UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

Serge DOSSOU

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : ECOHYDROLOGIE

==========

EVALUATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DANS LA ZONE NON SATUREE EN DESSOUS DES TAS D'ORDURES ET AU DESSUS DE LA NAPPE LIBRE DE HEVIE.

==========

Maître de Mémoire

Professeur Abdoukarim ALASSANE

Maître de Stage

Mme Aoulatou ALASSANE ZAKARI

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

PROMOTION : 2021-2022

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation

Pour l'obtention du diplôme de la Licence Professionnelle en Hydrologie

Option : ECOHYDROLOGIE

EVALUATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DANS LA ZONE NON SATUREE EN DESSOUS DES TAS D'ORDURES ET AU DESSUS DE LA NAPPE LIBRE DE HEVIE.

Mention: *Très bien*

Jury :

Président : Dr MC Flavien DOVONOU

Examinateur : Dr Josué ZANDAGBA

Rapporteuse : Mme Aoulatou ALASSANE ZAKARI

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

PROMOTION : 2021-2022

DEDICACE

À mes parents Ezin DOSSOU et Julienne AGUEWOUNDE,

en témoignage à l'amour et à l'affection qui nous lient.

REMERCIEMENT

Le présent travail de recherche ne saurait se réaliser et se concrétiser sans la disponibilité et la contribution de certaines personnes que je prie sans aucune distinction, de trouver ici, l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements s'adressent aux personnes suivantes :

- Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE), pour nous avoir permis l'entrée dans son institution ;
- Professeur Flavien DOVONOU**,** le chef de département d'Hydrologie et Gestion des Ressource en Eau (HGRE), pour son amour et sa lutte pour nous assurer une formation de qualité ;
- Professeur Abdoukarim ALASSANE, notre Maître de mémoire pour son précieux encadrement, ses conseils et sa disponibilité ;
- Mme Aoulatou ALASSANE ZAKARI, notre Maître de stage pour son aide, ses conseils et ses enseignements ;
- Tous les responsables de la Formation Professionnelle en Hydrologie de l'Institut National de l'Eau (INE) ;
- Professeurs Abel AFOUDA, Moussa BOUKARI, Emmanuel LAWIN et tous les autres 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 l'Afrique de l'Ouest ;
- Madame Marcelline OLOU, la secrétaire du département d'Hydrologie et Gestion des Ressource en Eau (HGRE),
- Tous les Honorables membres du Jury qui apprécieront ce travail de fin d'études ; Merci pour le temps que vous sacrifierez au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- Nos aînés de la formation Professionnelle en Hydrologie particulièrement à Géraud AVOHOU, Moukaîla GNANKPE, Samuel TOTIN, Daniel DAGNON et Maxime TCHOKPON pour leurs encouragements, aide et assistance de tout genre ;
- Tous mes camarades d'hydrologie et spécialement ceux de la promotion 2019 -2020 avec qui tout au long des trois (3) années, nous avons partagé des moments de fraternité et d'apprentissage.

- Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce document, trouvez ici toute ma gratitude.

RESUME

L'étude est réalisée dans le but d'évaluer les paramètres physico-chimiques dans la zone non saturée au-dessous des tas d'ordures et au-dessus de la nappe libre de Hêvié afin d'apprécier la qualité physico-chimique et métaux lourds des puits environnants. Pour y arriver, des enquêtes basées sur des questionnaires ont été réalisées dans les cinq (05) quartiers constitutifs de l'arrondissement de Hêvié, auprès des chefs quartiers et des habitants de Hêvié. Des échantillons de sol ont été prélevés au niveau d'une fosse de 23 m de profondeur pour déterminer les paramètres physico-chimiques du sol de la Zone Non Saturée (ZNS). Au total, vingt -un (21) échantillons de sol ont été prélevés à raison de chaque 1 m de profondeur. Les paramètres physico-chimiques des échantillons de sol ont été déterminés par un multi-paramètre de marque HANNA. Les données issues des analyses de laboratoire ont été traitées à l'aide des logiciels (Microsoft Excel, Grapher). Les résultats d'enquêtes révèlent que 20% des quartiers sont abonnés à la SGDS-GN et 80% sont sans abonnement ; 80,96% des ordures proviennent des ménages et 19,04% proviennent des hôpitaux. Les travaux antérieurs ont montré que la nappe libre est vulnérable par endroits non seulement de par son caractère superficiel et les activités anthropiques qui l'affectent mais aussi par la facilité d'infiltration de soluté due aux propriétés physiques et hydriques de la zone non saturée. L'étude de la variation des paramètres physico-chimiques a montré que ces paramètres varient en fonction de la profondeur. De plus la couche argilo-sableuse est plus minéralisée que la couche sablo-argileuse qui, à son tour, est plus minéralisée que la couche sableuse. L'argile par son caractère de colmatage stocke plus les éléments chimiques que les autres couches. Ce qui est à l'origine de son caractère acide. Les trois puits ciblés ont tous un pH acide et pollués par les métaux lourds. Cette étude montre que dans l'arrondissement de Hêvié les eaux de puits situés aux alentours de l'ancien dépotoir sont polluées par les éléments traces métalliques notamment le plomb et le cadmium. Cette contamination locale pourrait être due aux lessivages des ordures et aux activités menées dans la zone.

Mots clés : Zone non saturée, tas d'ordures, nappe libre.

ABSTRACT

The study was carried out in order to evaluate the physico-chemical parameters in the unsaturated zone below the garbage heaps and above the free water table of Hêvié in order to assess the physico-chemical and heavy metal quality of the surrounding wells. To achieve this, surveys based on questionnaires were carried out in the five (05) districts that make up the Hêvié district, among the district chiefs and the inhabitants of Hêvié. Soil samples were taken from a 23 m deep pit to determine the physico-chemical parameters of the unsaturated zone (NSA) soil. In total, twenty-one (21) soil samples were taken at each 1 m depth. The physico-chemical parameters of the soil samples were determined by a HANNA multi-parameter. The data from the laboratory analyses were processed using software (Microsoft Excel, Grapher). The survey results reveal that 20% of the neighborhoods are abonmented at the SGDS-GN and 80% are unabonmented; 80.96% of the garbage comes from households and 19.04% from hospitals. Previous work has shown that the open water table is vulnerable in places not only because of its superficial nature and the anthropic activities that affect it but also because of the ease of solute infiltration due to the physical and hydric properties of the unsaturated zone. The study of the variation of the physico-chemical parameters showed that these parameters vary according to the depth. Moreover, the sandy-clay layer is more mineralized than the sandy-clay layer which, in turn, is more mineralized than the sandy layer. The clay by its clogging character stores more chemical elements than the other layers. This is the reason for its acidic character. The three targeted wells all have an acidic pH and are polluted by heavy metals. This study shows that in the district of Hêvié, the wells located in the vicinity of the former dump are polluted with trace metals, particularly lead and cadmium. This local contamination could be due to the leaching of garbage and the activities carried out in the area.

Keywords : Unsaturated zone, garbage heap, open water table.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

ZNS	Zone Non Saturée
Eh	Potentiel Rédox
pH	Potentiel d'Hydrogène
CE	Conductivité Electrique
COT	Carbone Organique Total
TDS	Solides Totaux Dissous
°C	degré Celsius
µs/cm	microsiemens par centimètre
mg/L	milligramme par litre
INE	Institut National de l'eau
LHA	Laboratoire d'Hydrologie Appliquée
OD	Oxygène Dissous
OMS	Organisation Mondial de la Santé
GPS	Global Positionning System
INSTAD	Institut National de la Statistique et de la Démographie
RGPH1	Premier Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RGPH2	Deuxième Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RGPH3	Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RGPH4	Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SGDS-GN	Société de Gestion des Déchets et de la Salubrité Urbaine du Grand Nokoué
AFNOR	Association Française de Normalisation

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de l'arrondissement de Hêvié 14
Figure 2: Variation annuelle des pluies d'Abomey-Calavi de 1987 à 2018 de la station de Cotonou 15
***Figure 3* :** carte pédologique de l'arrondissement de Hêvié 17
Figure 4 : Evolution de la population d'Abomey-Calavi de 1979 à 2019 18
Figure 5: carte géologique de l'arrondissement de Hêvié 20
Figure 6: Localisation des tas d'ordure (Travaux de terrain, 2022) 24
Figure 7 : Localisation des sites d'échantillonnage des puits ciblés et de la décharge choisie (Travaux de terrain, 2022) 26
Figure 8: Identification des tas d'ordure 31
Figure 9 : Origines et nature des ordures 32
Figure 10: Les types de déchets retrouvés. 33
Figure 11: Production et rejet des ordures 33
Figure 12 : Lithologie de Hêvié 34
Figure 13 : variation du pH en fonction de la profondeur 35
Figure 14 : Variation de CE en fonction de la profondeur 36
Figure 15: Variation de l'oxygène dissous en fonction de la profondeur 36
Figure 16: Variation du potentiel rédox en fonction de la profondeur 37
Figure 17: variation du COT en fonction de la profondeur 38
Figure 18: Variation du pH 39
Figure 19: Variation de la Conductivité électrique et des TDS 40
Figure 20: Variation de la Température 41
Figure 21: Variation de l'Oxygène dissous 41
Figure 22: Variation de l'orthophosphate 42
Figure 23: Variation de Nitrates 42
Figure 24: Variation de Nitrites 43
Figure 25: Variation de l'Ammonium 43
Figure 26: Variation de Fer^{2+} 44
Figure 27 : Variation de Zinc 44
Figure 28: Variation de plomb 45
Figure 29: Variation de cadmium 45

LISTE DES PLANCHES

Planche 1: Méthode d'extraction au laboratoire (Cliché DOSSOU S., 2022) 27

Planche 2 : Origine et nature des ordures (Cliché DOSSOU S., 2022) 32

Planche 3 : Quelques photos de terrain (Cliché DOSSOU S., 2022)..... 61

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Fosse de prélèvement des échantillons (Cliché DOSSOU S., 2022) 25

Photo 2: Multiparamètre de marque HANNA (Cliché DOSSOU S., 2022) 26

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Termes descriptifs pour différentes plages de pH du sol (Sparks, 2003) 9

Tableau 2: Principales classes de Eh de sol (adapté de Reddy and DeLaune (2008))..... 10

Tableau 3: Paramètres de terrain et de laboratoire d'échantillon d'eau du puits creusés sur le site 38

Tableau 4: Les coordonnées géographiques des tas d'ordures dans l'arrondissement de Hêvié 58

