment argileux du continental terminal qui se caractérisent principalement par la succession d'un horizon A appauvri et d'un horizon B à pseudo-gley de profondeur (Kplé, 2008). Le matériau originel de ces sols serait un peu plus argileux que celui des sols bien drainés mais les propriétés chimiques sont sensiblement les mêmes et se traduisent par une pauvreté du matériau originel surtout potassique (Mededa, 1998).

Sols hydromorphes :

Ce sont des sols peu étendus qui se développent dans les milieux marécageux. On les retrouve aux abords du lac sur la rive nord et dans la région de Logbo. Ainsi, Ces sols recouvrent également le fond des vallées Diko et Akpatohoun. Ils contiennent dans leur horizon de surface, de la matière organique mal décomposée due à la présence d'une eau permanente pouvant être plus ou moins saumâtre. Les difficultés d'assainissement rendent les sols presque inutilisables pour l'agriculture (Mededa, 1998).

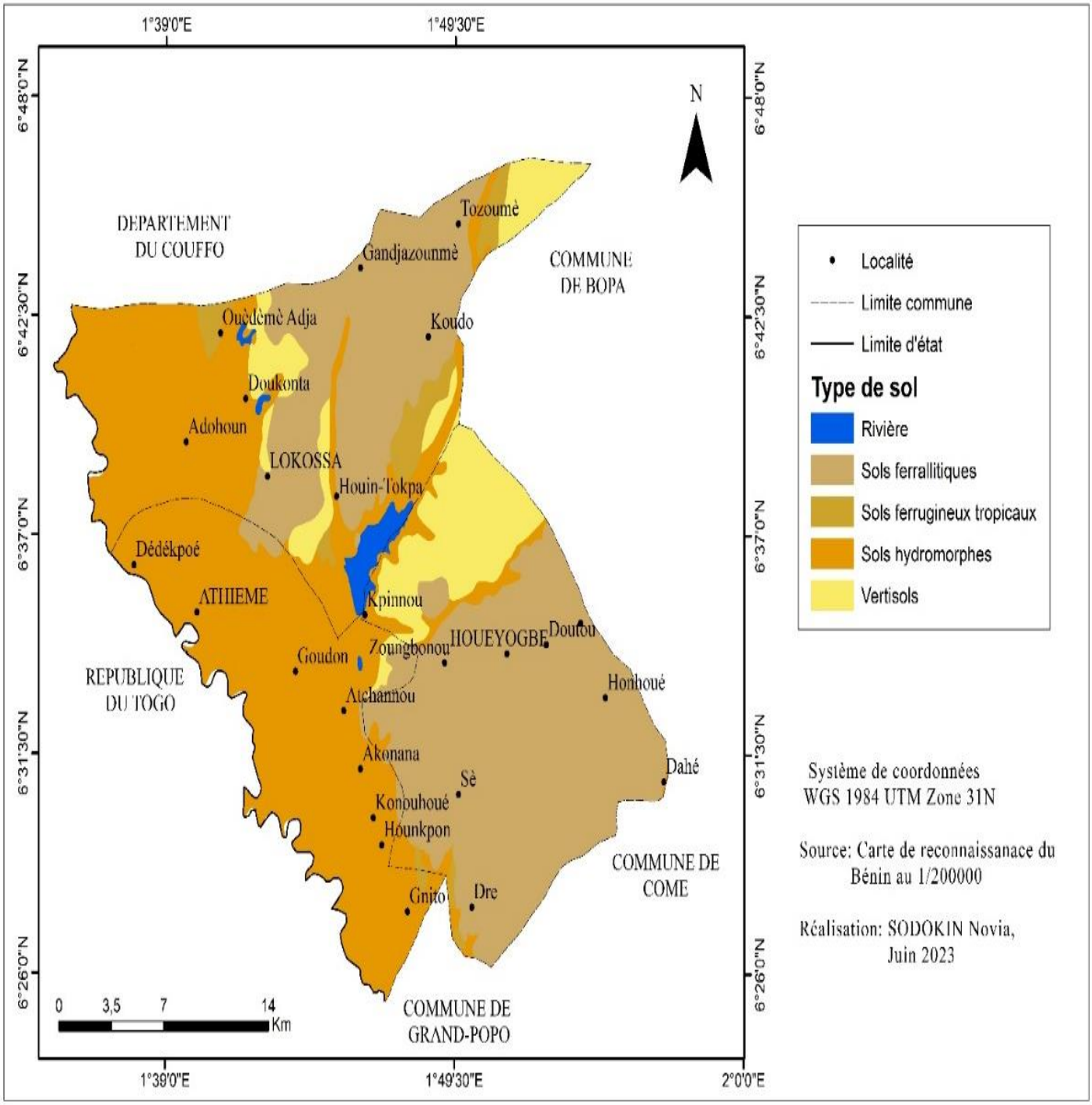


Figure 6 : Carte pédologique du lac Toho

CHAPITRE III : APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES

3-1 Collecte des données

Dans le but d'atteindre les objectifs de ce travail, plusieurs étapes ont été suivies : la recherche documentaire, la visite prospective et enquête, le choix des sites, l'échantillonnage, les travaux de terrain, l'analyse des échantillons au laboratoire et le traitement statistique des données qualitatives et quantitatives à partir du logiciel Rstudio. Les données collectées dans le cadre de notre étude sont quantitatives et qualitatives, les données planimétriques issues de la base de données de l'Institut Géographique National(IGN) ont été utilisées pour la réalisation des cartes.

3-1-1 Recherche documentaire

Dans le cadre de la réalisation de notre travail, la recherche documentaire a consisté en une collecte des informations dans les mémoires d'études antérieures et autres documents scientifiques qui abordent la problématique de la pollution organique des ressources en eau. Cette étape a permis de faire la synthèse des connaissances et recherches déjà effectuées pour mieux aborder le sujet d'étude. Elle a aussi permis de pouvoir orienter la collecte et le traitement des données. Elle s'est déroulée tout au long de la rédaction dans le but d'enrichir au fur et à mesure le travail et d'actualiser les informations ayant rapport au thème d'étude. Les centres de documentation et structures visités et les types d'informations recueillies sont énumérés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Récapitulation des centres de documentation et structures, et des types d'informations

N° d'ordre	Structures/ Centres de documentation	Types d'ouvrages consultés
1	Bibliothèque centrale de l'UAC	Livres, mémoires, rapports et articles
2	Hydrogéoclim	Livres, mémoires, rapports, thèses et articles
3	Laboratoire d'hydrologie appliquée	Livres, mémoires, analyses
4	Centre de documentation de l'IGN	Données planimétriques

Source : Enquête de terrain, SODOKIN Novia, Août 2023

3-1-2 Travaux de terrain

Les travaux de terrain ont été réalisés du 20/09/2023 au 22/09/2023. Ils se sont déroulés en deux phases : la phase d'enquête qui a permis d'approfondir nos inquisitions par des questionnaires et la phase d'échantillonnage qui a consisté à la collecte des échantillons d'eaux.

- **Enquête de terrain**

Les données sont collectées grâce à l'enquête de terrain dans différents villages du département du Mono. Ces inquisitions ont été concrétisées en deux phases : l'observation en milieu réel et le questionnaire d'enquête. La première phase est dédiée à un contact avec le cadre d'étude. C'est à ce niveau que les informations nécessaires à la description du fondement physique sont obtenues. La deuxième phase consiste à arranger d'entretiens individuels ou de groupe grâce au questionnaire d'enquête préparé (annexe 2). Le but de cette enquête effectuée dans les trois communes du Mono est de connaître le mode, la gestion des ressources en eau, la qualité de l'eau et l'origine de la pollution chimique des ressources en eau.

Les personnes interrogées ont été choisi sur la base des critères bien définis :

-Etre ménagé (e) âge (e) de 40ans au moins ;

-Habité (e) la localité depuis au moins 25ans ;

-Etre acteur (e) d'un secteur d'activités agropastorales ou gestionnaire d'un point d'eau ou usager d'un point d'eau.

La taille de l'échantillon a été déterminée en suivant la méthode de Schwartz (2002).

$$N = \frac{Z\alpha^2 PQ}{d^2}$$

Avec :

N= taille de l'échantillon

Zα= écart fixé à 1,96

P= rapport du nombre de ménages du village par le nombre de ménages de la commune

Q= 1-P

d= marge d'erreur qui est égale à 5%

L'enquête ayant porté sur les communes Lokossa, Athiémé, Houéyogbé du département du Mono, un taux d'échantillonnage de 30 % a été appliqué au résultat pour déterminer le nombre exact de ménages à questionner par village. On a eu à éliminer les arrondissements les plus loin du lac Toho puis un rabattement de 30% a été fait sur la population pour faciliter l'enquête de terrain. Le tableau 4 présente la typologie de l'échantillonnage à l'échelle du cadre d'étude.

Tableau 4 : Typologie de l'échantillonnage dans le département du Mono

Commune	Arrondissement	Nbr.Mge	Echant.	Pop.Enq
Lokossa	Koudo	2888	183	16
	Houin	1642	111	10
Athiémé	Atchannou	2054	216	19
	Kpinnou	2018	213	19
	Athiémé	3505	316	28
Houéyogbé	Doutou	6820	328	29
	Houéyogbé	1583	102	09
	Zoungbonou	1876	119	10
Total		22386	1588	140

- **Echantillonnage**

L'objectif de l'échantillonnage est d'avoir des échantillons représentatifs. A cet effet, trois sites ont été définis sur le lac. Les bouteilles de prélèvement ont été rincées deux à trois fois avec l'eau à échantillonner. Les échantillons d'eau ont été prélevés en amont, au centre et en aval du lac Toho sous la surface de l'eau et les bouteilles ont été remplies sans bulles d'air, fermées et enveloppées dans du papier aluminium pour protéger les échantillons des rayonnements solaires. Les échantillons pour les analyses physico-chimiques ont été prélevés dans des bouteilles en plastique de 1,5 litre après rinçage avec l'eau à échantillonner de manière à ne pas laisser de bulles d'air. Tous les échantillons d'eau sont conservés dans une glacière avec des accumulateurs de froid avant d'être transportés au laboratoire où ils sont conservés dans un réfrigérateur.

L'échantillonnage des sédiments s'effectuent sur des horizons à moyenne profondeur, les échantillons sont emballés dans des sacs (sac en polyéthylène), puis introduits dans une glacière jusqu'au laboratoire. Au laboratoire, les échantillons de sédiments ont été séchés à 105°C pendant 24h (poids constant) ensuite broyés, tamisés à 2 mm et homogénéiser. 1 g de ce sédiment a été minéralisé à l'eau régale (mélange d'acide chlorhydrique et nitrique) avant d'être analysé au spectrophotomètre UV pour la détermination du Cd, Cr, Cu et Pb.

Un point choisi donne l'échantillon d'eau en même temps que le sédiment.

La Figure 7 montre la répartition des sites de prélèvement des échantillons sur le lac Toho.

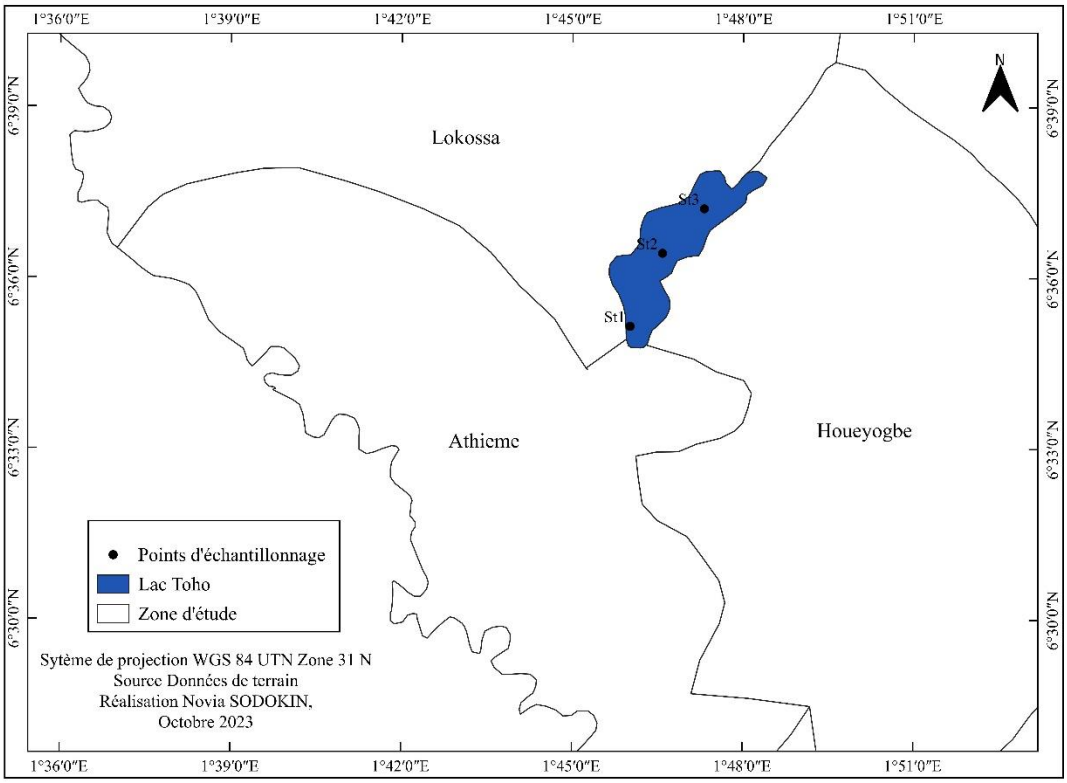


Figure 7 :Localisation des points d'échantillonnage autour du lac Toho

Critère de choix des points d'échantillonnage

Les sites d'échantillonnage ont été sélectionnés en tenant compte des relations avec les autres plans d'eau (entrée du fleuve mono), des activités anthropiques menées autour du lac Toho et de l'utilisation qui est faite de l'eau.

L'échantillonnage et le choix des points a été fait en amont, au centre et en aval du lac Toho. Au total, 03 sites ont été retenus suivant le procédé suivant :

- Trois (03) sites d'échantillonnage d'eau sur le lac Toho proche des localités que sont : Ces sites sont présentés dans le tableau 5 suivant présentant les localisations géographiques des sites étudiés :

Tableau 5 : Localisation géographique des sites étudiés

Sources	Localités	Sites d'échantillonnage	Coordonnées géographiques	
			X	Y
Eaux de sur face	Kpinnou, amont	St 1	1,76694444	6,5858333
	Lokossa, centre	St 2	1,77638889	6,6072222
	Lokossa, aval	St 3	1,78861111	6,6202778

3-2 Matériels et outils de collecte des données

Les matériels utilisés sur le terrain et au laboratoire sont notés dans le tableau 6 suivant :

Tableau 6 : Les matériels et outils utilisés

Matériels de terrain	
Paramètres physiques	
Matériels	Rôles
un GPS de marque	Pour enregistrer les coordonnées géographiques des sites d'échantillonnage ;
des flacons plastiques de 1,5 litre	Pour recueillir les échantillons d'eaux destinées aux analyses physico-chimiques
des flacons en bouteille de 250 ml	Pour l'échantillonnage d'eau destinée aux analyses d'HAP
une glacière	Pour conserver l'échantillon jusqu'au laboratoire
une fiche de terrain et un stylo	Pour relever les valeurs in-situ
un multi-paramètre	Pour la mesure des paramètres in-situ comme : le pH, la température, la conductivité, la turbidité, TDS

un appareil photo	Pour la prise des images
Matériel de laboratoire	
Paramètres chimiques	
Une verrerie de laboratoire (bêcher, burette, Erlenmeyer, fiole jaugée, pipette graduée…)	Pour préparer les solutions
Des échantillons d'eau	A prélever sur le terrain
Des solutions	Pour pouvoir doser et déterminer les paramètres recherchés
De l'eau distillé	Pour les analyses
Un chromatographe	Pour la mesure des HAP
Un spectrophotomètre HACH LANGE DR5000	Pour la mesure des métaux
Un autoclave	Pour le chauffage à vapeur humide

3-3 Traitement des données

Divers logiciels de traitement de texte et de données ont été utilisés.