Tableau 5: Coordonnées géographique des puits ciblés 59

Tableau 6 : Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques des sédiments en fonction de la profondeur 59

Tableau 7 : Comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques sédiments..... 59

Tableau 8: Paramètres de terrain et de laboratoire des puits ciblés 60

Tableau 9: Comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques avec les normes60

Tableau 10 : Résultats d'analyse des éléments traces métallique 60

Tableau 11: Comparaison des moyennes des métaux lourds avec les normes 60

TABLE DES MATIERES

DEDICACE i
REMERCIEMENT ii
ABSTRACT v
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES vi
LISTE DES FIGURES vii
LISTE DES PLANCHES viii
LISTE DES PHOTOS ix
LISTE DES TABLEAUX x
TABLE DES MATIERES xi
INTRODUCTION GENERALE 1
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 5
1.1. Généralités sur le sol 5
1.2. Les différents états de l'eau dans le sol 6
1.3. Recharge 6
1.4. L'infiltration 6
1.5. La structure 7
1.6. Les déchets 7
1.7. Généralités sur le lixiviat 7
1.8. Les paramètres physico-chimiques de la zone saturée 8
1.8.1. Le Potentiel d'Hydrogène (pH) 8
1.8.2. Le potentiel rédox (Eh) 10
1.8.3. Oxygène dissous dans le sol 11
1.8.4. Carbone Organique Total (COT) 11
1.8.6. Eau polluée 12
CHAPITRE 2 : CADRE D'ETUDE 14
2.1. Situation géographique 14
2.2. Climat 15
2.3. Relief 15
2.4. Caractéristiques pédologiques 16
2.5. Caractéristiques démographiques et socio-économiques 17
2.6. Contexte géologique 18

CHAPITRE 3 : MATERIEL ET APPROCHE METHODOLOGIQUE 22

3.1. MATERIEL 22

3.1.1. Matériel de prélèvement 22

3.1.2. Matériel de laboratoire 22

3.2. METHODE 23

3.2.1. Recherche documentaire 23

3.2.2. Enquête de terrain 23

3.2.3. Travaux de terrain 25

3.2.4. Analyses physico-chimiques des sédiments 26

3.2.4.1. Extraction du lixiviat 27

3.2.5. Analyses chimiques et éléments traces métalliques des eaux des puits ciblés 28

3.2.6. Traitement des données 29

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION 31

4.1. RESULTATS 31

4.1.1. Identification des tas d'ordure 31

4.1.2. Origine et nature des ordures 31

4.1.3. Les types de déchets retrouvés dans les quartiers de Hêvié 32

4.1.4. Production et rejet des ordures dans les quartiers de Hêvié 33

4.1.5. La lithologie de la zone non saturée de Hêvié 33

4.1.6. Variation des paramètres physico-chimiques des sédiments 34

4.1.7. Les paramètres physico-chimiques et les éléments traces métalliques des eaux des puits ciblés et d'échantillon d'eau du puits creusés sur le site 38

4.2. DISCUSSION 46

CONCLUSION ET SUGGESTIONS 52

PERSPECTIVES 53

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 54

ANNEXE 58

INTRODUCTION GENERALE

Les eaux souterraines constituent plus de 22% de l'ensemble des eaux douces dans le monde contre moins de 1% pour les eaux de surface directement disponibles (lacs et rivières), et sont utilisées pour environ 20% des besoins humains, tous secteurs confondus (Zektser et Everett, 2004). D'après ces auteurs, l'utilisation de cette ressource couvre environ 50% des besoins en eau potable, 20% des besoins pour l'irrigation et 40% des besoins pour l'industrie. Ces proportions sont cependant très variables d'un pays à l'autre suivant les contextes hydrologiques, climatiques et socio-économiques. Dans beaucoup de régions du monde et surtout en milieu rural, l'eau souterraine est la ressource la plus utilisée pour l'eau potable car elle est généralement moins polluée que l'eau de surface (Mamadou Sall, 2010). Actuellement, des pressions importantes mettant en cause des facteurs naturels et surtout anthropiques menacent la pérennité de cette ressource. Ces pressions occupent une place importante dans des scénarios qui pourraient aboutir à une crise généralisée de l'eau ou à des conflits liés à l'eau, surtout dans les pays en développement (Gallopin et Rijsberman, 2000). Parmi ces facteurs, il y a notamment les changements climatiques, la surexploitation de la ressource et la dégradation de sa qualité. La dégradation de la qualité des nappes aquifères est essentiellement liée aux activités humaines et limite les quantités disponibles pour l'eau potable (Freeze et Cherry, 1979).

Depuis quelques décennies, plusieurs études ont montré que la pollution des nappes phréatiques peu profondes devient préoccupante et cette dégradation continue malgré les efforts considérables entrepris dans les pays du nord par rapport à cette problématique. L'eau souterraine est une ressource cachée dont la dégradation de qualité n'est pas facilement percevable. Sa pollution est souvent accentuée par les activités anthropiques. Les réseaux d'égouts, les eaux usées des usines, les fosses septiques et les déchets solides sont les principales sources de pollution des eaux souterraines dans le secteur urbain. Dans les zones périurbaines, l'agriculture via les intrants agricoles contribuent aussi à dégrader la qualité des nappes phréatiques (Bokou, 2022).

En effet, les précipitations arrivant au sol évoluent différemment. Une partie ruisselle en emportant des contaminants présents à la surface du sol et si les conditions du sol le permettent, la seconde partie s'infiltre dans la zone non saturée. Les eaux qui s'infiltres, peuvent soit se déplacer latéralement dans la zone non saturée jusqu'à atteindre le système fluvial à proximité, où peut être constaté une émergence de flux pollués ; soit s'infiltrer

jusqu'à la nappe superficielle par déplacement vertical et ainsi la contaminer éventuellement. Si la configuration hydrogéologique permet la réalimentation du système fluvial, ce dernier peut également subir une contamination (Picot et al, 2005). Cette contamination des eaux souterraines résulte de l'infiltration de solutés qui traversent la zone non saturée avant d'atteindre l'aquifère. Cela montre le rôle de la zone non saturée dans le processus d'infiltration d'eau et de solutés. Il est donc important d'étudier les caractéristiques de ce type de zone afin de prédire sa vulnérabilité à la pollution.

Cette zone se caractérise par un écoulement considéré essentiellement comme diphasique eau-air et son rôle majeur est de conduire les eaux et les solutés vers l'aquifère. Les écoulements sont majoritairement verticaux. L'identification et la caractérisation directe des processus d'écoulement au sein de ce compartiment restent en floues aujourd'hui à cause de la non visibilité de ses écoulements. Dans la plupart des études de caractérisation de la zone non saturée, il est rare de voir celle-ci considérée seule en tant que réservoirs attenants, sol (non saturés) et/ou zone saturée (Bokou, 2022). Dans le souci du bien-être de la population, l'arrondissement de Hêvié a accueilli plusieurs travaux de recherche. C'est ainsi que Dovonou et *al* (2018) dans leur étude sur *l'impact des comportements sur la qualité des eaux de consommation dans la commune d'Abomey-Calavi : cas de l'arrondissement de hêvié* ont montré que 14 puits sont pollués par les coliformes totaux, et les streptocoques fécaux et que dans l'arrondissement de Hêvié il se pose le problème de la qualité des eaux de consommation. (Bokou, 2022) par contre, s'est intéressé à *la lithologie et des paramètres hydrodynamiques de la zone non saturée (ZNS)*. Cependant, ces différentes études n'ont pas abordé l'évaluation des paramètres physico-chimiques dans la zone non saturée qui reste une préoccupation, jusque-là, sans une étude approfondie .C'est donc pour apporter une contribution à la compréhension du mode de fonctionnement de cette portion de terre protectrice de l'aquifère exploité par la population de Hêvié qu'il a été décidé de faire cette recherche à travers le thème **: « évaluation des paramètres physico-chimiques dans la zone non saturée en dessous des tas d'ordure et au-dessus de la nappe libre de Hêvié. »** A cet effet, les résultats de la présente étude auront pour but d'apporter une réponse à la question scientifique suivante : Quelles sont les caractéristiques physico-chimiques de la zone non saturée dans l'arrondissement de Hêvié ? L'objectif général visé à travers ce travail est de caractériser la zone non saturée du point de vue physico-chimique en dessous des tas d'ordures et au-dessus de la nappe libre de Hêvié. De manière spécifique, il a été question de :

- Identifier et cartographier les tas d'ordures dans l'arrondissement de Hêvié
- Analyser les variations des paramètres physico-chimiques dans la zone non saturée de la nappe libre de Hêvié
- Proposer des approches de solution pour réduire la problématique des ordures dans le milieu.

Pour atteindre ces objectifs, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- Les tas d'ordures sont retrouvés un peu partout dans l'arrondissement de Hêvié ;
- La variation des paramètres physico-chimique de la zone non saturé est fonction de la profondeur et de la nature lithologique du sol.
- L'application des mesures correctives pourraient réduire l'accumulation des déchets et la contamination des eaux souterraines dans le milieu.

Pour mieux aborder ce sujet nous avons structuré ce mémoire en quatre chapitres. Le premier chapitre intitulé "Synthèse bibliographique" fait ressortir quelques notions fondamentales à la compréhension du thème d'étude. Ensuite le deuxième chapitre est intitulé "Cadre d'étude" et présente les éléments descriptifs du milieu, le troisième "Matériel et méthodes" expose le dispositif de collecte de données et la démarche méthodologique adoptée et enfin, le quatrième chapitre porte sur les "Résultats et discussions" présentant les résultats pertinents auxquels nous avons abouti.

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1.Généralités sur le sol

Le sol se définit couramment comme la fine couche de la surface terrestre, résultant de la dégradation lente des roches par des processus physiques et chimiques et siège d'une activité biologique intense (Hillel, 1980). Il est une composante, vivante, majeure de l'écosystème, véritable système ouvert, communiquant, échangeant avec tous les autres compartiments de son environnement. Echanges qui s'entendent en termes de transfert de matières, mais aussi d'énergie.

Le sol peut-être :

- Un réservoir, hydrique, mais aussi d'éléments qui peuvent participer à la vie comme éléments nutritifs, retenus dans le sol qui peuvent migrer vers d'autre compartiments ;
- Un échangeur, avec les échanges de matières, organiques ou minérales, qui s'effectuent à l'intérieur du sol mais aussi avec d'autres composantes de l'environnement ;
- Un transformateur pour les produits minéraux ou organique : altération des roches, évolution des matières organiques.

Malheureusement, il est victime de dégradations physiques (érosion…), et chimiques naturelles ou provoquées par l'Homme. La compréhension de la nature et du fonctionnement des sols est essentielle dans les problèmes de pollution du sol lui-même mais aussi pour d'autres compartiments des écosystèmes comme les pollutions hydriques.

Par ailleurs, le sol est un milieu poreux triphasique (Bavel et al, 1974), comportant :

- Une matrice solide, constituée d'éléments minéraux et organiques ;
- Une phase gazeuse, dont la composition est généralement voisine de celle de l'atmosphère, mais dépend également de l'activité biologique ;
- Une phase liquide, souvent désignée sous le terme de « solution du sol».

Le volume occupé par les phases liquide et gazeuse constitue l'espace poral du milieu, au travers duquel s'opèrent les processus d'écoulement. Le sol est en effet soumis à des mouvements d'eau entre sa surface et le niveau de la nappe phréatique. On distingue en général :

- la zone non saturée, dans les premières couches du sol, (près de la surface, jusqu'à quelques mètres de profondeur), dans laquelle l'eau n'occupe qu'une partie de la porosité, le reste étant occupé essentiellement par de l'air ;
- la zone saturée, dans couches plus profondes, où l'ensemble des pores est rempli d'eau.

1.2.Les différents états de l'eau dans le sol

L'eau à un effet considérable sur le comportement mécanique des sols et elle peut se trouver sous plusieurs états à l'intérieur d'un sol. On distingue :

- **l'eau libre** : c'est la fraction d'eau du sol présente dans les macrospores du sol.

Les trois autres fractions correspondent à :

- **l'eau capillaire**, présente dans les microspores ;
- **l'eau liée** qui est fortement liée aux particules du sol pour laquelle il faut une énergie d'extraction ; conséquente ;
- **l'eau de constitution**, c'est la partie présente au sein des particules du sol.

(source :http://tice.inplnancy.fr/modules/sciences_techniques/ProprietesMecaSols/chap7/formes.html)

1.3.Recharge

La recharge représente le flux de la percolation d'eau qui atteint la nappe et contribue au stock d'eau et l'écoulement de celle-ci (Simmers, 1988). On distingue la recharge naturelle qui peut s'opérer à partir des précipitations, des rivières, des canaux ou des lacs et la recharge artificielle. Cette dernière est due à certains processus qui peuvent être soit par intervention direct de l'Homme ou comme un phénomène induit par certaines de ses activités comme l'irrigation. Différents paramètres influencent directement la recharge à savoir : le climat, la topographie, le sol, la végétation et la géologie. La recharge varie aussi spatialement selon l'épaisseur de la zone non saturée (Flint et al, 2002). Globalement, la recharge est favorisée lorsque la végétation est pauvre, les précipitations importantes et bien distribuées sur l'année hydrologique, le sol perméable (à grains grossiers dans le cas des bassins sédimentaires) et lorsque la pente du terrain est faible.

1.4.L'infiltration

L'infiltration désigne généralement le passage de l'eau de l'extérieur vers l'intérieur du sol ainsi que sa redistribution dans la zone non saturée. Le processus d'infiltration a été largement étudié aussi bien par les physiciens du sol que les hydrologues. Horton (1933) à montrer que

lorsque la pluie atteint la surface du sol, elle s'infiltre à une vitesse décroissante avec le temps.

1.5.La structure

La structure du sol est une caractéristique dynamique qui englobe tout ce qui est assemblage, arrangement et orientation des constituants élémentaires du sol, et peut beaucoup varier au cours du temps à cause de fluctuation des conditions naturelles, de l'activité biologique et des pratiques culturales.

1.6.Les déchets

Un déchet est un bien que son propriétaire destine à l'abandon. Étymologiquement, déchet vient de déchoir, du latin cadere (tomber). La racine « dis » traduit l'éloignement et la séparation ; c'est bien là l'esprit qui entoure tous les objets qui sont considérés comme des déchets. Dans le même champ lexical, nous retrouvons « détritus », « ordure », « résidu », termes également employés pour désigner ces objets ou restes que l'on ne veut plus. Depuis la nuit des temps, l'homme produit des déchets. Dans ses activités les plus lointaines et les plus simples, les déchets de l'homme se limitaient à des restes organiques dégradés dans la nature par des processus biologiques naturels. C'est en augmentant sa technicité et son équipement, ainsi que la concentration de population au même endroit, que les déchets deviennent visibles et envahissants. C'est leur concentration et le manque de prise en compte qui fait des déchets un problème pour les populations humaines (Tristan Turlan, 2018).

1.7.Généralités sur le lixiviat

La législation européenne définit le lixiviat comme étant « tout liquide filtrant par percolation des déchets mis en décharge et s'écoulant d'une décharge ou contenu dans celle-ci » (Art 2, (i) Directive européenne sur les décharges, adoptée le 27 avril 1999). Plus communément, le lixiviat provient de l'eau qui percole à travers les déchets en se chargeant bactériologiquement et chimiquement en substances minérales et organiques dissoutes ou en suspension. La compréhension de la genèse des lixiviats implique non seulement la connaissance de la nature des déchets enfouis et le mode d'exploitation du centre de stockage des déchets (hauteur des déchets, surface exploitée, compactage…) mais aussi l'étude des interactions entre l'eau et les déchets. Les mécanismes de la genèse des lixiviats sont très complexes, ils sont de natures biologique et physico-chimique.

Les mécanismes physico-chimiques : l'évolution du pH, du pouvoir tampon, de la salinité et du potentiel d'oxydoréduction des solutions percolant à travers les déchets. Ces solutions mettent en œuvre des mécanismes chimiques de solubilisation, de complexation, d'oxydoréduction, d'adsorption, de neutralisation et de transfert de matière.

Les processus biologiques : les processus biologiques aérobies et anaérobies jouent un rôle prépondérant dans la genèse des lixiviats. En effet, les déchets enfouis servent de substrats aux micro-organismes hétérotrophes (bactéries, levures, champignons) responsables de la dégradation de la fraction organique fermentescible. Les effets de cette activité microbiologique peuvent être multiples, directs ou indirects et déclencher des phénomènes physico-chimiques secondaires. Il en résulte alors une modification des conditions du milieu (pH, température, potentiel d'oxydoréduction) (Trabelsi, 2012).

1.8. Les paramètres physico-chimiques de la zone saturée

1.8.1. Le Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le scientifique danois Sørensen a défini le concept de pH comme égal à l'inverse du logarithme de l'activité des protons (Westcott , 1978) :

$pH = -\log((H^+))$ C'est uniquement par souci de simplicité que la concentration est le plus souvent utilisée à la place de l'activité car c'est une valeur expérimentale plus facilement accessible. Dans les solutions aqueuses les ions H+ libres sont toujours associés aux molécules d'eau selon la réaction :

$H^+ + H2O \leftrightarrow H3O^+$ Par conséquent, la définition correcte du pH est :

$$pH = -\log((H3O^+))$$

Là aussi par simplicité, dans les équations mettant en jeu des protons, H3O+ est souvent remplacé par H^+ et il est usuellement écrit :

$$pH = -\log([H^+])$$

La concentration en protons H^+ exprimée en fonction du pH, correspond à la fonction réciproque de la relation (Westcott, 1978) :

$[H^+] = 10{-}pH$

Comme le souligne Sparks (2003), le pH du sol a souvent été appelé la variable maîtresse des sols. Il influence considérablement de nombreuses réactions et processus chimiques du sol. Le pH permet de définir l'acidité d'un sol. Les plages de pH du sol ont été classées par plusieurs auteurs comme suit (Sparks, 2003) :

Tableau 1: *Termes descriptifs pour différentes plages de pH du sol (Sparks, 2003)*

Termes descriptifs	Gamme pH
Extrêmement acide	< 4,5
Très fortement acide	4,5 – 5,0
Fortement acide	5,1 – 5,5
Modérément acide	5,6 – 6,0
Légèrement acide à neutre	6,1 – 7,3
Légèrement alcalin	7,4 – 7,8
Fortement alcalin	> 7,

Le pH, peut agir sur l'ionisation des formes oxydées ou réduites (pour le fer par exemple). Sa détermination est de ce fait très souvent associée à celle du Eh. Dans un système qui fait intervenir en même temps des électrons et des protons.

$$Ox + m\,H^{+} + ne \rightleftharpoons Red$$

Quand m et n sont égaux à l'unité, le potentiel baisse de 60 mV quand le pH augmente d'une unité. Cette expression démontre l'existence d'une relation linéaire entre le potentiel d'oxydo réduction et le pH (Bubenicek ,1964).

L'acidité échangeable (ou d'échange), fait intervenir la notion de Capacité d'Echange Cationique (CEC) du sol. Les composants argileux et humiques du sol ont des sites chargés négativement sur leurs surfaces qui adsorbent et retiennent les cations par force électrostatique (Mengel and Kirkby, 2001)

Lors d'une saturation du sol, le pH de la plupart des sols tend à se rapprocher du pH neutre. L'augmentation du pH des sols acides dépend de la quantité des oxydants (tels que les nitrates, les oxydes de fer et de manganèse et les sulfates) et du type d'oxydant car la quantité de protons consommés lors de leur réduction pourra être différente. Dans les sols alcalins, le pH

est contrôlé par l'accumulation de dioxyde de carbone et d'acides organiques dissous (Reddy and DeLaune, 2008).