-Le traitement des données qualitatives recueillies sur le terrain et celles issues des analyses de laboratoire, ainsi que le calcul des différents indices ont été réalisés grâce au logiciel RStudio qui est un environnement de développement gratuit, libre et multiplateforme pour R, un langage de programmation utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique.

-Notre questionnaire d'enquête a été réalisé avec Sphinx qui est un logiciel d'enquête et d'analyse des données. Il a permis d'établir les quatre grandes étapes de réalisation d'une enquête : L'élaboration du questionnaire (création, rédaction, impression) et sa diffusion (saisie des réponses par les répondants).

-Le logiciel Qgis 3.30.2 a servi à la réalisation des cartes en se basant sur les données planimétriques, issues de la base de données de l'Institut Géographique National (IGN). Les échantillons d'eau ont été prélevés au niveau de 3 sites. L'évaluation et la visualisation des résultats ont été effectuées à l'aide des logiciel Excel 2016 et RStudio.

3-4 Analyses des paramètres physico-chimiques

Les échantillons des eaux de surface prélevés pour l'analyse des paramètres physico-chimiques (mesurés in situ et au laboratoire) ont servi à l'évaluation de la qualité des eaux du lac Toho et de ses périphéries sur le plan physico-chimique. Les protocoles de dosages des

paramètres ont été faits par les méthodes standards d'analyse telles que décrites par Rodier et al.,2009.

3-4-1 Paramètres physiques

Il s'agit des paramètres in-situ dont le potentiel Hydrogène (pH), la Température (T en °C), la conductivité électrique (CE en µS), les TDS, la turbidité(UTN).

Ils sont mesurés avec un multi paramètre de marque AQUAREAD AP700. Pour chaque mesure, la sonde est d'abord rincée avec l'eau distillée et ensuite avec l'échantillon. La sonde a été ensuite plongés dans l'échantillon d'eau prélevé et les différents paramètres sont lus et consignés in-situ.

3-4-2 Paramètres chimiques

- **Cadmium**

Préparer, à partir de la solution fille, des dilutions (dans l'eau déionisée acidifiée à pH 2 avec HNO3) couvrant la gamme de concentrations souhaitées (max. : 10 µg/L. Injecter dans le four graphite 10 µL d'échantillon acidifié à pH < 2 par de l'acide nitrique. Sécher à 100 °C pendant 25 secondes, minéraliser à 900 °C pendant 30 secondes, puis atomiser à la température comprise entre 1 250 °C (sans modificateur) à 1 800 °C (avec modificateur) pendant 4 secondes. Effectuer les lectures à la longueur d'onde de 228,8 nm(Rodier,2009).

- **Chrome**

Préparer, à partir de la solution fille, trois ou quatre dilutions (dans l'eau ultra-pure acidifiée à pH, 2 avec HNO3) dans la gamme des concentrations souhaitées (max. : 50 µg/L). Dans une fiole jaugée bouchée émeri, introduire 50 mL d'eau à analyser et 3 mL de la solution acide de diphénylcarbazide. Agiter et laisser au repos 10 minutes. Préparer un témoin dans les mêmes conditions avec 50 mL d'eau déionisée. Effectuer les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 540 nm et tenir compte de la valeur lue pour le témoin. Se reporter à la courbe d'étalonnage(Rodier,2009).

- **Cuivre**

Préparer, à partir de la solution fille, des dilutions couvrant la gamme de concentrations souhaitées. Injecter dans le four graphite 10 µL d'échantillon acidifié à pH < 2 par de l'acide nitrique. Sécher entre 110 °C pendant 30 secondes, minéraliser (pyrolyse) à 1 100 °C (avec ou sans modificateur) pendant 40 secondes, puis atomiser à une température comprise entre 2 300 °C (sans modificateur) à 2 600 °C (avec modificateur) pendant 5 secondes. Effectuer les lectures à la longueur d'onde de 324,7 nm(Rodier,2009).

- **Plomb**

Préparer, à partir de la solution fille, des dilutions dans l'eau ultra-pure (acidifiée à pH 2 avec l'acide nitrique) couvrant la gamme de concentrations souhaitées (max. : 50 µg/L). Ajouter à 100 mL d'échantillon (acidifié à pH < 2 par de l'acide nitrique) 20 µL de solution d'acide phosphorique. Injecter dans le four graphite 10 µL. Sécher à 120 °C pendant 40 secondes, minéraliser (pyrolyse) à une température comprise entre 600 °C (sans modificateur) et 1 200 °C (avec modificateur) pendant 45 secondes, puis atomiser à une température comprise entre 1 500 °C (sans modificateur) et 2 000 °C (avec modificateur) pendant 5 secondes. Effectuer les lectures à la longueur d'onde de 283,3 nm(Rodier,2009).

❖ **HAP**

- Effecteur plusieurs solutions d'étalonnage (3 à 5 composés de référence par solutions) par dilutions de la solution étalon dans l'acétonitrile (selon la phase mobile utilisée en CLHP).
- Homogénéiser l'échantillon et l'introduire dans une ampoule à décanter.
- Rincer soigneusement le flacon de prélèvement avec de l'hexane (environ 25 mL) et récupérer l'hexane de rinçage dans l'ampoule à décanter.
- Agiter vigoureusement pendant 3 minutes et laisser décanter au moins 5 minutes.

Après décantation,

- Récupérer la phase aqueuse dans le flacon de prélèvement et la phase organique dans le ballon de l'évaporateur rotatif.
- Procéder à une nouvelle extraction dans les mêmes conditions et joindre le deuxième extrait au premier.
- Déshydrater l'extrait par 1 à 5 g de sulfate de sodium anhydre pendant 30 minutes au minimum.
- Décanter et récupérer la phase organique puis rincer deux fois avec quelques mL d'hexane.
- Concentrer à 10 mL à l'évaporateur rotatif sous vide à une température inférieure à 50°C. À ce niveau, deux protocoles peuvent être utilisés selon que le choix de la technique de dosage chromatographique.

  Dans le cas d'un dosage par chromatographie liquide, achever l'évaporation (sans toutefois atteindre la siccité) sous courant d'azote de haute pureté.
- Eliminer les traces d'hexane, ajouter 250 µL de diméthylfor-maldéhyde et 500 µl d'acétone et traiter sous flux d'azote jusqu'à environ 200 µL.
- Reprendre le résidu par du méthanol ou de l'acétonitrile (solvant de la phase mobile) jusqu'à un volume (par exemple) de 1 mL.

- Chromatographier en CLHP mode inverse avec une colonne dont la phase stationnaire est de type C-18 et une phase mobile acétonitrile ou méthanol/ eau avec en mode gradient d'élution (cf. § A-10.1.2) pour le dosage des quinze HAP. Le programme d'élution acétonitrile/eau est généralement initié avec un mélange 50/50 ou 60/40 et est linéaire pendant 30 à 40 minutes jusqu'à 100/0. La détection et la quantification par spectrométrie de fluorescence est réalisée aux longueurs d'onde conseillées (Rodier,2009).

3-5 Calculs des indices de contamination des sédiments des ETM

Indice de contamination « Ic » est un critère qui permet évaluer le degré de contamination métallique d'un sédiment. Cet indice de contamination est égal au rapport de la teneur mesurée sur la teneur de référence. **(**Fekhaoui et *al.*, 1996).

L'indice de contamination « Ic », est déterminé par la formule

$$Ic = \frac{\textbf{La teneur d'ETM relevée en mg/kg}}{\textbf{La teneur d'ETMconsidérée comme normale en mg/kg}}$$

Elle est repartie en trois classes par l'Agence du Bassin du Rhône (1990)**.**

Tableau 7: Classement du sédiment en fonction de l'indice de contamination Ic

Indice de contamination	Classement	Interprétations
Ic < 3	Classe 1	Zone Normale
3 ≤ Ic < 10	Classe 2	Zone Polluée
10 ≤ Ic	Classe 3	Zone à risque

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

4-1- RESULTATS

Les investigations menées ont abouti à des conclusions significatives, mettant en lumière les éléments clés de notre recherche.

4-1-1- Résultats des enquêtes de terrain

L'agriculture, le commerce, l'élevage et la pêche sont les activités menées autour du lac

L'agriculture est l'une des activités dominantes pratiquées par la population car elle se fait en période d'étiage en vue de pérenniser les produits halieutiques du lac Toho. Sur 140 ménages interviewées, 58 ménages pratiquent l'agriculture soit 41% de l'effectif (figure 8). La plupart des agriculteurs n'utilise pas des engrais chimiques dont 62 ménages soit 44% de l'effectif mais 50 ménages utilisent le NPK soit 36% de l'effectif et 28 utilisent l'Urée soit 20% de l'effectif (figure 9).

Ainsi, le commerce est une activité pratiquée par la population. Sur 140 ménages interviewées, 16 pratiquent le commerce soit 11% de l'effectif (figure 8).

L'élevage est pratiqué par la population et les animaux sont livrés à eux même, donc défèquent à l'air libre ou directement dans le lac Toho. Sur les 140 ménages interviewés, 12 ménages pratiquent l'élevage soit 9% de l'effectif(figure8).

La pêche est aussi une activité dominante. Elle est pratiquée sur le lac par la population. Sur les 140 ménages interviewés, 54 pratiquent la pêche soit 39% de l'effectif (figure 8) et sur les 140 ménages ,58 utilisent de produits naturels tels que la noix de palme, les vers de terre pour attirer les poissons soit 41% et 82 n'utilisent pas de produits soit 59% de l'effectif (figure10). Sur les 140 ménages, 50 utilisent les filets maillants soit 36% de l'effectif, 41 utilisent les Nasses soit 29%, 29 utilisent lignes simples soit 21% de l'effectif et 20 filets de barrage soit 14% de l'effectif (figure9).

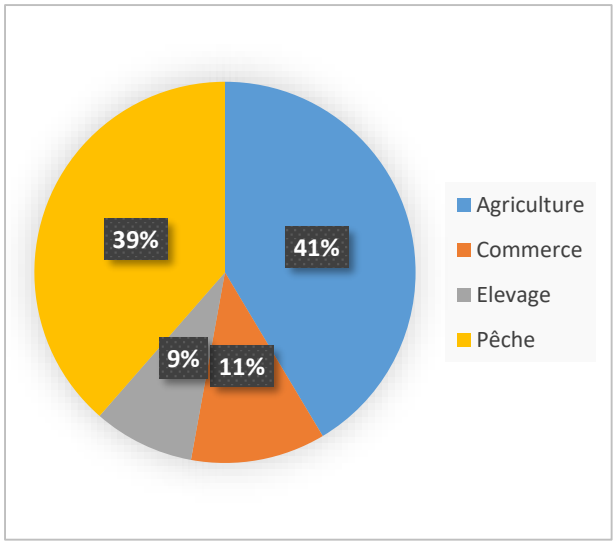


Figure 8 :Graphe montrant les différentes activités menées autour du lac Toho

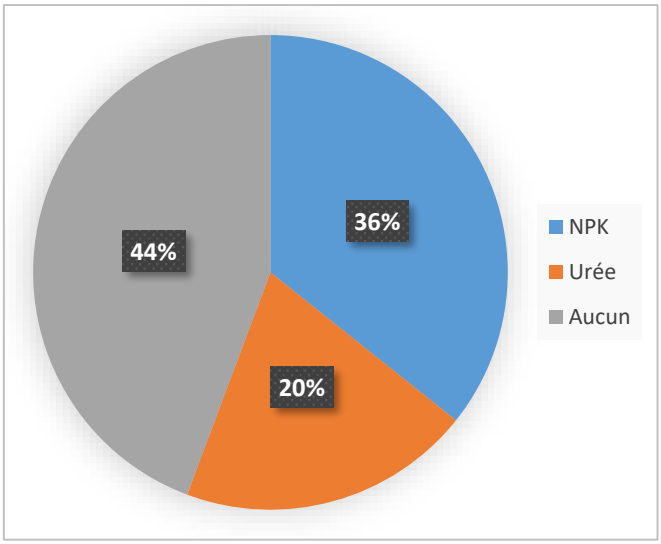


Figure 9 : Graphe montrant les engrais utilisés pour l'agriculture

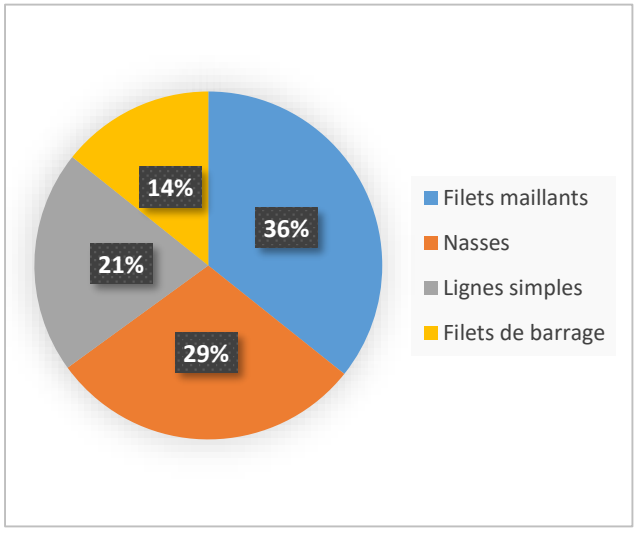


Figure 11 : Graphe montrant les techniques de pêche

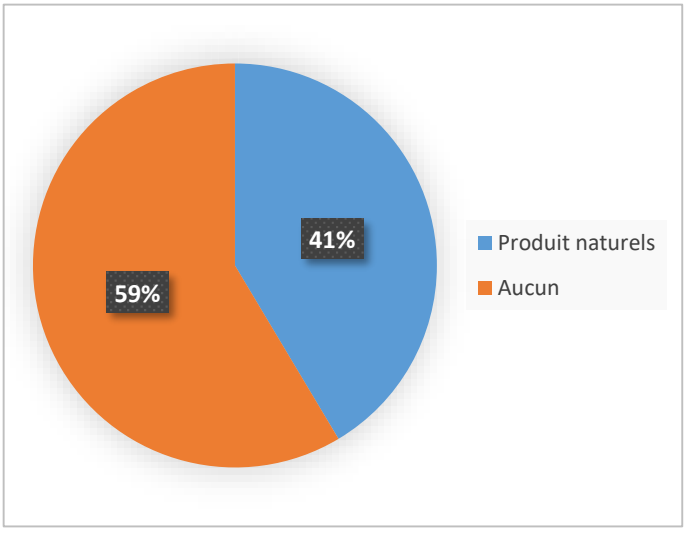


Figure 10 : Graphe montrant les produits utilisés pour attirer les poissons

4-1-2 Résultats des analyses physico-chimiques

Les différentes analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux prélevées ont donné les résultats ci-dessous :

4-1-2-1 Potentiel d'Hydrogène (pH)

Les résultats des mesures ont permis d'observer la variation du pH (Figure 12). Le pH des eaux du lac varie entre 7,2 (St2) et 7,7 (St3) avec une moyenne de 7,5. Ces valeurs du pH sont toutes dans l'intervalle de la NQE des eaux de surface requise pour le pH. Les valeurs du pH des eaux du lac ont une grande variation. Ces valeurs tendent vers la valeur maximale admise pour les eaux de surface où peut se développer la vie aquatique. Ce qui traduit le caractère basique de ces eaux.