1.8.2. Le potentiel rédox (Eh)

L'un des paramètres les plus utilisés pour rendre compte des propriétés oxydantes ou réductrices du milieu sol est le potentiel d'oxydo-réduction. Ce dernier est l'expression en millivolts du potentiel électrique qui résulte du transport d'électrons d'un donneur d'électrons vers un accepteur d'électrons. Les réactions d'oxydation et de réduction se traduisent, en effet, par des échanges d'électrons. Une oxydation est une incorporation d'oxygène, ou une libération d'électrons. Une réduction est une perte d'oxygène ou une incorporation d'électrons. Exemple Forme réduite Forme oxydée Exemple

Forme réduite **Forme oxydée**

$2FeO + O$ ===== Fe_2O_3

Fe^{2+} ===== $Fe^{3+} + e^-$

Dans les sols le potentiel redox (Eh) fluctue entre -300 et +900 mV/ENH. En fonction des potentiels redox mesurés dans les sols, quatre classes principales de sol ont été définies (Sparks 2003 ; Reddy and DeLaune 2008 ; Husson 2013) :

Tableau 2*: Principales classes de Eh de sol (adapté de Reddy and DeLaune (2008))*

Termes descriptifs	Eh (mV/ENH)
Les sols oxydés	> + 400
Les sols modérément réduits	+100 < Eh < + 400
Les sols réduits	- 100 < Eh < + 100
Les sols fortement réduits	- 300 < Eh < - 100

Les valeurs du Eh du sol dépendent fortement du taux d'humidité du sol. Ainsi les sols secs (conditions aérobies) ont un Eh généralement supérieur à 400 mV/ENH, les sols humides un Eh compris entre 200 et 400 mV/ENH (Pezeshki 2001 ; Sparks 2003 ; Reddy and DeLaune 2008). Les réactions d'oxydo-réduction ou réactions rédox constituent une grande classe de

réactions chimiques. Elles sont à la base de la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique et vice versa. Ce sont des réactions pour lesquelles un ou plusieurs électrons sont globalement échangés entre les réactifs. En fonction de sa capacité à gagner ou perdre des électrons le réactif est appelé « Oxydant » s'il est susceptible de gagner un ou plusieurs électrons, et « Réducteur » s'il est susceptible de perdre un ou plusieurs électrons.

Aujourd'hui, la littérature considère qu'il existe une corrélation négative entre pH et Eh dans les sols : une augmentation du pH est souvent accompagnée d'une diminution du Eh (van Breemen 1987 ; Bohrerova et al. 2004). Cette coévolution souligne le caractère interdépendant du Eh et du pH, dans des réactions impliquant un transfert d'électron mais également un transfert de protons, comme mis en avant lors de l'étude de l'équation du Nernst

1.8.3. Oxygène dissous dans le sol

Les sols contiennent des matières organiques oxydables et des produits résultant de l'altération des minéraux dont les formes dominantes sont, quand les sols sont bien drainés, le plus souvent oxydées. L'atmosphère du sol est en effet en continuité avec l'air et sa composition varie progressivement par rapport à celle de l'air (79% d'azote ; 20,9% d'oxygène ; 0,03% de gaz carbonique en volume) de la surface vers la profondeur où on observe une baisse du pourcentage d'oxygène et une augmentation de celui de gaz carbonique. Généralement les quantités d'oxygène de l'atmosphère du sol sont suffisantes pour oxyder les matières organiques qui se localisent surtout dans la partie supérieure des profils (Merkle, 1955). Mais certains sols peuvent présenter un excès d'eau dans une partie ou la totalité de leur profil. L'excès d'eau et plus particulièrement l'inondation provoque la diminution des échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère, les quantités d'oxygène présentes deviennent insuffisantes pour assurer l'oxydation des matières organiques, le milieu devient favorable aux réactions entre composants organiques et minéraux du sol (Siuta, 1967), tandis que les conditions anaérobies se développent progressivement (Rodrigo et Pollard, 1962).

1.8.4. Carbone Organique Total (COT)

A cause de sa grande diversité, le carbone organique est susceptible d'être oxydé par les procédés chimiques ou biologiques. Le dosage du COT se révèle être très adapté dans le cas où une partie de ce carbone échappe à ses mesures chimiques ou biologiques. La valeur du COT détermine complètement les composés difficilement oxydables chimiquement et non biodégradables qui sont d'une grande importance pour l'évaluation de la pollution de l'eau et des effluents. Pour déterminer la teneur en carbone total, les molécules organiques doivent

être converties en une forme moléculaire susceptible d'être mesurée quantitativement. Cette forme moléculaire est le dioxyde de carbone (CO_2). La conversion nécessite des oxydants chimiques ou de l'énergie thermique (T = 680 °C en présence d'un catalyseur en platine) et de l'oxygène pour convertir le carbone organique en carbone minéral (CO_2) (Sims JR, Bingham FT. 1968).

1.8.5. Notions de puits

Un puits est un trou vertical cylindrique d'un diamètre assez important permettant d'atteindre à partir du sol de la nappe d'eau souterraine (l'aquifère) la moins profonde ou « nappe phréatique » (DG Eau, 2008). Il se compose de trois parties :

-le captage : partie du puits située sous le niveau de l'eau qui permet à l'eau de l'aquifère de pénétrer l'intérieur du puits ;

-le cuvelage : c'est la partie située au-dessus du niveau de l'eau ;

-les équipements de surface : margelle, trottoir, système de puisage et aire assainie au tour du puits. (DG Eau, 2008).

1.8.6. Eau polluée

L'eau est dite polluée lorsque son état est directement ou indirectement modifié par les activités de l'homme. Il est ainsi plus difficile de l'utiliser voire dangereux et peut grandement affecter notre environnement et la vie de nombreuses espèces animales et végétales (www.ciaq.fr).

CHAPITRE 2 : CADRE D'ETUDE

CHAPITRE 2 : CADRE D'ETUDE

2.1. Situation géographique

L'arrondissement de Hêvié (Figure 1) est situé dans la partie Sud-Ouest de la commune d'Abomey-Calavi et dans le département de l'Atlantique entre les Latitudes 6°25' et 6°28' Nord et les Longitudes 2°13' et 2°16' Est. Il est limité au Nord-ouest par l'arrondissement de Tori-Bosito, au Sud par l'arrondissement de Godomey, à l'Est par l'arrondissement de Ouèdo et au Sud-Ouest par l'arrondissement de Pahou. Il s'étend sur une superficie de 39 km^2 et compte 67218 Habitants (INSAE, RGPH4-2013). Il est subdivisé en 5 villages à savoir : Adovié, Akossavié, Ouèdo, Houinmè et Zongo. La Figure 1 ci-dessus présente la localisation de l'arrondissement de Hêvié

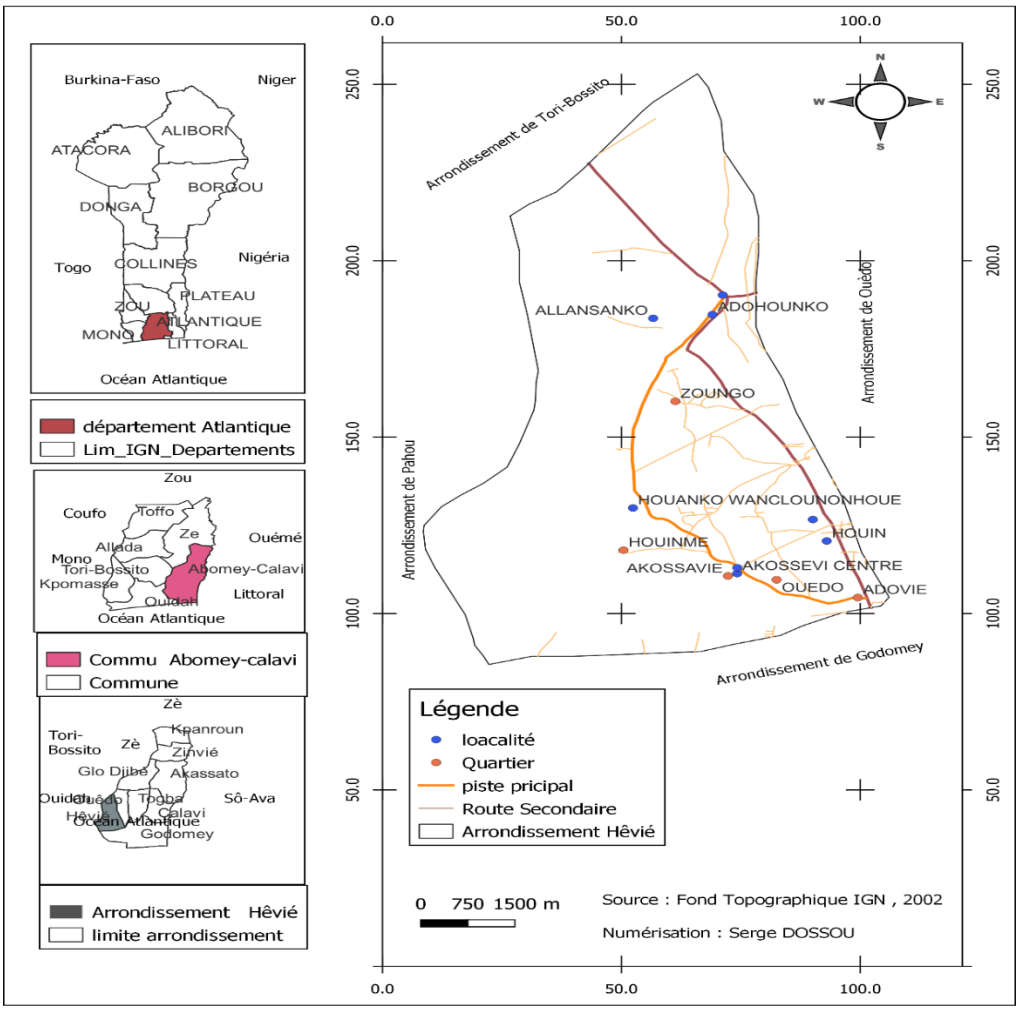


Figure 1:*Localisation de l'arrondissement de Hêvié*

2.2. Climat

Le climat est de type subéquatorial de transition avec une inégale répartition spatiotemporelle des pluies. La distribution temporelle des précipitations permet de déterminer quatre saisons, dont deux pluvieuses et deux sèches, réparties comme suit :

- une grande saison sèche de novembre à fin mars,
- une grande saison pluvieuse d'avril à juillet,
- une petite saison sèche de juillet à septembre,
- une petite saison pluvieuse de septembre à novembre,

Les précipitations moyennes annuelles se situent entre 800 à 1200 mm par an. Le régime des pluies y est souvent perturbé entrainant des changements dans les cycles annuels de production. La température oscille entre 25 et 28°C (Plage, 2006). La Figure 2 présente la variation des pluies annuelles de la commune d'Abomey-Calavi de 1987 à 2018 de la station de Cotonou.

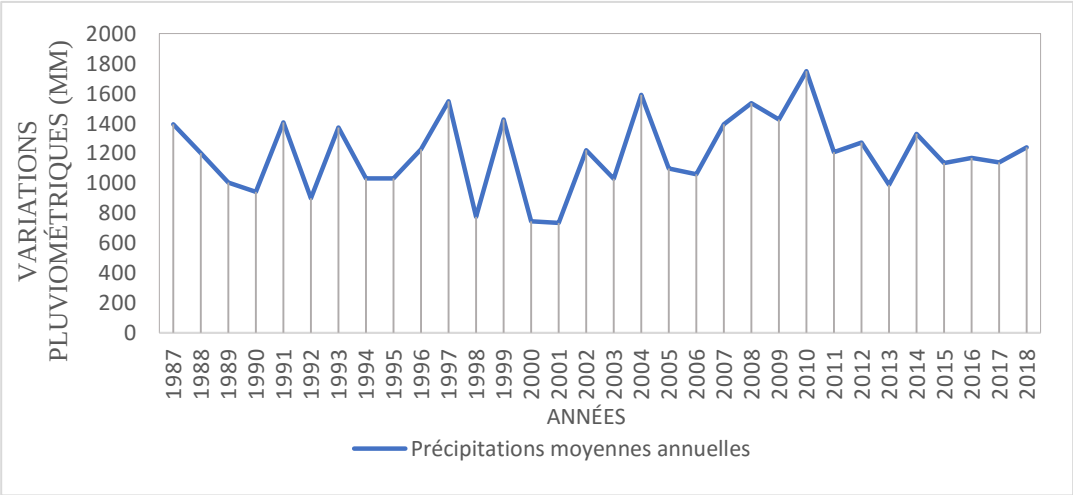


Figure 2: Variation annuelle des pluies d'Abomey-Calavi de 1987 à 2018 de la station de Cotonou

D'après la Figure 2, la plus grande variation pluviométrique a été observée au cours de l'année 2010 (1749,1 mm) et la plus faible l'année 2001 (735,19 mm).

2.3. Relief

L'arrondissement à un relief peu accidenté. Les principaux traits caractéristiques sont : une bande sablonneuse avec des cordons littoraux, un plateau de terre de barre et des dépressions. (DOVONOU et al., 2018).

2.4. Caractéristiques pédologiques

Le territoire béninois est constitué d'un socle cristallin qui occupe environ 80 % de ses couvertures sédimentaires. Deux types majeurs de sols sont enregistrés dans la zone d'étude : les terres de barre et les sols hydromorphes. Moins étendus que les terres de barre, les sols hydromorphes se retrouvent sous forme de filon et traverse toute la zone d'étude.

Les terres de barre sont des sols ferralitiques faiblement désaturés. Du point de vue géologique, ils reposent sur une formation du Continental terminal datant du Miopliocène et constituée de sédiments meubles argilo-sableux (Volkoff et Willaime, 1976). Ce type de sol est localisé entièrement sur toute la surface de la zone d'étude. Une mince couche humifère surmonte un horizon sableux qui devient sablo-argileux en profondeur. Ils ont un bon drainage, avec cependant une faible capacité de rétention en eau (n'excédant pas 6 %). La teneur en matière organique dépend du passé cultural. Elle peut varier de moins de 1 % sous culture intensive à près de 5 % sous forêt. Le pH relativement constant en profondeur (5,5) connaît de sensibles fluctuations en surface (5,5-7).

Les sols hydromorphes quant à eux sont moyennement organiques, humiques à gley, non salés reposant sur un matériau alluvial lagunaire et alluvio-colluvial fluviatile. L'excès d'eau dans ces sols s'exprime par un engorgement permanent de surface ou de profondeur. Sur les sols hydromorphes, des dépressions et des marécages se pratiquent des cultures maraîchères et fruitières.

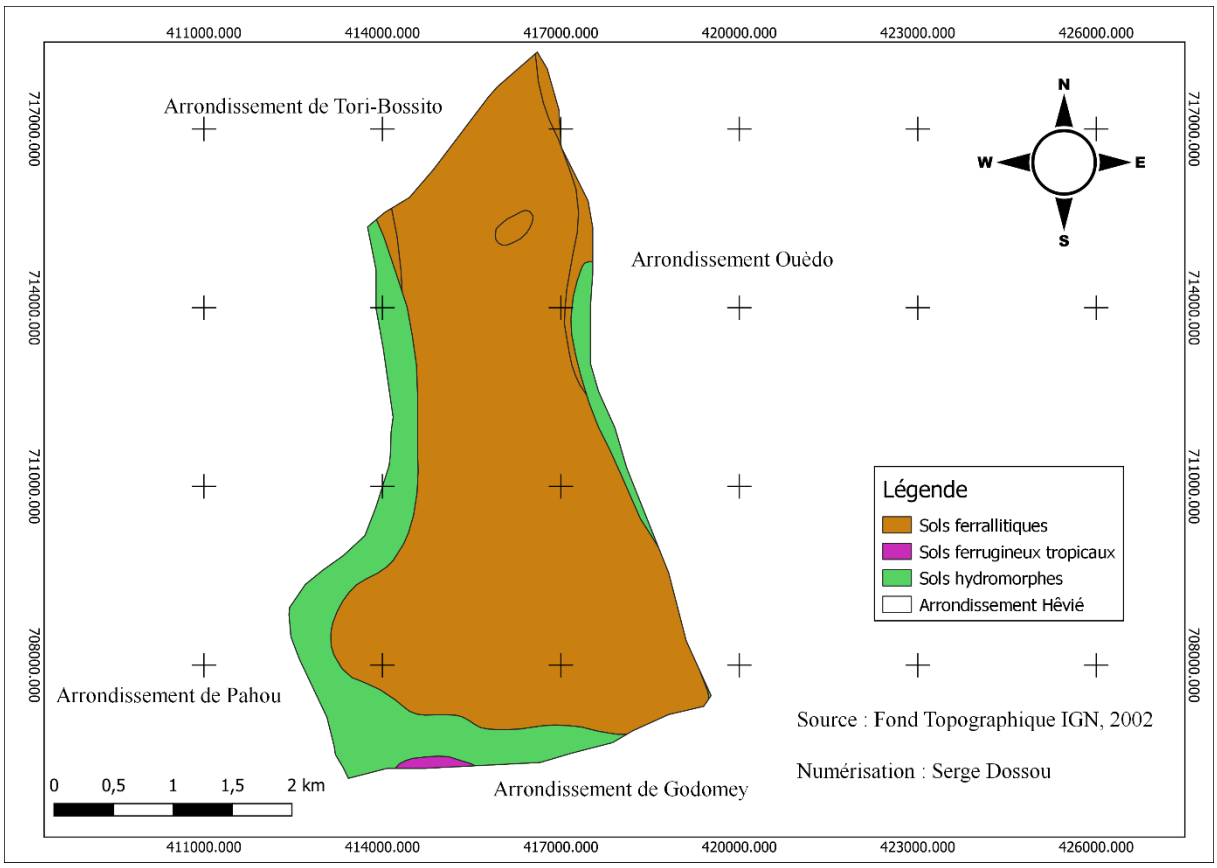


Figure 3 **:** carte pédologique de l'arrondissement de Hêvié

2.5. Caractéristiques démographiques et socio-économiques

L'arrondissement de Hêvié abrite une population estimée à 67218 habitants. Cette population est constituée de 34415 femmes et de 32803 hommes. Le nombre de ménages est de l'ordre de 13657 ménages (INSAE, 2013). Les collectivités riveraines sont constituées de Fon, Aïzo, Adja et Houéda. Les principales religions pratiquées par ces groupes ethniques sont le christianisme, l'islam, les religions traditionnelles et autres (Biaou, 2006). Hêvié est toujours un arrondissement rural et les principales activités économiques menées sont l'agriculture (culture du maïs, du manioc, de l'arachide et de la patate), l'élevage surtout le petit élevage (volailles, petits ruminants), l'artisanat et principalement celui de services (menuiserie, maçonnerie, coiffure, couture, mécanique…), le commerce (formel et informel) et l'exploitation de bois de feu (Monographie de Abomey-Calavi, 2006).

Les différents résultats des recensements généraux de la population et de l'habitation (RGPH) et la projection de 2019 calculée permettent d'apprécier l'évolution de la population de la commune d'Abomey-Calavi. Ainsi le taux d'accroissement a été calculé à partir de la

formule suivante $r = \left(\sqrt[n]{\frac{P_n}{P_0}} - 1 \right) \times 100$ avec P_n la population finale et P_0 la population initiale

La Figure 3 nous présente l'évolution de la population de la commune d'Abomey-Calavi :

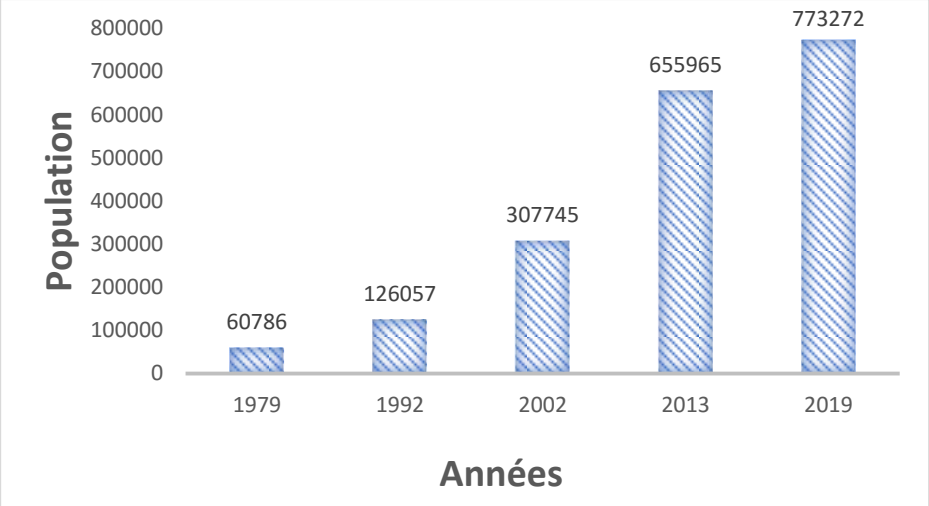


***Figure 4** : Evolution de la population d'Abomey-Calavi de 1979 à 2019*

Source : INSAE, (RGPH1, RGPH2, RGPH3, RGPH4)

De façon générale, on observe une croissance démographique dans la commune d'Abomey-Calavi. Cela peut s'expliquer par la saturation de l'espace habitable à Cotonou à Cotonou d'une part et par le processus d'urbanisation de la commune d'Abomey-Calavi d'autre part (Sogbo, 2013).