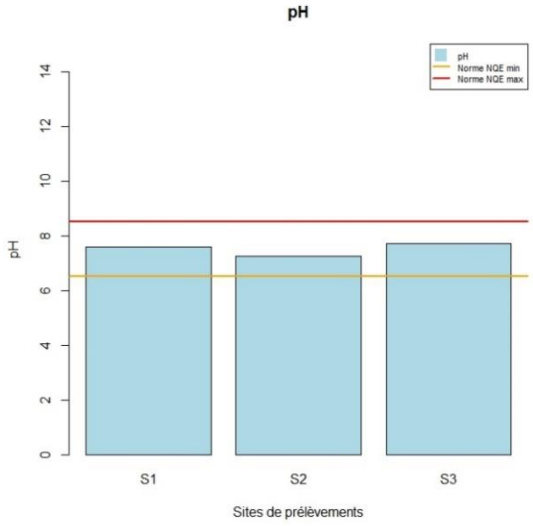


Figure 12 : Variations du pH dans le lac Toho

4-1-2-2- Conductivité électrique

La Figure13 montre la variation de la conductivité électrique. Les valeurs de la conductivité électrique enregistrées pour les eaux du lac montrent qu'elles sont faiblement minéralisées avec des valeurs qui varient entre 168 µS/cm (St1) et 439 µS/cm (site St3) avec une moyenne de 308,7 µS/cm. Toutes ces valeurs ne sont pas dans l'intervalle admise pour les eaux de surface par la NQE soit [750 ; 1300] µS/cm .

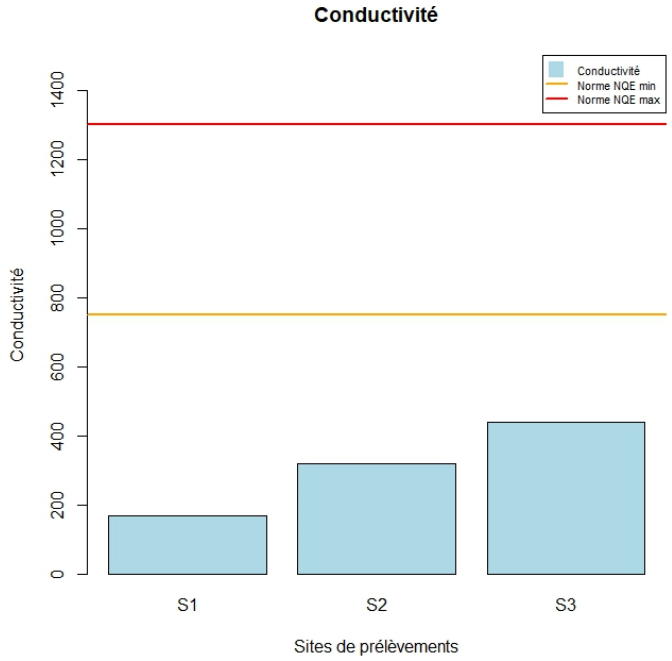


Figure 13 : Variation des valeurs de la conductivité électrique dans le lac Toho

4-1-2-3- Température

Les valeurs de température des eaux du lac Toho varient entre 30.2°C et 32.4 °C avec une moyenne de 31,4°C. La valeur minimale est observée au niveau du site St3 et la valeur maximale au niveau du site St2. Nous remarquons que les valeurs de la température de ces eaux ne se trouvent pas dans la plage [20 ; 25] qui représente la valeur normalisée pour ce paramètre (NQE,2015), (figure 14).

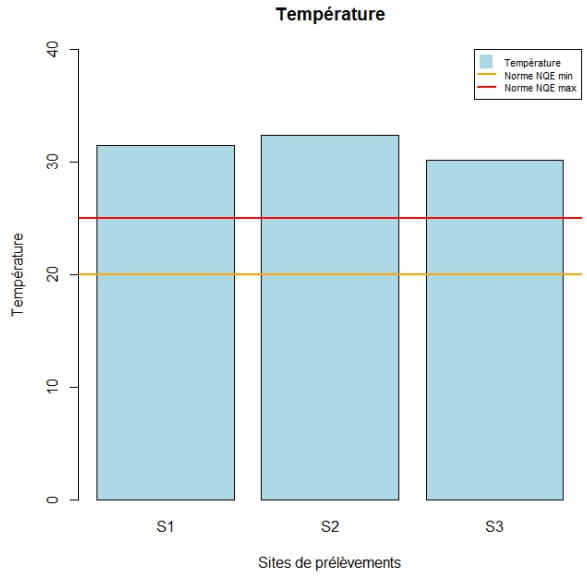


Figure 14: Variation de la température dans le lac Toho

4-1-2-4 Turbidité

La Figure 15 montre la variation de la turbidité. Les valeurs de la turbidité des eaux du lac varient entre 4,5 NTU (St1) et 22,11 NTU (St3) avec une moyenne de 9,64 NTU. Nous remarquons que ces valeurs se retrouvent dans la plage [5 ; 20] qui représente la norme admise pour ce paramètre (NQE,2015). De la figure 15, on constate que c'est le site St3 qui est plus trouble au niveau des eaux du lac. Ce paramètre étant souvent un signe d'une source de contamination de l'eau, on en déduit donc que cette eau est chargée en particules.

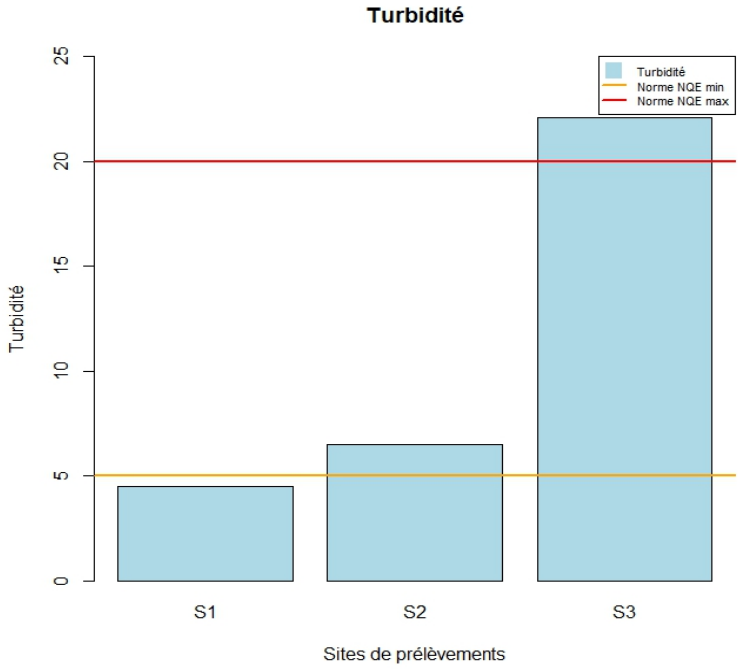


Figure 15: Variation de la turbidité dans le lac Toho

4-1-2-6 TDS

La Figure 16 montre la variation des TDS. Les valeurs des TDS enregistrées pour les eaux du lac varient entre 87 mg/L (St1) et 220 mg/L (St3) avec une moyenne de 66,55 mg/L. Aucune de ces valeurs ne se retrouve dans l'intervalle admise pour les eaux de surface par la NQE soit [500 ; 1200] mg/L.

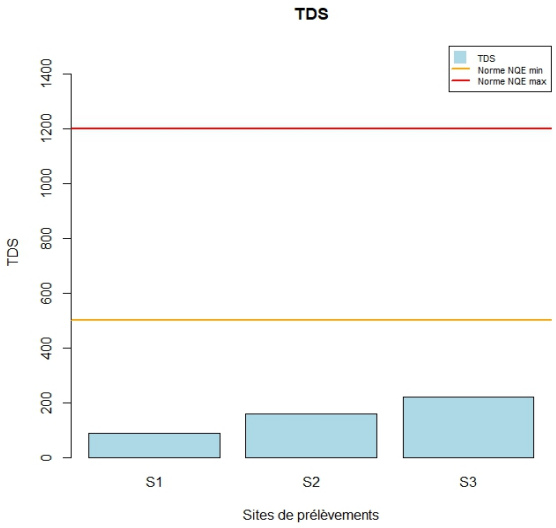


Figure 16 : Variation des TDS dans le lac Toho

4-1-2-7 Cadmium

D'après la figure 17, les valeurs du cadmium au niveau des eaux de surface varient entre 0 µg/L (site 1) et 28 µg/L (site 2) avec une moyenne de 16 µg/L. Toutes ces eaux analysées ne respectent pas la norme limite (NL) qui est de 0,4 µg/L. Celles au niveau des sédiments varient entre 108,6 mg/kg (St3) et 179,2 mg/kg (St1) avec une moyenne de 135,7 mg/kg (Figure 18), les valeurs au niveau des sédiments ne respectent pas la NL qui est de 3 mg/kg.

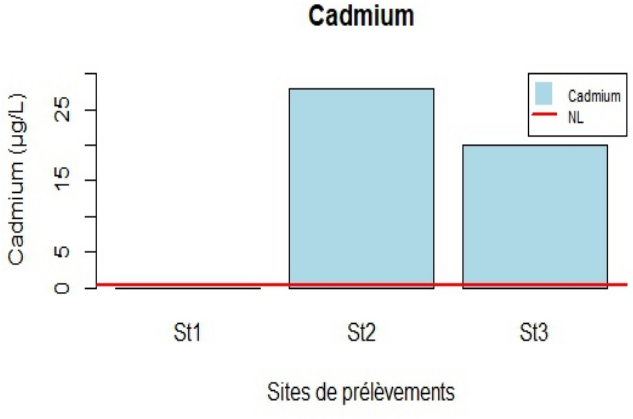


Figure 17 : Variation des valeurs du Cadmium au niveau des eaux

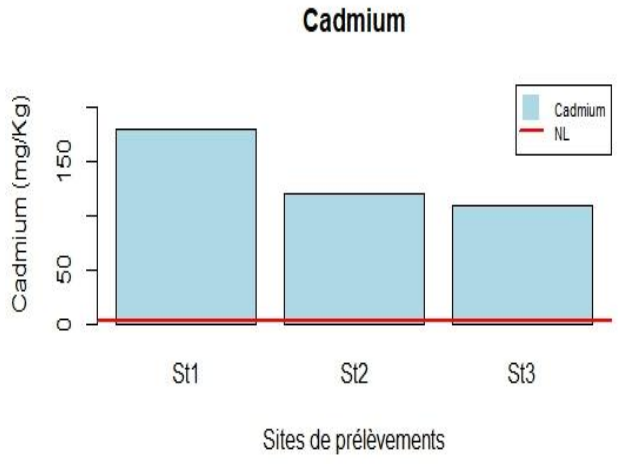


Figure 18 : Variation des valeurs du Cadmium au niveau des sédiments

4-1-2-8 Chrome

Les valeurs du chrome au niveau des eaux de surface varient entre 0 µg/L (site 1) et 28 µg/L (site 3) avec une moyenne de 10,06 µg/L. Toutes ces eaux analysées respectent la norme limite (NL)qui est de 50 µg/L (figure 19). Celles au niveau des sédiments varient entre 17,2 mg/kg(St3) et 99,4 mg/kg(St2) avec une moyenne de 68,08 mg/kg. Les valeurs au niveau des sédiments respectent la NL qui est de 200 mg/kg (figure 20).

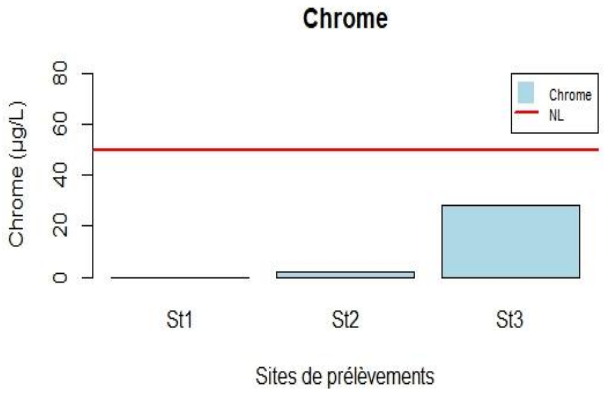


Figure 19 : Variation des valeurs du Chrome au niveau des eaux

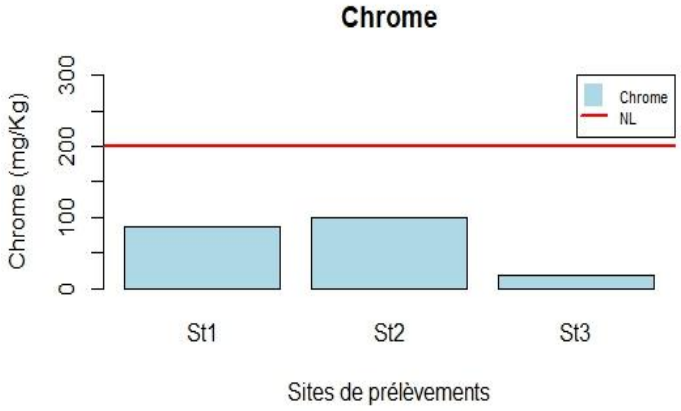


Figure 20 : Variation des valeurs du Chrome au niveau des sédiments

4-1-2-9 Cuivre

Les valeurs du cuivre au niveau des eaux de surface varient entre 0,4 µg/L (site 2) et 38 µg/L (site 3) avec une moyenne de 16,8 µg/L. Les eaux analysées au niveau des site1 et 3 ne respectent pas la norme limite (NL)qui est de 2 µg/L (figure 22). Celles au niveau des sédiments varient entre 0,15 mg/kg (St3) et 0,67 mg/kg(St1) avec une moyenne de 0,47 mg/kg. Les valeurs au niveau des sédiments respectent la NL qui est de 20 mg/kg (figure 21).