2.6. Contexte géologique

L'étude de la documentation nous a amené à distinguer dans le département de l'Atlantique trois types de formations géologiques à savoir :

- Formations du secondaire

Les formations de cette ère sont constituées de faciès de sables blancs, fins à grossiers et des argiles brunes verdâtres du Crétacé Marin.

- Formations du Tertiaire

Il s'agit des formations de :

Paléocène : essentiellement argilo-marneux avec quelques intercalations de niveaux calcaires;

Eocène : constituées de faciès principalement marneux avec des argiles grises renfermant parfois des galets de quartz. On y rencontre également quelques niveaux de sables fins et de calcaires phosphatés difficiles à distinguer de ceux du paléocène ;

Continental Terminal : constituées d'argiles latéritiques, bariolées, sableuses noires ou colorées et de sables fins, grossiers, des grès tendres et des graviers à la base

- Formations du Quaternaire

Ces formations sont constituées de faciès fondamentalement alluvionneux parfois argileux du cordon littoral actuel et récent de l'Holocène. Le substratum géologique sur lequel s'étend la commune d'Abomey-Calavi est constitué des sables voire argileux du Continental Terminal et des alluvions du Quaternaire. En effet, les sables du Continental Terminal datent du Miocène Supérieur et du Pliocène-pléistocène (Boukari et Alassane 2007 in DESIRE 2012). Ils ont pour couverture la terre de barre (formation homogène d'argilites kaoliniques et de sables quartzeux fins à moyens) et pour substratum les argilites silteuses parfois conglomératique du Miocène Inférieur. Les formations du Quaternaire quant à elles sont constituées de trois niveaux lithologiques à savoir :

- faciès à sables éoliens et marins du cordon littoral actuels et récents, dont le sommet correspond aux terrasses de 5 à 7 mètres ;
- faciès à alluvions argilo-sableuses des vallées inférieures des fleuves et ;
- une terrasse faite d'argile, de sables (blancs, bruns et gris) et de gravier ; localisé sur la façade littorale. Les sables grossiers sur la façade littorale ont une épaisseur d'environ 6 mètres avec une porosité dépassant 40%. En remontant de la côte, les sables silteux marins fins, grisâtres ont une épaisseur de 15 m et une porosité avoisinant les 35%.

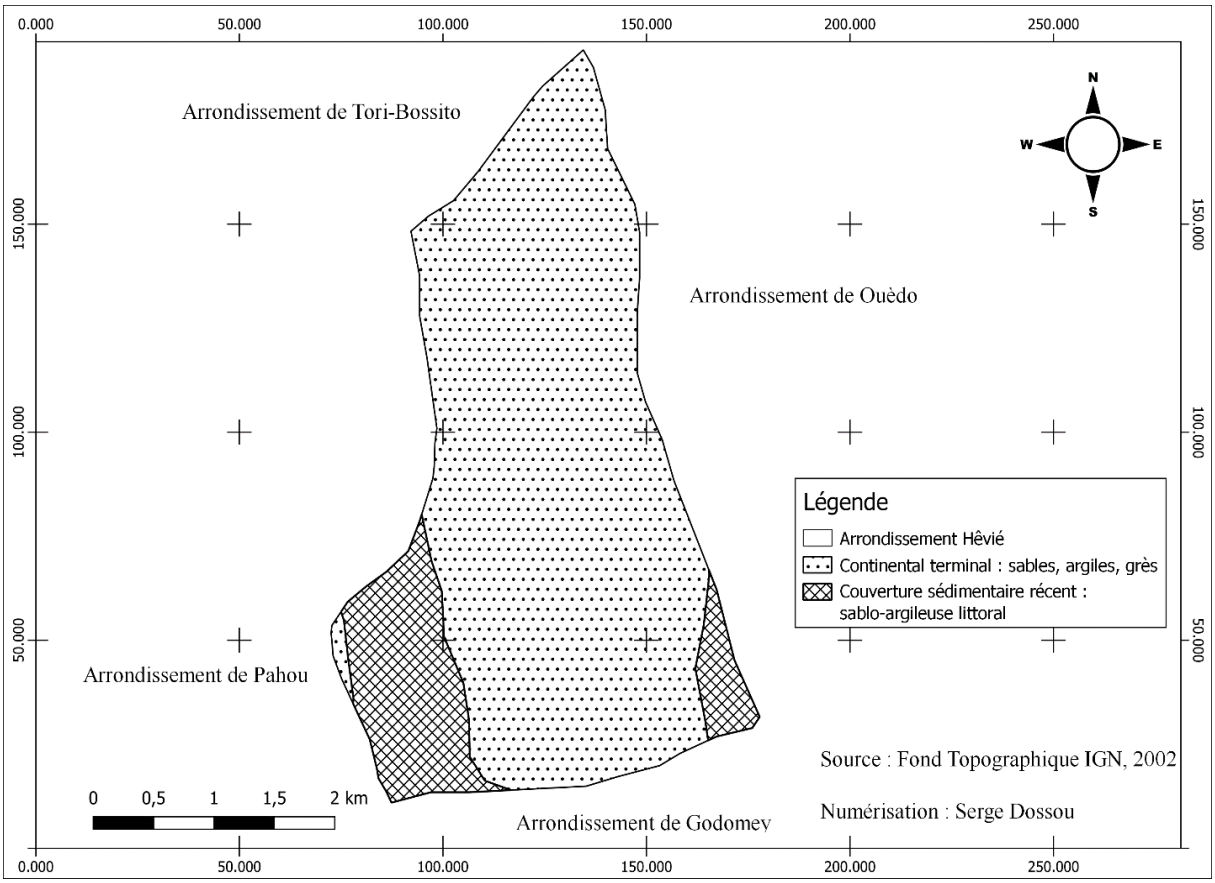


Figure 5: carte géologique de l'arrondissement de Hêvié

CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODE D'ETUDE

CHAPITRE 3 : MATERIEL ET APPROCHE METHODOLOGIQUE

3.1. MATERIEL

3.1.1. Matériel de prélèvement

Le matériel de terrain est composé :

- des cylindres pour le prélèvement d'échantillons de sol sur le terrain,
- des Sachets stérilisés pour la prise des échantillons représentatifs,
- d'un carnet de notes pour la prise de note
- d'un marqueur et une bande adhésive pour étiqueter les échantillons ;
- d'un GPS (Global Positionning System) de marque GARMIN pour la prise de coordonnées sur le terrain ;
- d'un appareil photographique numérique pour la prise de vues ;
- de deux motos pour le déplacement.
- des pioches pour la réalisation du puits ;
- des pelles et puisettes pour évacuer les sédiments lors du creusage ;
- des flacons plastiques de 1,5 L pour recueillir les échantillons d'eaux destinées aux analyses physico-chimiques et métaux lourds;
- une glacière pour conserver l'échantillon jusqu'au laboratoire;

3.1.2. Matériel de laboratoire

Le matériel nécessaire pour l'analyse physico-chimique se présente comme suit :

- les verreries de laboratoire : erlenmeyer de 250 ml (PCA) et bécher de 500mL (REC) ;
- un multi-paramètre permettant la mesure du pH, de la conductivité électrique, du potentiel rédox et de l'oxygène dissous ;
- des agitateurs magnétiques pour l'homogénéisation ;
- de l'eau distillée
- des barreaux aimantés
- balance pour pesage
- des éprouvettes
- une plaque chauffante ou une étuve pour chauffer les solutions ;
- une autoclave pour le chauffage à vapeur humide ;

3.2. METHODE

L'approche méthodologique adoptée pour ce mémoire s'est déroulé en trois étapes : la recherche documentaire, les travaux de terrain et de laboratoire.

3.2.1. Recherche documentaire

Dans le cadre de la réalisation de notre travail, la recherche documentaire a consisté en une collecte des informations dans les mémoires et autres documents scientifiques qui abordent la problématique de l'évaluation des paramètres physico-chimiques dans la zone non saturée. La consultation des mémoires en ligne, des rapports, des thèses, des mémoires des étudiants de l'INE, les bibliothèques scientifiques, et autres documents en relation avec l'étude menée. La recherche documentaire a permis de faire la synthèse des connaissances et recherches antérieures déjà effectuées pour mieux aborder le sujet d'étude. Aussi, ces recherches ont été subordonnées à des recherches sur Internet qui ont été d'une grande utilité et d'une importance capitale. Cette recherche documentaire s'est déroulée le long de la rédaction du rapport dans le but d'enrichir au fur et à mesure le travail et d'actualiser les informations ayant rapport au thème d'étude et a aussi permis de pouvoir orienter la collecte et le traitement des données.

3.2.2. Enquête de terrain

L'observation du terrain a pour but d'apprécier, la situation actuelle des tas d'ordure de l'arrondissement de Hêvié. Elle a consisté à faire des observations directes au niveau des lieux de dépôt des ordures, de la localité et suivie de la phase d'enquête grâce au questionnaire préétabli. Au cours de l'enquête, les informations ont été recueillies auprès des habitants. Le matériel de collecte est une fiche d'enquête munie de questionnaire utilisée pour mieux comprendre la problématique que pose le sujet. Cette fiche a permis d'apprécier l'état général des tas d'ordures dans l'arrondissement de Hêvié. Au total, 21 tas d'ordures ont été recensés (Figure 6).

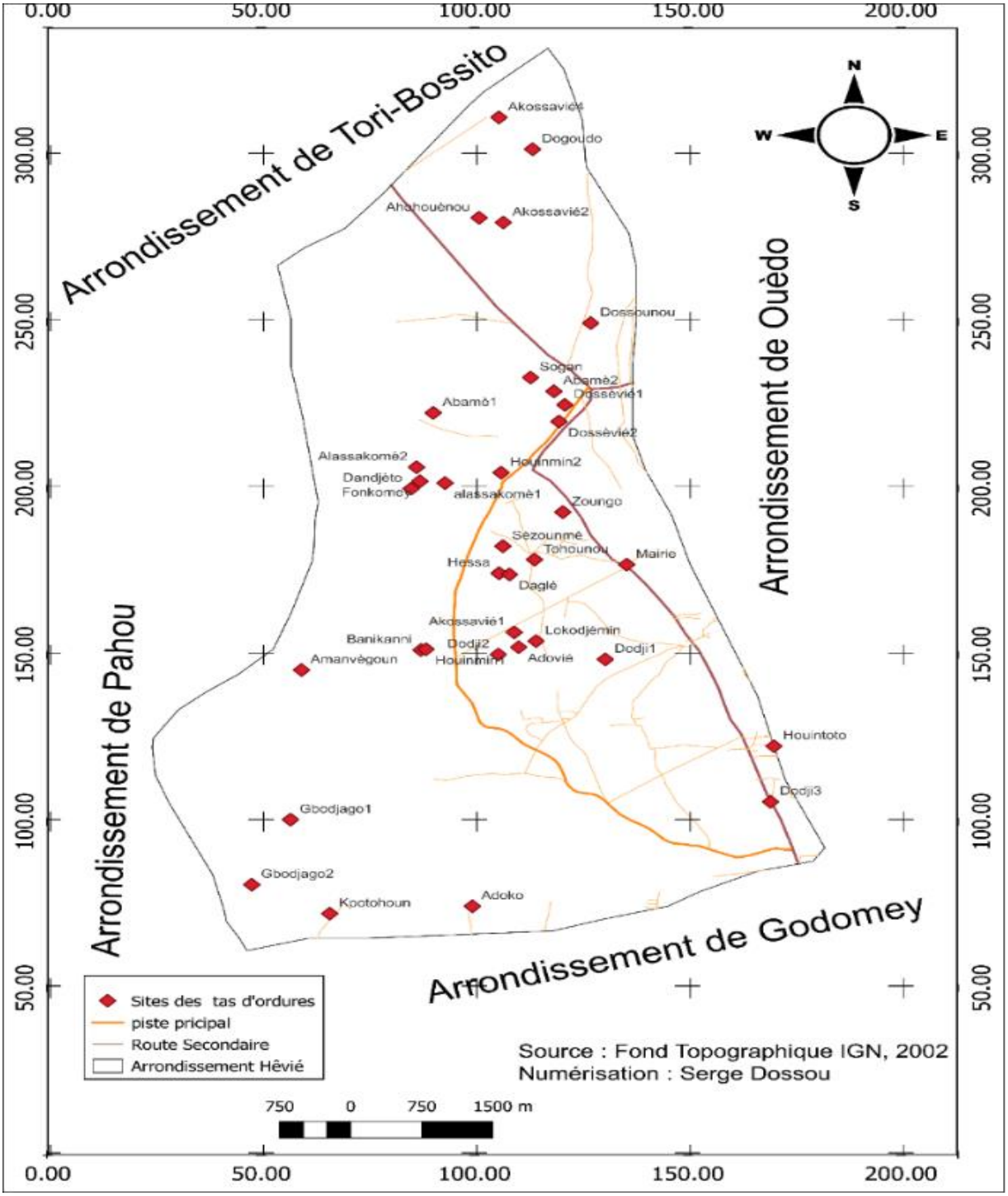


***Figure 6**: Localisation des tas d'ordure (Travaux de terrain, 2022)*

3.2.3. Travaux de terrain

3.2.3.1. Echantillonnage de sols dans la zone non saturée

Cette phase est capitale car elle conditionne un grand nombre de décisions. Pour cette étude, l'échantillonnage est effectué à travers une fosse ou un puits d'excavation de vingt-trois (23) mètres de profondeur. Cette fosse ou puits nous a mise en évidence la limite de la zone non saturée.

A l'intérieur de cette fosse ou puits, les échantillons ont été prélevés directement sur les parois, à chaque 1m de la profondeur jusqu'à la surface dans le but d'éviter la contamination des couches les plus profondes. Ces échantillons ont été décrits et étiquetés afin de les identifier facilement lors de l'analyse au laboratoire. Il s'agit des échantillons non remaniés c'est-à-dire des échantillons qui conservent la structure du sol et la distribution des particules.



***Photo 1**: Fosse de prélèvement des échantillons (Cliché DOSSOU S., 2022)*

3.2.3.2. Echantillonnage au niveau de la nappe superficielle

Nous avons ciblé trois puits localisés autour de la décharge d'Alasakomè . De façon pratique, les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide des puisettes. Nous avons adopté des mesures afin d'obtenir des échantillons les plus représentatifs de la nappe superficielle. Dans un premier temps nous nous sommes assuré que les utilisateurs des ouvrages ont suffisamment pris de l'eau pour permettre à la nappe de recharger le puits. Après la vidange, les paramètres physiques tels que le potentiel hydrogène (pH), la température, la conductivité électrique, la turbidité de l'eau ont été mesurés à l'aide d'un multi paramètre de marque HANNA. Les échantillons d'eau destinés aux analyses chimiques ont ensuite été prélevés dans des flacons de 1,5 litre remplis à ras.

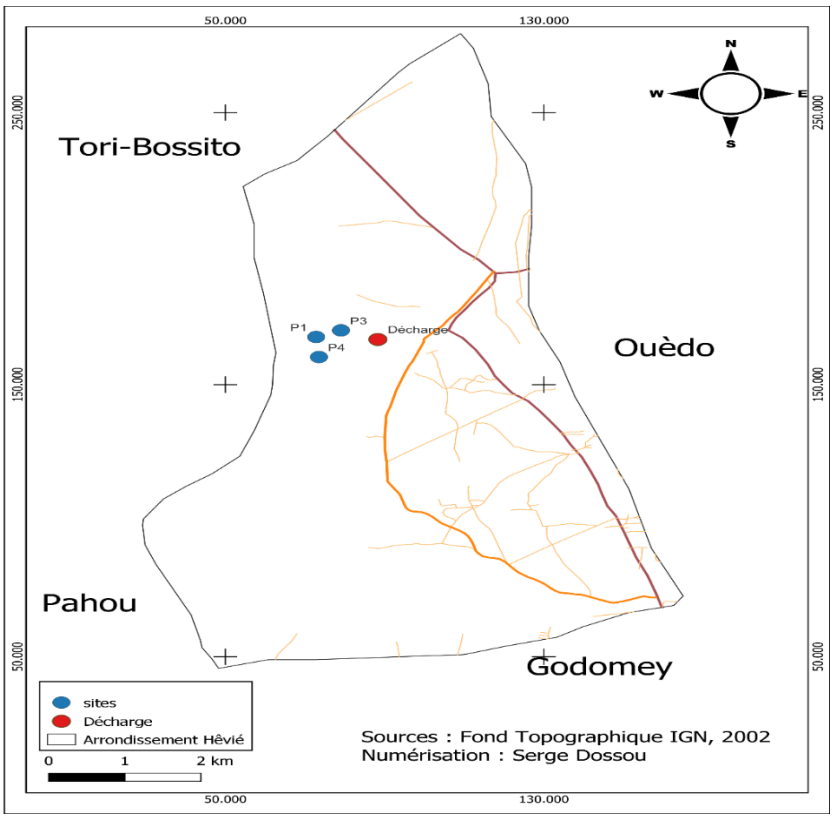


Figure 7 **:** Localisation des sites d'échantillonnage des puits ciblés et de la décharge choisie *(Travaux de terrain, 2022)*

3.2.4. Analyses physico-chimiques des sédiments

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au niveau du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA). Les paramètres physico-chimiques tels que le pH, le potentiel rédox, la conductivité électrique, et l'oxygène dissous ont été mesurés à l'aide d'un multi-paramètre de marque HANNA.



Photo 2*: Multiparamètre de marque HANNA (Cliché DOSSOU S., 2022)*

3.2.4.1. Extraction du lixiviat

L'extraction a été faite en utilisant de l'eau distillée. Nous avons pesé 60g d'échantillon de sol dans les erlenmeyers. Nous avons ajouté 150 ml d'eau distillée dans chaque erlenmeyer à l'aide d'une éprouvette graduée. Nous avons par la suite introduit les barreaux aimantés et les placez sur l'agitation vortex à basse vitesse pendant 30 min. Après 30 min, les erlenmeyers ont été enlevés et laissés décanter pendant 30 min. Après décantation, le surnageant (lixiviat) fut prélevé dans un bécher après l'avoir rincé à l'eau distillée. Filtrer et conserver dans un flacon en polyéthylène pour les différentes analyses. Quelques photos de l'extraction du lixiviat au laboratoire



e : Photo montrant la mesure de 150 ml d'eau distillée avec l'éprouvette



f : Photo montrant la décantation



g : photo montrant l'homogénéisation de l'eau distillée et du sédiment

Planche 1*: Méthode d'extraction au laboratoire (Cliché DOSSOU S., 2022)*

3.2.4.2. Les carbones organiques totales (COT)

Dosage du COT

La méthode gravimétrique est utilisée pour le COT suivant la référence AFNOR. Le principe de dosage consiste à introduire 50mL du minéralisât dans des porcelaines préalablement séchées (pendant 2heures) et pesées. La porcelaine contenant l'échantillon est ensuite à porter à une température de 550°C dans un four pendant 8h à 24h. Les porcelaines sont à nouveau pesées et le calcul de la teneur en COT est fait par différence de masse rapportée au volume.

3.2.5. Analyses chimiques et éléments traces métalliques des eaux des puits ciblés

3.2.5.1. Dosage des nitrates

Pour le dosage des nitrates, la méthode au Salicylate de Sodium indiquée par Rodier et al. (2009) est utilisée. En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent le paranitro-salicylate de sodium, coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique. La lecture se fait au spectrophotomètre HACH LANGE DR2800 à une longueur d'onde $\lambda = 425$nm.

3.2.5.2. Dosage des nitrites

La méthode au Réactif de Zambelli pour le dosage des nitrites (Rodier et al, 2009) est utilisée. L'acide sulfanilique en milieu chlorhydrique et en présence d'ions ammonium et de phénol, forme avec les ions $NO2^-$ un complexe coloré en jaune dont la densité est proportionnelle à la concentration en nitrites. Les lectures spectrophotométriques s'effectuent à la longueur d'onde de 425 nm.

3.2.5.3. Dosage de l'ammonium

La méthode de Nessler a été utilisée pour le dosage des ions ammonium (Rodier et al, 2009). Le réactif de Nessler en présence d'ions ammonium, donne de l'iodure de dimercuriammonium qui permet le dosage colorimétrique des ions ammonium $NH4^+$. La lecture se fait au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 425 nm.

3.2.5.4. Dosage de l'orthophosphates

Les orthophosphates ont été déterminés au spectrophotomètre avec le molybdate d'ammonium et le tartrate double d'antimoine tel que proposé par Rodier et al (2009). Il se forme en milieu acide un complexe avec le molybdate d'ammonium et le tartrate double

d'antimoine et de potassium avec réduction par l'acide ascorbique en un complexe coloré en bleu. L'absorbance du complexe bleu formé est mesurée à la longueur d'onde la plus sensible 700 nm.