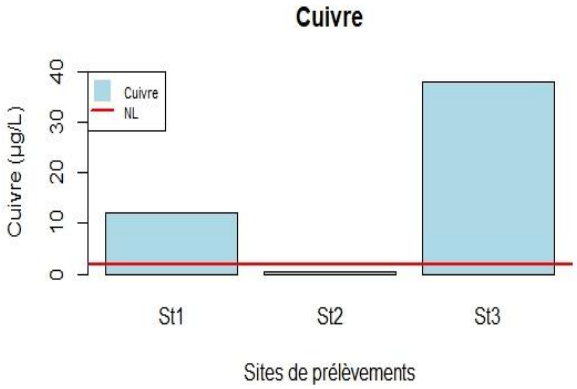


Figure 22 : Variation des valeurs du Cuivre au niveau des eaux

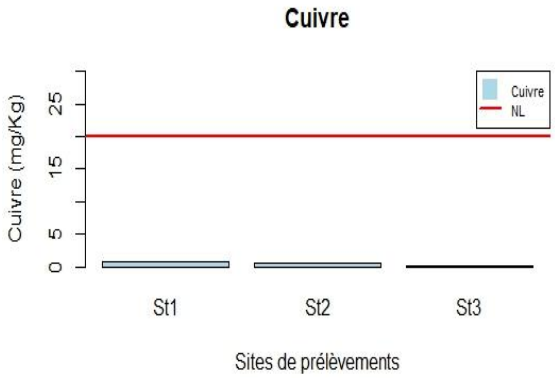


Figure 21 : Variation des valeurs du Cuivre au niveau des sédiments

4-1-2-10 Plomb

Les valeurs du plomb au niveau des eaux de surface varient entre 0 µg/L (site 3) et 190 µg/L (site 1) avec une moyenne de 73 µg/L. Les eaux analysées au niveau des sites 1 et 3 ne respectent pas la norme limite (NL) qui est de 10 µg/L (figure 24). Celles au niveau des sédiments varient entre 0,18 mg/kg (St2) et 0,24 mg/kg (St3) avec une moyenne de 0,20 mg/kg. Les valeurs au niveau des sédiments respectent la NL qui est de 120 mg/kg (figure 23).

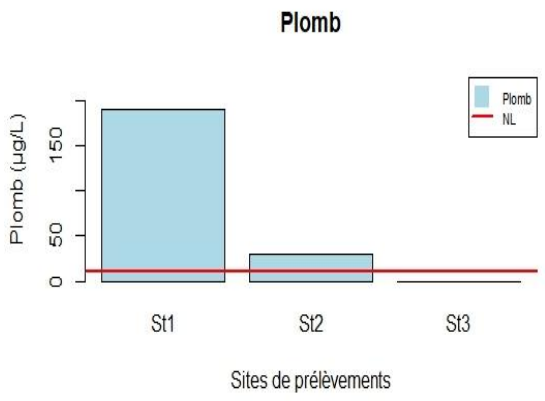


Figure 24 : Variation des valeurs du plomb au niveau des eaux

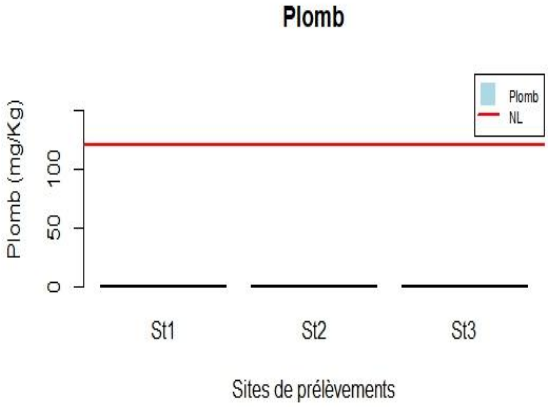


Figure 23 : Variation des valeurs du plomb au niveau des sédiments

4-1-2-1-1 Résultats des HAP au niveau des eaux et des sédiments

Le groupe A représente les HAP non cancérigènes dont la somme des concentrations ne doit pas dépasser 200 µg/L et le groupe B représente les HAP cancérigènes dont la somme des concentrations ne doit pas dépasser 1 µg/L. Nous avons eu à analyser 24 HAP dont la présence des HAP cancérigènes pouvant nuire aux espèces aquatiques et la santé humaine.

-HAP au niveau des eaux

L'annexe 14 présentant les résultats de la concentration des HAP au niveau de l'eau et le Critère Règlement 2013-57 montre que les concentrations sont inférieures au règlement 2013-57. Ainsi, il n'y a eu aucun dépassement du critère de règlement des éléments du groupe A au niveau des trois sites. La sommation des HAP la plus élevée est observée au niveau du site 1(0,089 µg/L) mais elle ne dépasse pas la concentration maximale qui est limitée à 200 µg/L. De même, pour les éléments du groupe B, aucune sommation des HAP n'a dépassé le critère Règlement 2013-57. La plus élevée des sommations est observée au niveau du site 2(0,35 µg/L) mais elle n'excède pas la concentration maximale qui est limitée à 1 µg/L (annexe 14). Des résultats , le Naphtalène, l'Acénaphtène, l'Acénaphtylène et le Fluorène, l'Anthracène, Fluoranthène**,** le Pyrène, le Benzo(c)phénanthrène ne sont pas présents au niveau des trois sites par rapport aux eaux de surface.

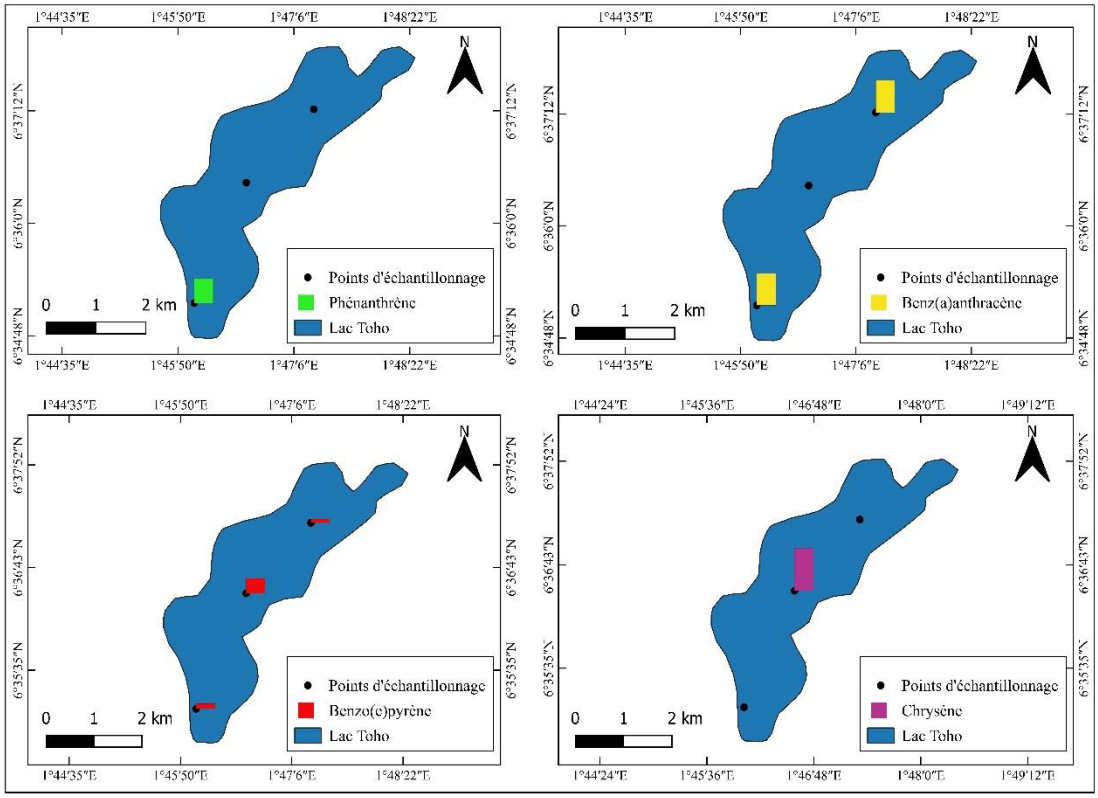


Figure 25: Variation des HAP dans les eaux au niveau du lac Toho

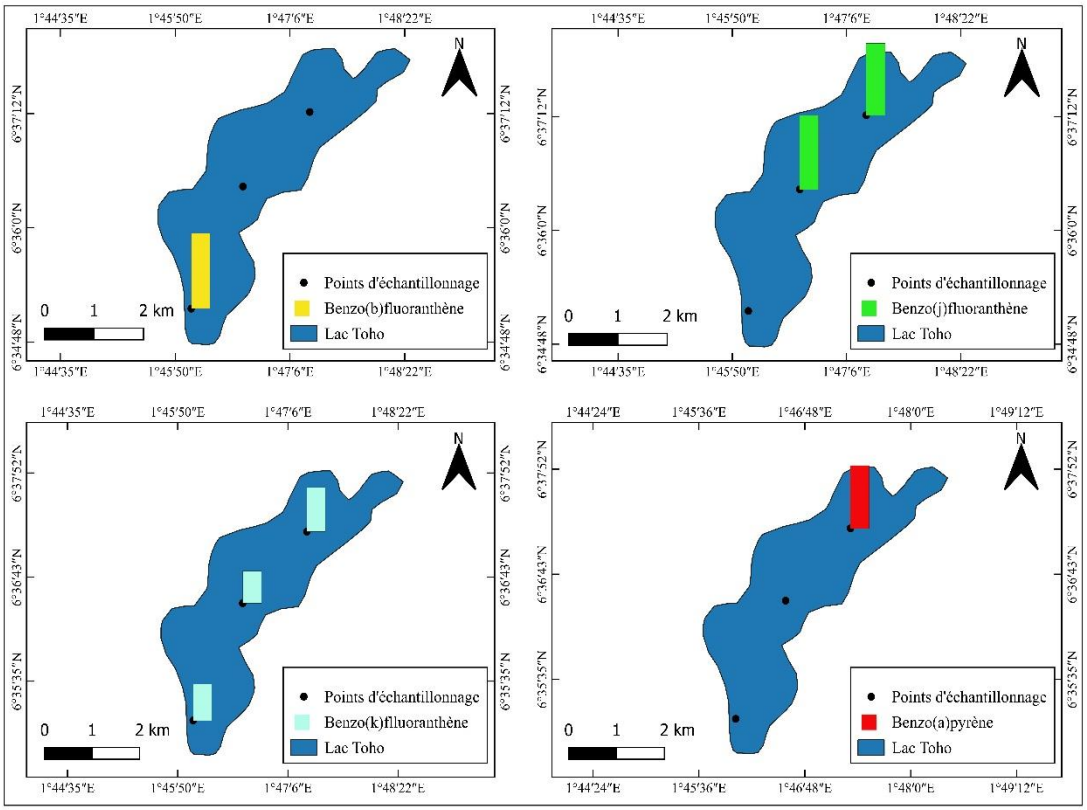


Figure 26 : Variation des HAP dans les eaux au niveau du lac Toho

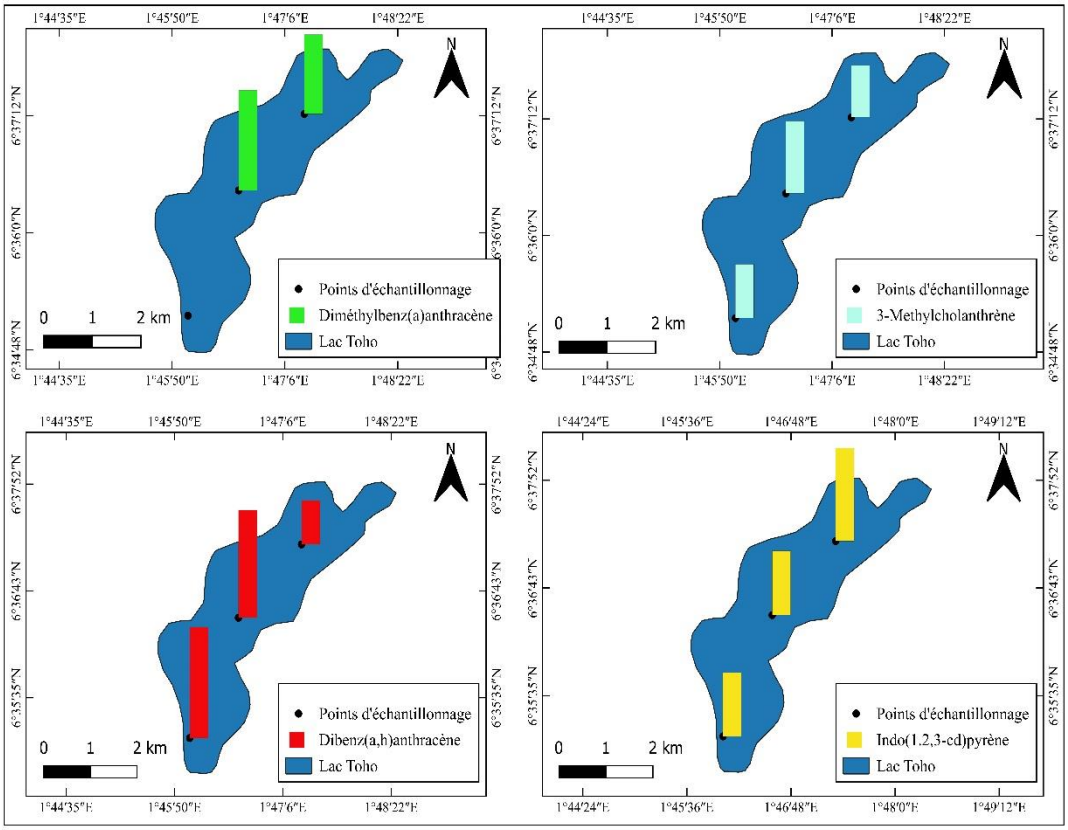


Figure 27 : Variation des HAP dans les eaux au niveau du lac Toho

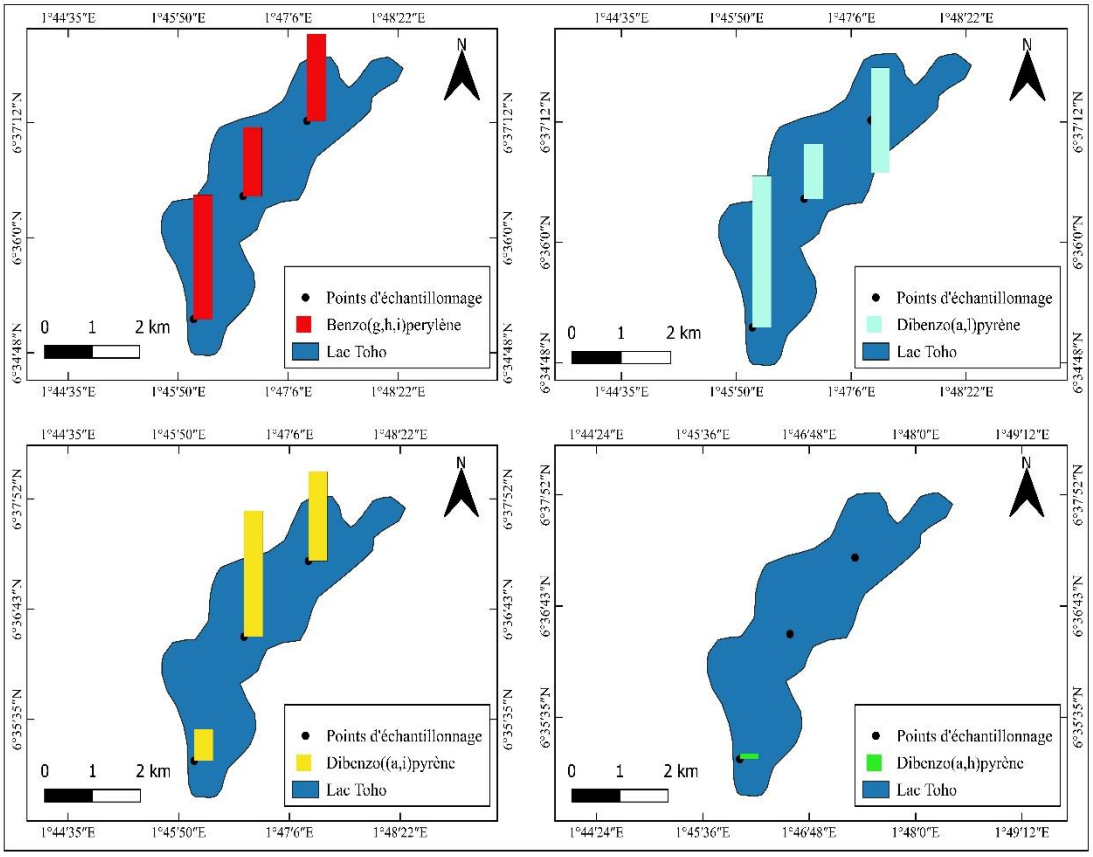


Figure 28 : Variation des HAP dans les eaux au niveau du lac Toho

4-1-2-1-2- Résultats des HAP au niveau des sédiments

L'annexe 15 présentant les résultats de la concentration des HAP au niveau des sédiments et le Critère Règlement 2013-57 montre que les concentrations sont inférieures au règlement 2013-57. Ainsi, il n'y a eu aucun dépassement du critère de règlement des éléments du groupe A au niveau des trois sites. La sommation des HAP la plus élevée est observée au niveau du site 3 (6,549µg/L) mais elle ne dépasse pas la concentration maximale qui est limitée à 200 µg/L. De même, pour les éléments du groupe B, aucune sommation des HAP n'a dépassé le critère règlement 2013-57. La plus élevée des sommations est observée au niveau du site 3(2,45µg/L) mais elle n'excède pas la concentration maximale qui est limitée à 1 µg/L (annexe 15).

Des résultats, le naphtalène n'est pas présent au niveau des trois sites

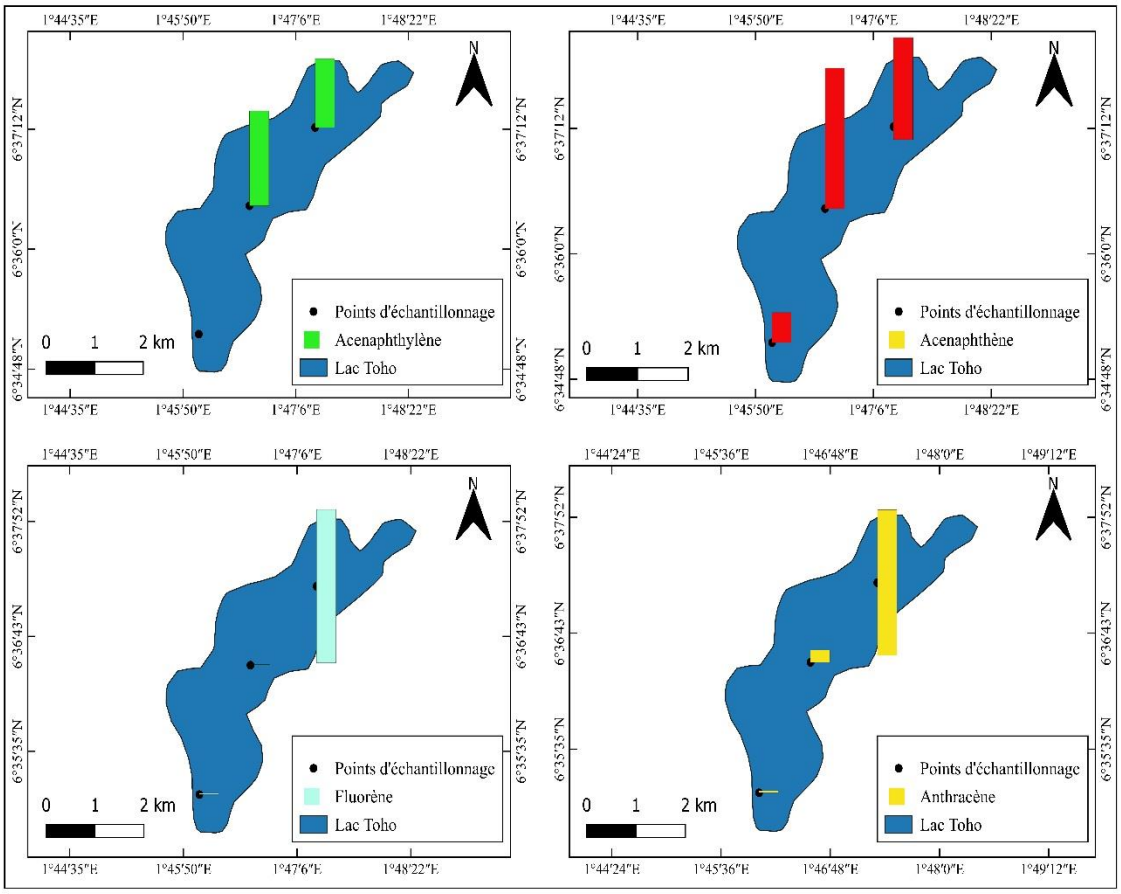


Figure 29 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho

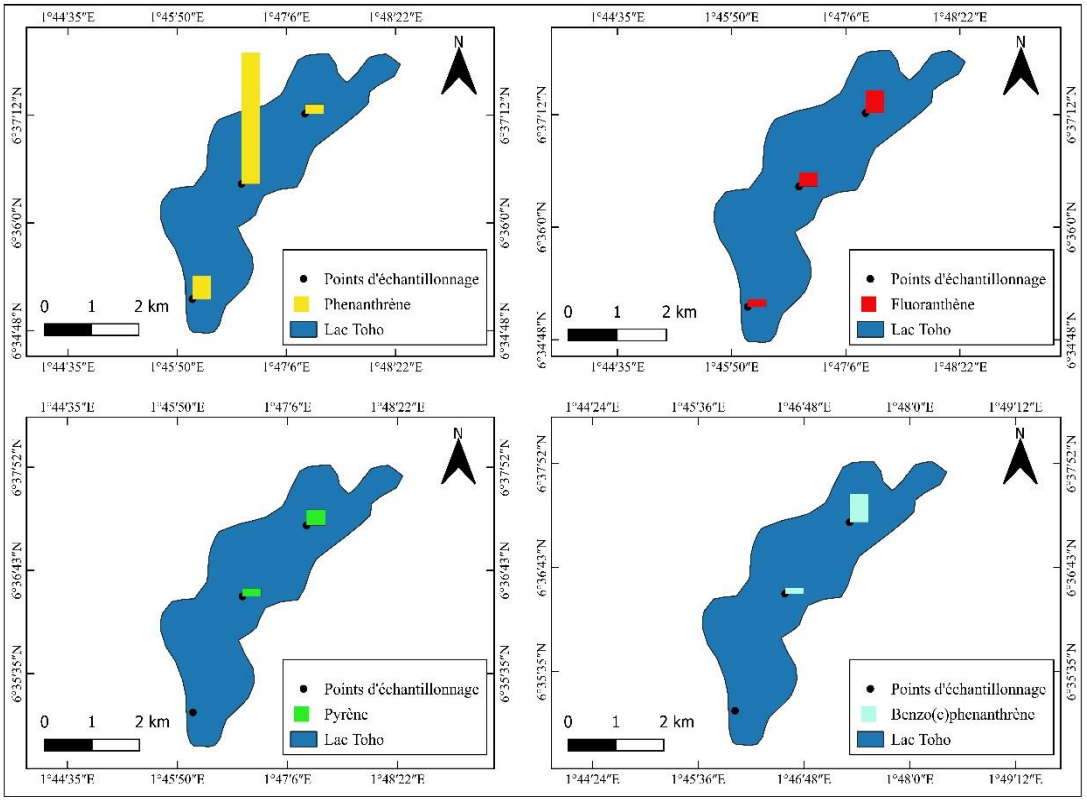


Figure 30 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho

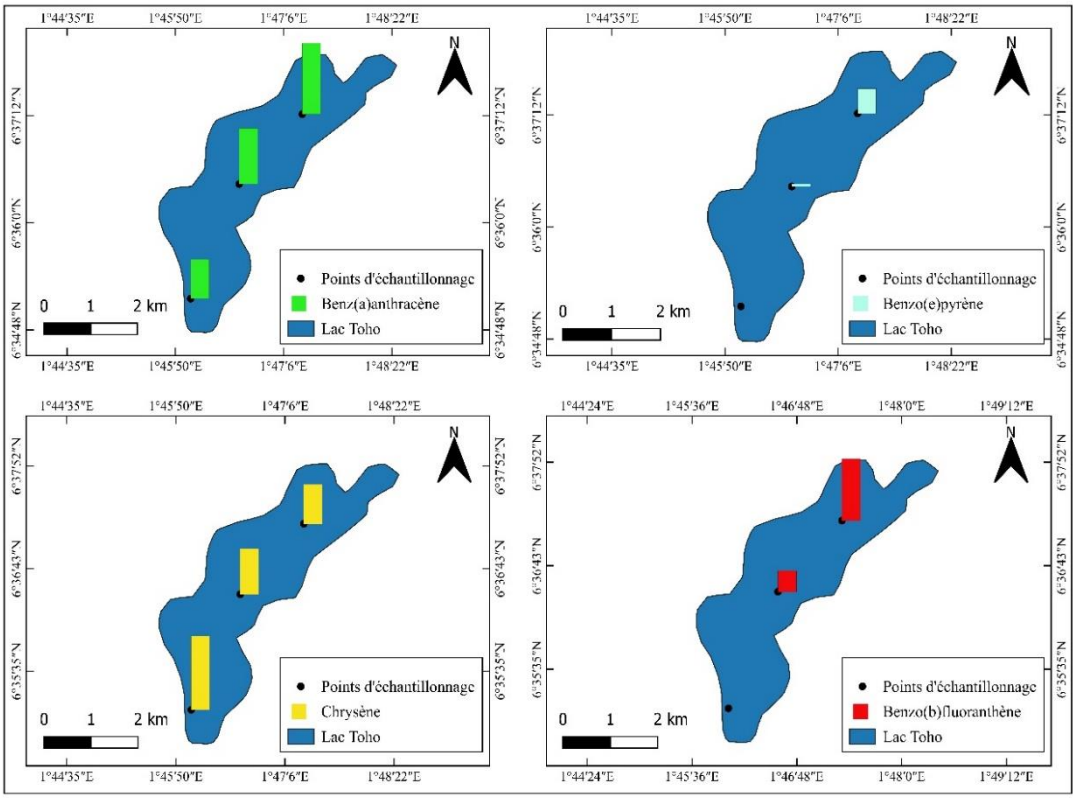


Figure 31 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho

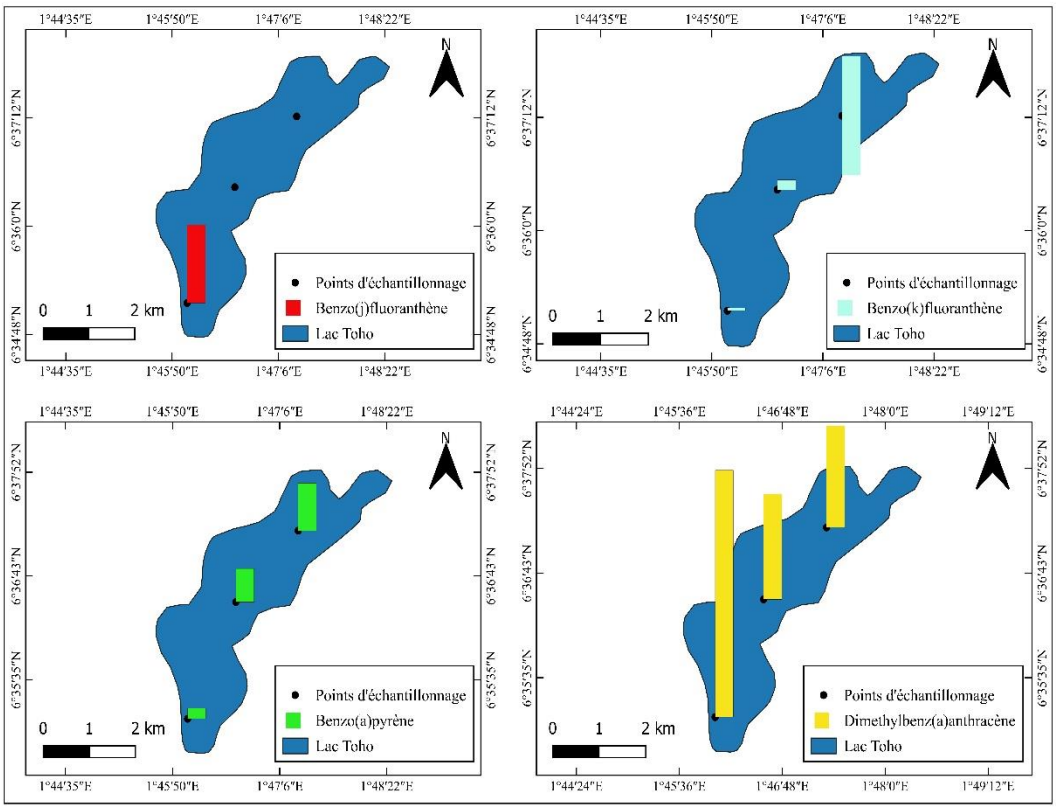


Figure 32 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho

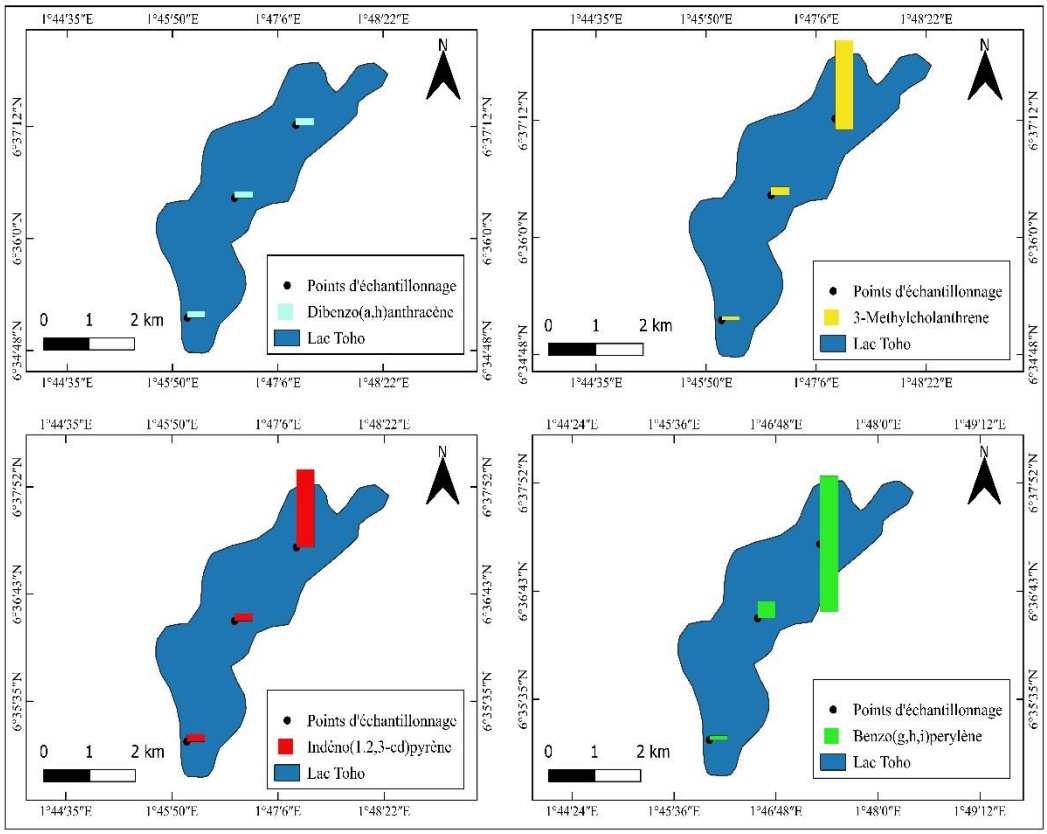


Figure 33 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho

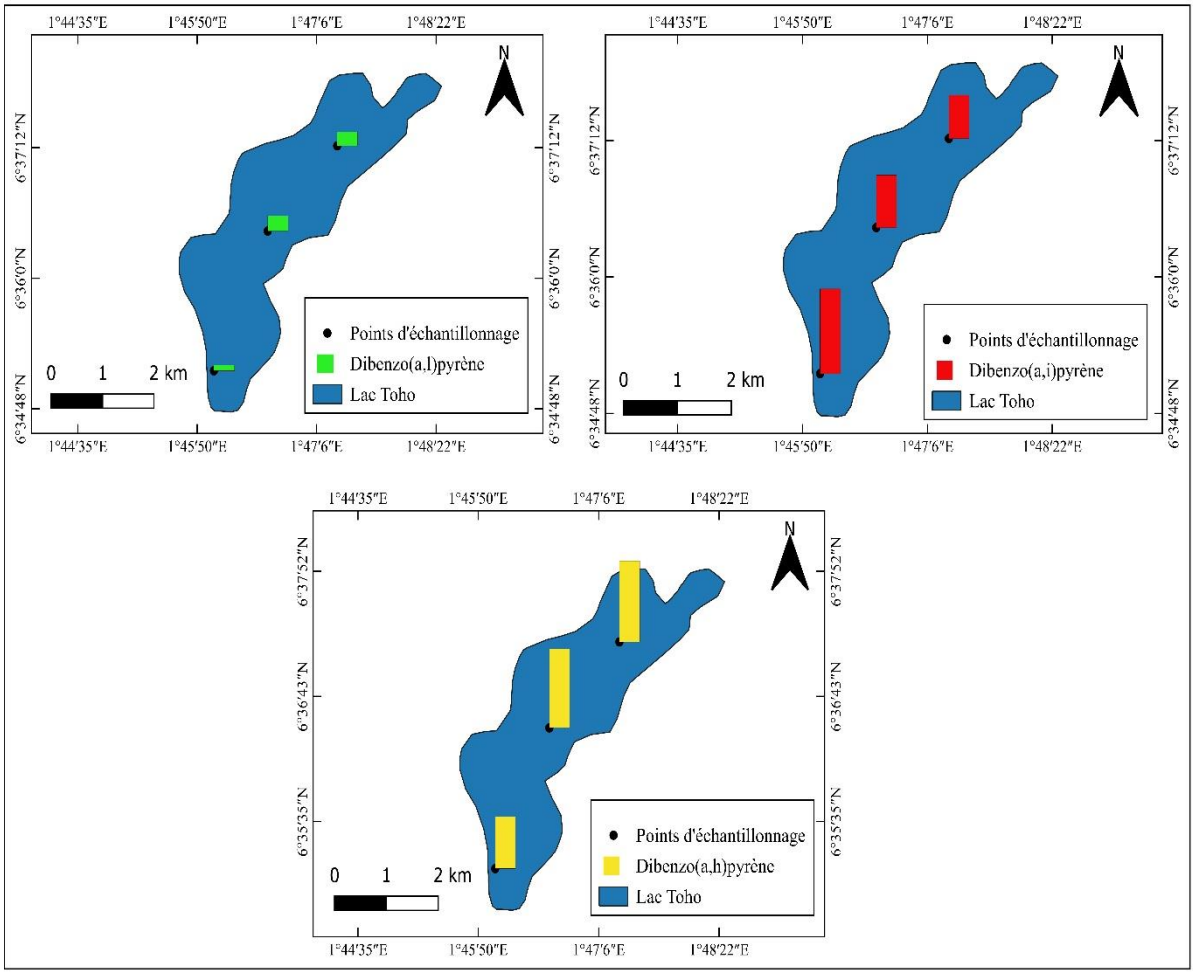


Figure 34 : Variation des HAP dans les sédiments au niveau du lac Toho

4-1-3- Résultats des calculs d'Ic

L'annexe 8 présentant les résultats des calculs d'Ic révèle que l'indice de contamination (IC) du Cd est largement supérieur au niveau des trois sites (Annexe 8) donc ces sites sont des zones à risques. Par contre l'IC (Cu, Cr, Pb) est inférieur à 3.

4-2 DISCUSSION

L'eau du lac Toho intervient dans plusieurs activités, nous pouvons citer entre autres : l'agriculture, le commerce, l'élevage, la pèche.

Les résultats des paramètres physico-chimiques obtenus au cours de nos travaux ont montré que les valeurs de température des eaux du lac Toho varient entre 30.2°C et 32.4 °C avec une moyenne de 31,4°C. En effet, elles influencent les processus biologiques dans les systèmes aquatiques (Kadlec et Reddy,2001) Les valeurs de la température enregistrée au niveau des trois sites se trouvent dans le même lot de température obtenue par Chouti et al., (2018) sur la lagune côtière. Elles correspondent également aux températures observées par Dedjiho (2011) et Chouti (2011) respectivement dans les eaux du lac Ahémé et de la lagune de Porto-Novo. Pour une bonne croissance des espèces aquatiques, il faut une marge de température de 24 °C à 35 °C (Dedjiho, 2011). Les valeurs du pH mesurées au niveau des trois sites (7,2 à 7,7) sont similaires aux valeurs enregistrées par Chouti et al., (2017) au sein de la lagune côtière (7,2 à 7,53). Ces valeurs sont également conformes avec les travaux de Falconbridge (2001) concluant qu'une eau à pH naturel d'intervalle 6,5 et 9,5 est un bon indicateur pour le développement optimal du milieu aquatique. La valeur de turbidité observée au niveau du site 1 est inférieure à la norme NQE (5-20) NTU, celle obtenue au niveau du site 2 respecte la norme mais la valeur obtenue au site 3 est supérieure à la NQE. Nous pouvons ainsi conclure que le site 3 ne respecte la norme à cause des activités anthropiques menés autour du lac. En effet, les valeurs élevées de la turbidité s'expliquent par les apports des eaux de ruissellement, des activités anthropiques sur et autour du lac. Ces résultats obtenus sont contraires à ceux de Zandagba et al., (2016) sur le lac Nokoué où les valeurs de turbidité sont supérieures à la norme. Les analyses sur les éléments traces métalliques (ETM) ont montré que ceux-ci ne sont pas présents sur tous les sites mais sont élevés sur certains sites à des quantités dépassant la norme exigée et représente donc un danger pour les espèces aquatiques et aussi pour l'Homme. Dans la présente étude, les valeurs élevées des ETM sont dues à l'utilisation des engrais et pesticides du fait que le lac Toho est dans une zone qui l'expose fortement aux activités anthropiques. Ainsi, les fortes teneurs en cuivre ont été relevées sur les sites 1 et 3 au niveau de l'eau. Ces valeurs sont supérieures à la NL des eaux de surface en France. Ces teneurs peuvent provenir de l'utilisation des pesticides à base de cuivre, par les agriculteurs afin de lutter contre les invasions fongiques au sein des cultures. Même à faible teneur le cadmium est un élément trace très toxique par effet cumulatif, il agit même à de faibles concentrations mais il est très élevé au niveau des sites 2 et 3 pour des eaux de surface et au niveau des trois sites pour les sédiments. Les teneurs en plomb constituent un risque pour

l'Homme et les organismes présents dans le lac Toho. Ces teneurs au niveau des sites St1 et St2 sont supérieures à la NL des eaux de surface en France. Ces teneurs pourraient être dues aux gaz d'échappement des véhicules (Abdallaoui, 1990), aux rejets et aux activités agricoles. Les métaux étudiés (Cr, Cu, Cd et Pb) sont plus concentrés dans les sédiments alors qu'ils sont faiblement présents dans les eaux. Cela pourrait s'expliquer par la variation du volume de l'eau. Les valeurs les plus élevées s'observent aux niveaux des trois sites du cadmium. Ces résultats confirment ceux de Chitou en 2017 au sein de la lagune côtière qui découvrit des teneurs très élevées en Cu dans les eaux et sédiments. Ces résultats sont également semblables à ceux de Dèdjiho (2014) et de Bocodaho (2014) au niveau du lac Ahémé qui ont tous deux constaté des teneurs très élevées en Zn dans les eaux et sédiments du lac. Aussi, les rejets des déchets observés sur la majorité des stations pourraient être des sources probables de contamination de la lagune en Cu, Cd. Le Cu et Cd montrent la même tendance avec une augmentation remarquable dans la partie aval de la lagune (Bocodaho, 2022). La concentration des HAP au niveau de l'eau et le Critère Règlement 2013-57 montrent que les concentrations sont inférieures au critère règlement 2013-57. Ainsi, il n'y a eu aucun dépassement du critère de règlement des éléments du groupe A au niveau des trois sites. De même, pour les éléments du groupe B, aucune sommation des HAP n'a dépassé le critère règlement 2013-57. Il y a absence du naphtalène, du acénaphtène, du acénaphtylène du Fluorène, de l'anthracène, du fluoranthène**,** du Pyrène, du Benzo(c)phénanthrène au niveau des trois sites par rapport aux eaux de surface. La concentration des HAP au niveau des sédiments et le Critère Règlement 2013-57 montrent que les concentrations sont inférieures au règlement 2013-57. Ainsi, il n'y a eu aucun dépassement du critère de règlement des éléments du groupe A au niveau des trois sites. De même, pour les éléments du groupe B, aucune sommation des HAP n'a dépassé le critère règlement 2013-57 mais il y a une absence du naphtalène au niveau des trois sites. Cependant, notre recherche met en lumière les conséquences sur la santé humaine dues à l'exposition aux HAP, telles que des problèmes respiratoires. Cette observation est en accord avec les conclusions de l'étude de Smith et al. (2021), qui ont mis en évidence des effets sur la santé liée aux HAP malgré le respect des normes. Nos résultats indiquent une accumulation de HAP dans les sédiments. Cette observation rejoint les conclusions de l'étude de Chen et al. (2020), qui ont montré que les HAP sont susceptibles de s'accumuler dans les sédiments et d'influencer les écosystèmes benthiques. Les calculs d'IC ont indiqué que le cadmium est fortement élevé ($10 \leq Ic$), ce qui est un risque pour les espèces aquatiques et l'homme. Ce résultat était prévisible au regard des

valeurs élevées des paramètres physico-chimiques que sont : Turbidité, température, cuivre, chrome, cadmium, plomb.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail nous a permis d'étudier la pollution chimique des eaux du lac Toho. Il a été mis en relief que la pollution des compartiments eaux et sédiments du lac Toho sont fortement liés aux rejets provenant des activités humaines. Les résultats des analyses physico-chimiques dévoilent que les propriétés des eaux sont bonnes pour certains paramètres. Par contre, les paramètres (Turbidité, température, cuivre, chrome, cadmium, plomb) dépassent les normes. Ainsi, l'analyse physico-chimique de l'ensemble des paramètres étudiés révèle donc une évolution progressive de la pollution de l'écosystème due surtout à l'influence des pressions anthropiques exercées sur la ressource. La pollution des eaux et sédiments du lac présente un risque pour les organismes aquatiques, la chaîne trophique et la santé de la population. Vue l'ampleur que prend la pollution au sein du lac Toho, des mesures urgentes doivent être prises dans tous les secteurs d'activités liés à l'eau et l'environnement afin de préserver ces ressources en eau contre les menaces à long terme. Du point de vue scientifique, cette étude devra être élargie par d'autres études complémentaires précisément sur les espèces halieutiques (poissons, fruits de mer…etc.) et sur les végétaux aquatiques tout en ciblant les sites plus pollués en vue de mieux cerner les échanges entre les différents compartiments du milieu aquatique. La biodisponibilité et la bioamplification des ETM doivent être recherchées malgré la faible teneur au sein des eaux et des sédiments ; de même pour le cuivre et le plomb au niveau des sédiments. Les HAP au niveau des eaux et des sédiments sont faibles. Ils ne présentent aucun problème pour les espèces aquatiques mais ils sont cancérigènes. Les HAP à forte concentration peuvent absorber les matières particulaires et les matières organiques. Nous pouvons dire que le lessivage des particules du sol et leur dispersion par le vent peuvent entraîner les HAP dans des sols vers les autres compartiments. Cependant, il est impératif de reconnaître que, bien que les concentrations mesurées restent en deçà de ces seuils, les HAP demeurent des sources de pollution chimique significatives. Ces composés, en raison de leur persistance, de leur toxicité à long terme et de leur potentiel à s'accumuler dans les sédiments, peuvent continuer à exercer des pressions écologiques sur les écosystèmes aquatiques. Il est donc essentiel de maintenir une surveillance et des mesures de gestion rigoureuses pour prévenir l'aggravation de la pollution chimique due aux HAP, même si les niveaux actuels ne dépassent pas les normes règlementaires. Les calculs d'Ic nous ont permis de classer les sédiments (l'Ic du cadmium au niveau des trois sites) dans la classe3 c'est dire une zone à risque.

Les résultats obtenus au cours de ce travail serviront pour différentes structures du secteur de l'eau et de la santé publique afin de réduire les risques de contamination de ces eaux. Pour limiter les conséquences liées à la pollutions physico-chimique de ces eaux, nous suggérons de :

- Sensibiliser les populations sur les règles d'hygiène ;
- Installer des poubelles publiques ;
- Interdire d'utiliser les berges du lac comme des dépotoirs de tas d'ordure ;
- Sensibiliser les producteurs sur l'utilisation des pesticides et engrais chimiques ;
- Sensibiliser la population sur les conséquences à court et à long terme des Eléments Traces Métalliques et les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques ;
- Promouvoir les matériels de pêche fabriqués sans les constituants métalliques ;
- Mettre à la disposition des agents collecteurs et de la population des dispositifs adéquats et des moyens efficaces pour le ramassage des ordures dans les villages en amont et en aval du lac.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1- ADJAGODO, A., AGASSOUNON, M., TCHIBOZO, D., KELOME, N. C., & LAWANI, R. (2016) : Flux des polluants liés aux activités anthropiques, risques sur les ressources en eau de surface et la chaine trophique à travers le monde : synthèse bibliographique Flow of pollutants linked to anthropic activities, risks on worldwide surface water and food chain resource : literature review. 10(June), p1459–1472.

2- AHOUANSOU, Montcho. (2005) : Etude de l'écologie et de la production halieutique du lac Toho au Bénin. Thèse de DESS, FSA/UAC, 83p.

3- Antoinette ADJAGODO, Lucie AYI FANOU, Nelly Carine KELOME, Micheline AGASSOUNON DJIKPO TCHIBOZO, Flavien DOVONOU et Abiolla Robertson Kévin AMOUSSOU : Qualité de l'eau du fleuve Ouémé au cours de la période de hautes eaux de 2016 dans la commune des Aguégués au Sud Bénin : Afrique science 14(2) (2018), p :100-111.

4- ARNAUD MATHIEU, DENIS BAIZE, CHRISTOPHE RAOUL, CÔME DANIAU : Proposition de référentiels régionaux en éléments traces métalliques dans les sols : leur utilisation dans les évaluations des risques sanitaires ; Environnement, Risques & Santé − Vol. 7, n° 2, mars-avril ,2008 : p122) ;

5- Aw SE, N'goran BZ, Siaka S, Parinet B. (2011) : Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). *J. Appl. Biosc.,* 38 : p2573-2585.

6- Ayi Fanou L, Mobio TA, Creppy EE, Fayomi B, Fustoni S, Møller P, Kyrtopoulos S, Georgiades P, Loft S, Sanni A, Skov H, Øvrebø S, Autrup H. (2006) : Survey of air pollution in Cotonou, Benin – air monitoring and biomarkers. Sc. Environ., 358 : p85–96. DOI : http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.20 05.03.025.

7- AQUA & GAS No 4 | (2016) : EAUX DE SURFACE SOUS SURVEILLANCE ;

8- Bacha, B., (2011) : elaboration de membranes d'affinité pour la récupération du cherome hexavalent » mémoire de magister en chimie de l'environnement universite mouloud mammeri de tizi-ouzou ;

9- Baiz D. (2009) : Elément traces dans les sols fonds géochimiques, fonds pédogéochimique naturels et teneurs agricoles les habituelles : définition et utilises ; courrier de l'environnement de l'INRA ; N° :57 ; pp 63-72.

10- BARBE J., LAFONT M., MALLET L., MOUTHON J., PHILIPPE M., VEY V., (2003) : Actualisation de la méthode de diagnose rapide des plans d'eau – Analyse

critique des indices de qualité des lacs et propositions d'indices de fonctionnement de l'écosystème lacustre, CEMAGREF, Lyon, 35p.

11- BAHROUN SOFIA, KHERICI BOUSNOUBRA HOURIA : ÉVALUATION DE L'INDICE DE POLLUTION ORGANIQUE DANS LES EAUX NATURELLES CAS DE LA RÉGION D'EL TARF (NORD-EST ALGERIEN) Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 09, Décembre 2011, pp. 171-178.

12- BENSIAAHMAD M., GHALMI K. (2013) : Mémoire en vue d'obtention du diplôme de mastère biologie, caractérisation physico-chimique de la pollution d'Oued Meskiana, p74.

13- Blouin M, Hodson ME, Delgado EA, Baker G, Brussaard L, Butt KR, Dai J, Dendooven L, Peres G, Tondoh JE, Cluzeau D, Brun JJ. 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. Eur. J. Soil Sci., 64 : 161-182 ;
DOI : http://dx.doi.org/10.1111/ ejss.12025 ;

14- BOUCHEBBAH S., &AYACHE K., (2011) : Caractéristique des eaux de surfaces de l'Oued Agrioun de la région de Bejaia. Mémoire en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en écologie et environnement. Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 53p.

15- BRAINERD E, MENON N. (2014) : Seasonal effects of water quality : The hidden costs of the green revolution to infant and child health in India. J. Deve. Econ., 107 : p49–64.

16- Brown GG, Barois I, Lavelle P. (2000) : Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. Eur. J. Soil Biol., 36 : 177-198 ;

17- CHAOUKI MOURAD (2016) : Cours Pollution (Air, Eau, Sol), p50.

18- Chouti W, Mama D, Alassane A, Changotade O, Alapini F, Boukari M, Aminou T, Afouda A. (2011) : Caractérisation physico-chimique de la lagune de Porto-Novo (sud Bénin) et mise en relief de la pollution par le mercure, le cuivre et le zinc. *J. Appl. Biosc.*, 43 :2882-2890.

19- CHOUTI W. (2011) : Etude de la pollution chimique d'une lagune tropicale (eaux, sédiments, poissons) : Cas de la lagune de Porto-Novo (sud Bénin). Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques (FAST), Université d'Abomey-Calavi, p100 + Annexes.

20- COULIBALY K. (2005) : Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau des puits de certains quartiers du district de Bamako. Thèse présentée pour

obtenir le grade de docteur en pharmacie, Faculté de Médecine de Pharmacie et d'Odonto-stomatologie Université de Bamako, p52.

21- C. A. DEDJIHO (2011) : Évaluation de la chaine trophique d'une aire marine protégée en relation avec sa physicochimie : cas de Gbèzoumè dans la commune de Ouidah. Mémoire de DEA. FAST/UAC, Bénin.

22- Deckert, J. (2005) : Cadmium toxicity in plants : is there any analogy to its carcinogenic effect in mammalian cells, Biometals, 18, 475-481 ;

23- Diallo, A. (2006) : Etude de la variation spatiale de la végétation herbacée des Niayes de la région de Dakar par une approche phytosociologique. Mémoire de DEA, UCAD. p72.

24- DJENONTIN Ignace, « MONOGRAPHIE COMMUNALE DE LOKOSSA », 2006 :p54 ;

25- Durand C. : Caractérisation physico-chimique des produits de l'assainissement pluvial., Origine et devenir des métaux traces des polluants organiques. Thèses de doctorat, Université de Poitiers, (2003), 248p ;

26- E. Villanneau, C. Perry-Giraud, N. Saby, C. Jolivet, F. Marot, D. Maton, A. Floch-Barneaud, V. Antoni et D. Arrouays : Détection de valeurs anomaliques d'éléments traces métalliques dans les sols à l'aide du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols 183, p202 ;

27- E. Kple, (2008) : « CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA POLLUTION ORGANIQUE ET AZOTEE DES EAUX DU LAC TOHO DANS LE DEPARTEMENT DU MONO », EPAC/UAC, Technical Report),p84.

28- EL OUALI LALAMI A., MERZOUKI M., EL HILLALI O., MANIAR S., IBNSOUDA KORAICHI S., (2010) : POLLUTION DES EAUX DE SURFACE DE LA VILLE DE FES AU MAROC : TYPOLOGIE, ORIGINE ET CONEQUENCES dans Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, N°09, p55-72.

29- F. MOUKHCHAN, M. AMMARI, L. BEN ALLAL : Caractérisation physico-chimique des sédiments marins du littoral de Tanger et perspectives de valorisation. Laboratoire de Génie Chimique et Valorisation des Ressources, Faculté des Sciences et Techniques, BP 416, 90000 Tanger ;

30- FELIX J. (2013) : Evaluation de la qualité physico-chimique et l'état trophique de l'eau du lac ahémé. Mémoire de licence en hydrologie, Faculté des Science Techniques, Université d'Abomey-Calavi, p41.

31- Gao X, Zhou F, Chen CTA., (2014) : Pollution status of the Bohai Sea : An overview of the environmental quality assessment related trace metals. *Environ. Int.*,62 :p12-30.

32- Gbaguidi Gouvidé Jean, (2018) : Contribution à la protection contre des pollutions chimiques d'un système lentique en région tropicale : le lac Toho au sud Bénin, Afrique de l'ouest. Mémoire de fin de formation réalisé et soutenu pour l'obtention du diplôme de Master Professionnel en Hydrologie p95.

33- GENDRONNEAU M. (2006) : Etude des secteurs du Croisic et de Pen-Bé : Estimation des apports continentaux et évaluation des stocks conchylicoles. Programme de surveillance et évaluation de l'état des eaux littorales. Edition IFREMER, p267.

34- Ghislain de MARSILY, Mustapha Besbes (2017) : Les eaux souterraines dans Annales des Mines-Responsabilités et Environnement N°86(2), p25-30.

35- Goullé JP., Saussereau E., Lacroix C., Guerbet M. (2012) : Métaux, traité de toxicologie Médico-Judiciaire ; p733-767 ;
doi 10.1016/B978-2-2.29471561-7.00024-8.

36- HABI Tinhinene, HADDAD Tassadit (2019) : Normalisation du rejet urbain brut de la STEP Ouest de la ville de Tizi-Ouzou ; mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Agronomiques, Spécialité : Eau et Environnement, p64.

37- HÉBERT, S. et S. LÉGARÉ (2000) : Suivi de la qualité des rivières et petits cours d'eau, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, envirodoq no ENV-2001-0141, rapport n° QE-123, p24 et 3 annexes.

38- Hounkpe J.B., KELOME N. C. , LAWANI R. A. N. , ADECHINA A.R.M.A. ;Larhyss Journal, 30 (2017) : ETAT DES LIEUX DE LA POLLUTION DES ÉCOSYSTEMES AQUATIQUES AU BÉNIN (AFRIQUE DE L'OUEST), p149-171.

39- Houansou, (2010). : Problématique de l'eau dans la Commune de Dangbo : Cas de l'arrondissement de Zounguè, Mémoire de maîtrise de géographie. DGAT /FLASH/UAC, 104p.

40- Huynh TMD. 2009. Impact des métaux lourds sur les interactions plante/ ver de terre/ microflore tellurique. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, Paris, p. 170 ;

41- IFEN (2007). "La pollution diffuse des sols par les éléments traces." Le sol, 2010, à partir de http://www.ifen.fr/acces-thematique/sol/le-sol/la-pollution-diffuse-des-sols-par-les-elements-traces.html.

42- Kabata-Pendias, A. (2011) : Trace Elements in Soils and Plants. Fourth ed. CRC Press Taylor & Francis Group ;

43- Kadlec RH, Reddy KR. (2001) : Temperature effects in treatment wetlands. Water Environment Research, 73: 543–557p.

44- Kirkham, M.B. (2006) : Cadmium in plants on polluted soils : Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. Geoderma, 137(1-2), 19-32 ;

45- Kourchi. (2010) : Achèvement du système d'épuration de la ville de Draa el mizan. Mémoire fin d'étude UMMTO. p27 ;

46- Larousse encyclopédique, (2003). : Nouveau Larousse encyclopédique 2003, coffret de 2 volumes Broché – 9 octobre 2003.

47- Li, Q., Guo, X.-Y., Xu, X.-H., Zuo, Y.-B., Wei, D.-P., Ma, Y.-B. (2012)) : Phytoavailability of Copper, Zinc and Cadmium in Sewage Sludge-Amended Calcareous Soils. Pedosphere, 22(2), 254-262 ;

48- Lynda CHELLI, Nabila DJOUHRI (2013) : « Analyses des eaux de réseau de la ville de Bejaia et évaluation de leur pouvoir entartrant : Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie des Procédés, Spécialité : Génie Chimique, p65.

49- MAF (Manitoba Agriculture and Food). (2001) : Les nitrates dans le sol et dans l'eau. http://www.gov.mb.ca/agriculture/crops /fruit/bld01s01.html

50- Mahdavi, M., Jafari, J. (2010) : Environmental Risks due to Application of Sewage Sludge in Farmlands. Ozean Journal of Applied Sciences, 3(2), 303-311. ;

51- MEDEDA, Nicaise. 1998. L'environnement et sa dynamique dans le bassin du lac Toho de Kpinnou. Mémoire de maîtrise ; UAC ; Cotonou-Bénin. 72p.

52- Meda, A.R., Scheuermann, E.B., Prechsl, U.E., Erenoglu, B., Schaaf, G., Hayen, H., Weber, G., von Wiren, N. (2007) : Iron acquisition by phytosiderophores contributes to cadmium tolerance. Plant Physiol, 143(4), 1761- 1773 ;

53- Mehmet A. Oturan, Nihal Oturan et Jean-Jacques Aaron (2004) : Traitement des micropolluants organiques dans l'eau par des procédés d'oxydation avancée, p58.

54- Mémoire de Sètchégla Faustine Joana AVOCEVO (2021) : COMPARAISON DE LA QUALITE PHYSICOCHIMIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DES EAUX DU LAC TOHO ET DES EAUX SOUTERRAINES A KPINNOU DANS LA COMMUNE D'ATHIEME.

55- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec : Détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques : dosage par

chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse ; Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec :2008, 28 p ;

56- MOJISOLA F., (2008) : Création d'une aire marine protégée au Bénin (Afrique de l'Ouest). Rapport de stage, 20p.

57- MONTCHO A., (2005) : Suivi de la pollution azotée et phosphatée dans les écosystèmes du lac Nokoué et du chenal de Cotonou. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur des Travaux, EPAC/UAC, Bénin. 72 p + annexes.

58- N'Guessan, Y.M., (2008) : Dynamique des éléments traces dans les eaux de surface des bassins.

59- Ogoudélé Mathias DAKPO, (2022) : MEMOIRE BIODISPONIBILITE ET MOBILITE DU PHOSPHORE DANS LES SOLS CULTIVES AUTOUR DU LAC TOHO AU SUD DU BENIN, p3.

60- OMS. (2000) : Directives de qualité pour l'eau de boisson ; volume 2, critères d'hygiène et documentation à l'appui, 2ème édition, p1050.

61- OMS (2017) : Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. Intégrant le premier additif

62- Pan, J., Chon, H.-S., Cave, M.R., Oates, C.J., Plant, J.A. (2012) : Toxic trace elements. in : Pollutants, Human Health and the Environment : A Risk Based Approach, (Eds.) J.A. Plant, N. Voulvoulis, N. Voulvoulis, K.V. Ragnarsdottir, Wiley Blackwell. Ltd, pp. 87 – 114 ;

63- Pouomogne, V. (1998) : Pisciculture en milieu tropical africain. Comment produire du poisson a cout modéré. Presse Universitaire d'Afrique, Yaoundé, 263p.

64- Ramade, F., (2000), Dictionnaire encyclopédique des pollutions, Edition : science international, Paris, p834 ;

65- Ramade, F.(2000) : Dictionnaire encyclopédique des pollutions, les polluants de l'environnement à l'homme. Ediscience international, Paris, 50-186 pp ;

66- Ramade, F.,2002. Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et Sciences de l'environnement, 2 eme édition, Dunod, Paris, 87-90 pp ;

67- Rejsek F. (2002) : Analyse des eaux-aspects, réglementations et techniques, biologie technique CRDP d'aquitaine p358.

68- Rodier, J et al. (2009) : L'analyse de l'eau, 9ème édition, Ed. Dunod, p1579.

69- RODIER J. (2009) : Analyse de l'eau ; Eaux. Ed. DUNODBORDAS, Paris, 9ème édition. p1526.

70- Sigg, L., Behra, P., Stumm, W., (2006) : Chimie des milieux aquatiques. Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. 4e édition, Dunod, Paris, 564 p.

71- Silvia M. Contreras-Ramos, Dioselina A´ lvarez-Bernal, Luc Dendooven : Eisenia fetida increased removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil(2006),p 396-401

72- SOSSOU-AGBO L. (2013) : La mobilité des populations dans le complexe fluvio-lagunaire de la basse vallée de l'Ouémé au Bénin, en Afrique de l'Ouest ; Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble,349p.

73- Sterckeman T., Douay F., Baiz D., Fourier H., Prix H et Schvartz C. (2007) : Préférentiel Pédo-Géochomique du Nord-Pas de Calais, méthode et principaux résultat ; etude et géstion des sols ; vol : 14 ; 2 ; pp153-168 ;

74- Tremel-Schaub, A., Feix, I. 2005. Contamination des sols : Transferts des sols vers les plantes. EDP Sciences/ADEME ;

75- Trombulak SC, Frissell CA. 2000. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. Conservation Biology, 14: 18-30 ;

76- Van der Perk, M. (2013) : Soil and Water Contamination. Second ed, CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group. London, UK ;

77- WOITO. C.E. (2018) : Caractérisation physico-chimique et des éléments traces métalliques (cuivre, cadmium, plomb, zinc) dans les eaux de la rivière de l'Alibori pendant la période des hautes eaux : Mémoire de licence en hydrologie, Institut National de l'Eau (INE), Université d'Abomey-calavi, Bénin, p6 ;

78- ZETOME, Hervé (2019). Mise en evidence de la diversite des sols de lokossa. Mémoire de Master à l'Ecole Polytechnique d'Abomey-calavi, Université d'Abomey-Calavi (EPAC).

ANNEXES

Annexe 1 Quelques photos prises lors de l'enquête de terrain



Photo 1 : Photo de filet maillant



Photo 2 : Photo du lac Toho à Logbo



Photo 3 : Photo des bananiers



Photo 4 : Photo des palmiers et des maïs

Annexe 2 Questionnaire d'enquête

QUESTIONNAIRE D'ENQUETE

Nom:
Prénom:
Sexe:
Profession:
Age:
Zone de production:
Quartier:

Sources de pollution organique des ressources en eau

1. Quelles sont les principales sources de pollution organique dans le lac ?

2. Quelles sont les activités menées autour du lac Toho ?

3. Quelle activité pourrait-elle le plus nuire aux ressources en eau dans le périmètre du lac Toho ?

4. Quels engrais et pesticides utilisez-vous pour l'agriculture ?

5. L'utilisation des engrais et des pesticides a t-ils d'impacts sur le lac et les espèces aquatiques ?

6. Quels produits utilisez-vous pour attirer les espèces aquatiques ?

7. Y a-t-il d'impacts sur le lac et ses ressources ?

8. Comment se fait la gestion des déchets autour du lac Toho ?

9. Que peut-on faire pour préserver les espèces aquatiques et le lac Toho ?

10. Quelles sont les mesures de prévention que vous recommandez pour réduire la pollution organique dans le lac ?

11. Comment pouvez-vous contribuer à la protection du lac ?

Approvisionnement, stockage et usage de l'eau

12. D'où provient votre eau pour la boisson, la vaisselle et la cuisine ?

☐ 1. Borne Fontaine ☐ 2. Branchements particuliers
☐ 3. Puits ☐ 4. Lac

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

13. D'où provient votre eau pour le ménage et la lessive ?

☐ 1. Borne Fontaine ☐ 2. Forage ☐ 3. Puits ☐ 4. Lac

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

14. D'où provient votre eau pour l'hygiène corporelle ?

☐ 1. Borne Fontaine ☐ 2. Forage ☐ 3. Puits ☐ 4. Lac

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

15. Pourquoi allez-vous chercher l'eau à ce(ces) endroit(s) ?

☐ 1. Le plus proche ☐ 2. Habitudes
☐ 3. Prix de l'eau moins chère ☐ 4. Autres

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

16. Fréquence d'approvisionnement en eau potable ?

☐ 1. Tous les 2 à 3 jours ☐ 2. Une fois par jour
☐ 3. Plus de 3 fois/jour

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

17. Quels sont les principaux problèmes liés à la collecte de l'eau ?

☐ 1. Pannes fréquentes/ délestage
☐ 2. Trop cher
☐ 3. Trop éloigné
☐ 4. Difficile d'accès en période de crue
☐ 5. Autre

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

18. Continuez-vous à payer de l'eau potable en période de crue ?

☐ 1. Oui ☐ 2. Non

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

19. Fréquence de lavage des récipients de stockage

☐ 1. Dès qu'ils sont sales ☐ 2. Une fois/jour
☐ 3. Une fois par semaine ☐ 4. Dès qu'ils sont vides
☐ 5. Une fois par mois ☐ 6. Jamais

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

20. Techniques de lavage des récipients d'eau

☐ 1. Avec cendre/sable et l'eau ☐ 2. Avec de l'eau
☐ 3. Avec savon et de l'eau ☐ 4. La main et de l'eau
☐ 5. Autre

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

21. Que souhaiteriez-vous pour améliorer l'approvisionnement en eau potable de votre ménage ?

☐ 1. Améliorer gestion point d'Eau
☐ 2. Plus de points d'Eau modernes
☐ 3. Eau moins chère
☐ 4. Réhabilitation des points d'Eau
☐ 5. Point d'Eau plus proche
☐ 6. Moins de panes

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

22. Comment reconnaissez-vous une eau non potable ?

☐ 1. Claire ☐ 2. Trouble des particules
☐ 3. Mauvaise Odeur ☐ 4. Colorée

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

23. Traitez-vous l'eau ?

☐ 1. Toujours ☐ 2. Jamais ☐ 3. Parfois

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

24. Si oui, comment traitez-vous l'eau de boisson ?

25. Avez-vous été sensibilisé pour le traitement de l'eau ?

☐ 1. Oui ☐ 2. Non

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

26. Si oui par quelle structure

27. Où allez-vous faire vos selles ?

28. Allez-vous toujours au même endroit à chaque défécation ?

29. Si non, pourquoi ?

30. Y a-t-il des latrines dans l'enceinte ?

31. à quelle distance est-elle de votre l'habitation ?

32. Si vous possédez des latrines, comment vidangez-vous la fosse ?

☐ 1. Dans une fosse ☐ 2. à côté de la latrine
☐ 3. Pas de réponse ☐ 4. Derrière chez vous
☐ 5. Autres

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

33. Où jetez-vous les eaux usées ?

☐ 1. Jeter sur le sol ☐ 2. Dans l'enceinte de la maison
☐ 3. Jeter dans le lac ☐ 4. Autres

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

Questions sur la Pêche

34. Pratiquez-vous la pêche dans ce lac ?

○ 1. Oui ○ 2. Non

35. Si oui, quelles sont les principales espèces de poissons que vous pêchez ?

36. Quels types de techniques de pêche utilisez-vous ?

☐ 1. Filets maillants ☐ 2. Nasses ☐ 3. Lignes simples
☐ 4. Filets de barrage

Autre (préciser)

37. Avez-vous remarqué des changements dans la qualité de l'eau du lac au fil du temps ?

○ 1. Oui ○ 2. Non

38. Si oui, pouvez-vous décrire ces changements ?

39. Avez-vous remarqué des effets sur la santé des personnes qui consomment des poissons du lac ?

○ 1. Oui ○ 2. Non

40. Si oui, quels types d'effets ont été observés ?

Annexe 3 : Résultats d'analyse physico-chimique des eaux du lac Toho

Paramètres	St1	St2	St3
pH	7,6	7,25	7,7
T (°C)	31,5	32,4	30,2
CE (µS/cm)	168	319	439
TDS (mg/L)	87	158	220
Turb (NTU)	4,5	6,5	22,11

Annexe 4: Résultats des ETM au niveau des eaux de surface

Paramètres	St1	St2	St3
Cadmium	0	28 µg/L	20 µg/L
Chrome	0	2,2 µg/L	28 µg/L
Cuivre	12 µg/L	0,4 µg/L	38 µg/L
Plomb	190 µg/L	29 µg/L	0

Annexe 5 : Résultats des ETM au niveau des sédiments

Paramètres	St1	St2	St3
Cadmium	179,22 mg/kg	119,36 mg/kg	108,6mg/kg
Chrome	87,48 mg/kg	99,48 mg/kg	17,28 mg/kg
Cuivre	0,67 mg/kg	0,59 mg/kg	0,15 mg/kg
Plomb	0,19 mg/kg	0,18 mg/kg	0,24 mg/kg

Annexe 6 Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques

Paramètres	Unités	Eaux de surface			
		Moyenne	Ecart-type	Min	Max
pH	-	7,5	0,24	7,25	7,7
Conductivité électrique	µs/cm	308,7	135,80	168	439
Turbidité	NTU	11	9,64	4,5	22,11
TDS	mg/L	155	66,55	87	220
Température	°C	31,4	1,11	30,2	32,4

Annexe 7 Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques (ETM au niveau des eaux)

Paramètres	Unités	Eaux de surface			
		Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Cadmium	µg/L	16	14,42	0	28
Chrome	µg/L	10,06	15,56	0	28
Cuivre	µg/L	16,8	19,25	0,4	38
Plomb	µg/L	73	102,35	0	190

Annexe 8 : Résultats des calculs d' Ic

Paramètres	Ic St1	Ic St2	Ic St3
Cuivre	0,04	0,03	0,0075
Chrome	0,44	0,50	0,086
Cadmium	59,74	39,79	36,2
Plomb	0,0016	0,0015	0,002

Annexe 9 Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques (ETM au niveau des sédiments)

Paramètres	Unités	Sédiments			
		Moyenne	Ecart-type	Min	Max
Cadmium	mg/kg	135,727	38,04	108,600	179,217
Chrome	mg/kg	68,08	44,40	17,280	99,478
Cuivre	mg/kg	0,47	0,28	0,15	0,67
Plomb	mg/kg	0,203	0,030	0,183	0,24

Annexe 10 Norme NQE de qualité des eaux de surface

Paramètres	Unités	Directives NQE
Ph	---	6,5 -- 8,5
Température	°C	20 -- 25
Conductivité électrique	µS/cm	750 -- 1300
Turbidité	NTU	5 --20
TDS	mg/L	500 -- 1200
Phosphore total	mg/L	---

NQE : Normes de qualité des eaux de France (Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critère d'évaluation de l'état écologique, de l'eau chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11, R. 212- 18, du code de l'environnement, modifié par l'arrêté du 27 juillet 2015).

Annexe 11 : Normes OMS, normes françaises, normes béninoises relatives aux eaux de surface

Paramètres	Unités	NF ISSO	Normes OMS	Normes Béninoises
Plomb	mg/L	5	0,01	0,2
Cadmium	mg/L	1	0,003	0,05
Chrome	mg/L	----------	0,05	----------
Cuivre	mg/L	----------	2	----------

Annexe 12 : Normes Limites pour les eaux de surface en France

Les normes limites(NL) pour les quatre paramètres dépendent de la réglementation en vigueur dans chaque pays. En France, les normes limite pour les eaux de surface sont :

Paramètres	NL
Cadmium	0,4 µg/L
Chrome	50 µg/L
Cuivre	2 µg/L
Plomb	10 µg/L

Annexe 13 : Normes limites pour les sédiments en la France

Pour les sédiments, les normes limites sont généralement plus élevées, car ils sont considérés comme des agents de stockage plutôt que comme une source directe de pollution pour les milieux aquatiques. En France, les normes limites pour les sédiments sont :

Paramètres	NL
Cadmium	3 mg/kg
Chrome	200 mg/kg
Cuivre	20 mg/kg
Plomb	120 mg/kg

Annexe 14 : les résultats de la concentration des HAP au niveau de l'eau et le Critère Règlement 2013-57

Groupes	HAP	Unités	Sites			Critère règlement 2013-57(µg/L)
			St1	St2	St3	
Groupe A	Naphtalène	µg/L	0	0	0	200
	Acénaphtylène	µg/L	0	0	0	
	Acénaphtène	µg/L	0	0	0	
	Fluorène	µg/L	0	0	0	
	Anthracène	µg/L	0	0	0	
	Phénanthrène	µg/L	0,015	0	0	
	Fluoranthene	µg/L	0	0	0	
	Pyrène	µg/L	0	0	0	
	Benzo(g,h,i)perylene	µg/L	0,074	0,041	0,052	
	Sommation des HAP(Règlement 2013-57)	µg/L	0,089	0,041	0,052	
Groupe B	Benzo(a)anthracène	µg/L	0,020	0	0,020	1
	Chrysene	µg/L	0	0,027	0	

	Benzo(b)fluoranthene	µg/L	0,048	0	0	
	Benzo(j)fluoranthene		0	0,047	0,045	
	Benzo(k)fluoranthene	µg/L	0,023	0,020	0,028	
	Benzo(a)pyrène	µg/L	0	0	0,040	
	Dibenzo(a, h)anthracène	µg/L	0,069	0,067	0,027	
	Dibenzo(a, i)pyrène		0,038	0,152	0,107	
	Indéno(1.2,3-cd)pyrène		0,03	0,040	0,057	
	Sommation des HAP(Règlement 2013-57)	µg/L	0,228	0,353	0,324	

Annexe 15 : les résultats de la concentration des HAP au niveau des sédiments et le Critère Règlement 20136-57

Groupes	HAP	Unités	Sites			Critère règlement 2013-57(µg/L)
			St1	St2	St3	
Groupe A	Naphtalène	µg/L	0	0	0	200
	Acénaphtylène	µg/L	0	0,055	0,039	
	Acénaphtène	µg/L	0,017	0,081	0,059	
	Fluorène	µg/L	0,034	0,015	3,54	
	Anthracène	µg/L	0,023	0,144	1,68	
	Phénanthrène	µg/L	0,030	0,169	0,012	
	Fluoranthene	µg/L	0,0096	0,017	0,029	
	Pyrène	µg/L	0	0,005	0,010	
	Benzo(g,h,i)perylene	µg/L	0,038	0,146	1,18	

	Sommation des HAP(Règlement 2013-57)	µg/L	0,151	0,619	6,549	
Groupe B	Benzo(a)anthracène	µg/L	0,025	0,036	0,045	1
	Chrysene	µg/L	0,047	0,029	0,025	
	Benzo(b)fluoranthene	µg/L	0	0,055	0,15	
	Benzo(j)fluoranthene		0,05	0	0	
	Benzo(k)fluoranthene	µg/L	0,02	0,088	1,06	
	Benzo(a)pyrène	µg/L	0,096	0,29	0,42	
	Dibenzo(a, h)anthracène	µg/L	0,060	0,054	0,057	
	Dibenzo(a, i)pyrène		0,04	0,027	0,023	
	Indéno(1.2,3-cd)pyrène		0,063	0,065	0,67	
	Sommation des HAP(Règlement 2013-57)	µg/L	0,401	0,644	2,45	