3.2.5.5. Dosage des éléments traces métalliques

Le fer a été dosé par la méthode spectrophotométrique à la phénanthroline-1,10. Il se produit la formation d'un complexe rouge orangé en milieu tamponné entre le fer converti à l'état de fer (II) et la phénanthroline -1,10. L'absorbance du complexe est mesurée au spectrophotomètre d'absorption moléculaire à 510 nm (Zogo, 2016). Le plomb, le zinc et le cadmium sont dosés au SAA (Spectrophotomètre à Absorption Atomique) au laboratoire de la DNSP.

3.2.6. Traitement des données

Le tableur Excel 2016 a permis de préparer des données à utiliser dans le logiciel QGIS 3.22 qui, à son tour, a permis de réaliser les différentes cartes. Quant au traiteur de texte Word, il a permis de rédiger le mémoire.

A l'aide du tableur Excel 2016 et le logiciel Grapher, on a pu réaliser les différents graphes, courbes et procéder aux diverses analyses statistiques des données collectées sur le terrain et au laboratoire.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. RESULTATS

Les résultats présentés dans cette partie sont ceux provenant des informations basées sur :

- L'enquête réalisée auprès des habitants au sujet de l'identification des tars d'ordures de l'arrondissement.
- Les analyses des paramètres physico-chimiques des sédiments de la zone non saturée de notre zone d'étude.
- Les analyses des paramètres physico-chimiques et métaux lourds de la nappe superficielle de notre zone d'étude.

4.1.1. Identification des tas d'ordure

Dans l'arrondissement de Hêvié, des tas d'ordure sont identifiés dans 80% des quartiers enquêtées tandis que 20% restant sont abonnés à la SGDS-GN (Société de Gestion des Déchets et de la Salubrité Urbaine du Grand Nokoué). La Figure 8 montre l'identification des tas d'ordure dans Hêvié.

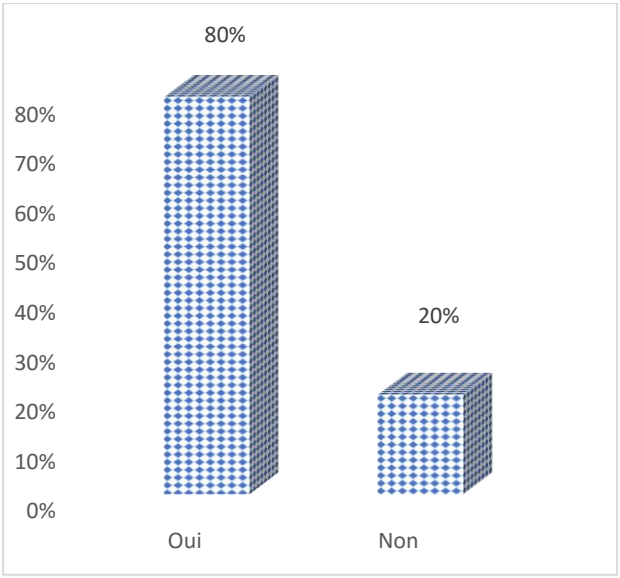


***Figure 8**: Identification des tas d'ordure*

4.1.2. Origine et nature des ordures

Dans les quartiers de Hêvié où les enquêtes sont réalisées, deux sources de provenance des ordures sont retrouvées. Ce sont les ordures ménagères et hospitalières. La Figure 9 montre l'origine et la nature des ordures.

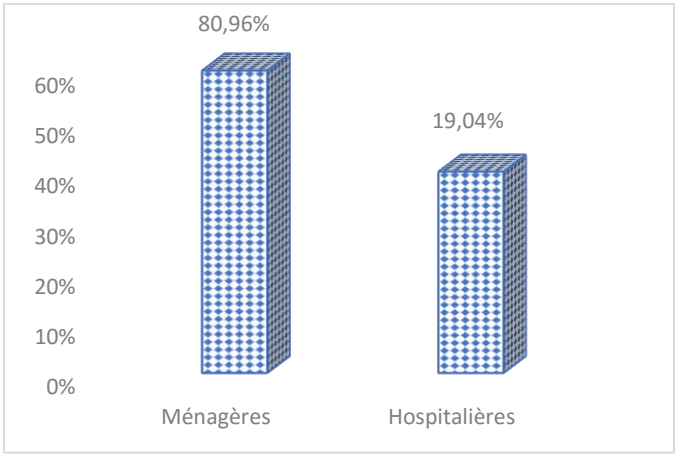


Figure 9 *: Origines et nature des ordures*



a : photo montrant les ordures hospitalières b : photo montrant les ordures ménagères

Planche 2 *: Origine et nature des ordures (Cliché DOSSOU S., 2022)*

En effet d'après les enquêtes, 80,96% des ordures provienne des ménages et 19,04% provienne des hopitaux. Les sources des ordures sont présentées sur la Planche 2.

4.1.3. Les types de déchets retrouvés dans les quartiers de Hêvié

D'après nos enquêtes, deux types d'ordures sont retrouvés : les ordures solides et liquides. En somme 80% des ordures solides sont retrouvés dans des quartiers tandis que 20% des ordures liquides (eaux usées) sont retrouvés. La figure 10 montre les types de déchets retrouvés dans l'arrondissement de Hêvié.

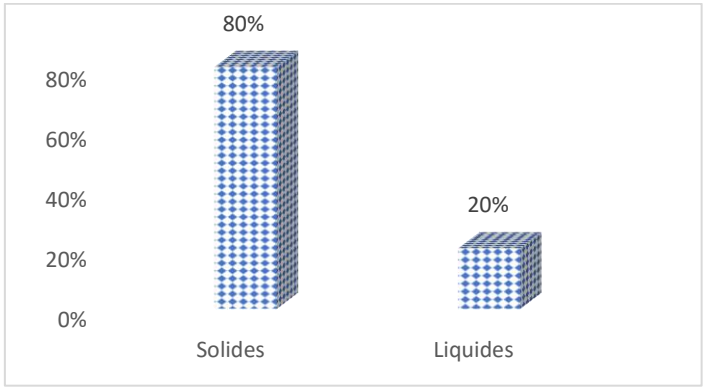


Figure 10: *Les types de déchets retrouvés.*

4.1.4. Production et rejet des ordures dans les quartiers de Hêvié

Le graphe de la Figure 11 montre que les ordures sont produites et rejetées tous les jours de la semaine dans l'arrondissement de Hêvié.

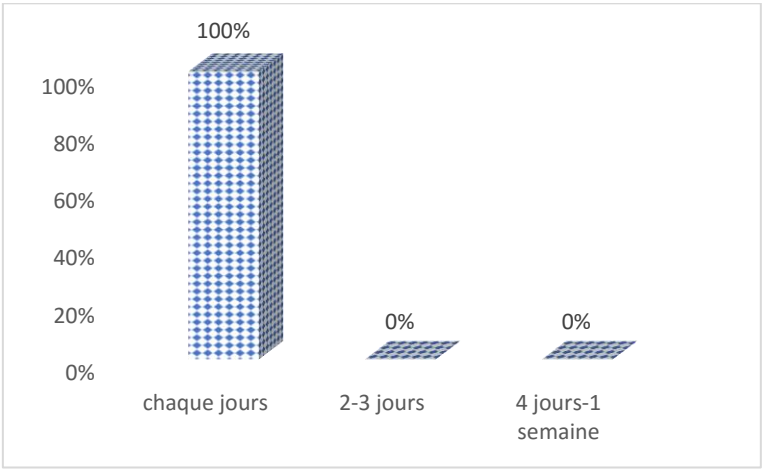


Figure 11*: Production et rejet des ordures*

4.1.5. La lithologie de la zone non saturée de Hêvié

D'après la lithologie, il ressort que à Hêvié on distingue trois différentes couches. De la surface du sol vers l'aquifère du Continental Terminal on a la succession lithologique suivante :

- 0 à 1 m : une couche sableuse ;
- 1 à 16 m : une couche argilo-sableuse ;
- 16 à 17 m : une couche sablo-argileuse ;
- 17 à 22 m : une couche argilo-sableuse ;
- 22 m au fond : une couche sableuse.

La figure 12 présente le log stratigraphique de puits de Hêvié

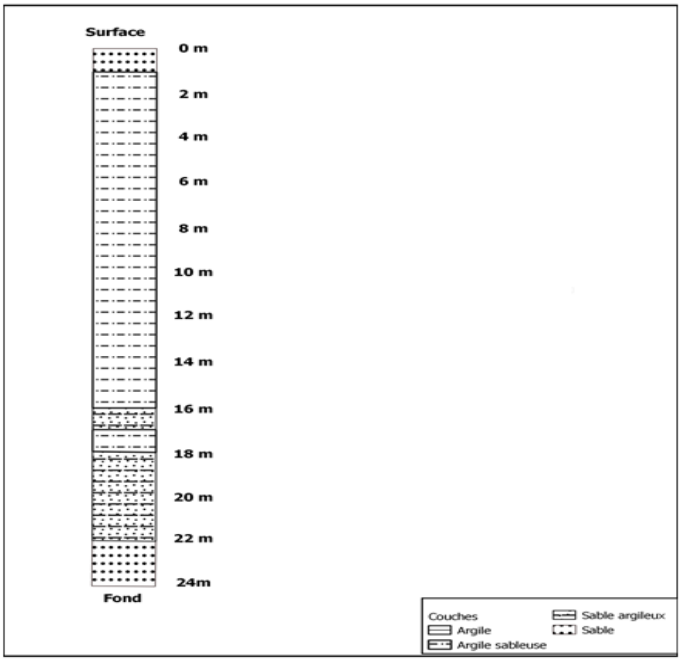


Figure 12 *: Lithologie de Hêvié*

4.1.6. Variation des paramètres physico-chimiques des sédiments

- **Le potentiel d'Hydrogène (pH)**

Les valeurs du pH de nos échantillons changent en fonction de la profondeur. Les potentiels d'hydrogène obtenus se situent entre 4,13 et 6,76 avec une moyenne de 5,32. La plus faible valeur est enregistrée à 13 m de profondeur qui est une couche argilo-sableuse et la plus grande à la surface de la terre qui est une couche sableuse. Une comparaison de l'acidité du pH permet de classer les pH de nos échantillons dans leurs différentes gammes. De 0 à 6 m de profondeur les valeurs du pH sont entre 6,1 et 7,3. Les valeurs du pH obtenues de 7 à 8 m de profondeurs se situent entre 5,1 et 5,5. De 9 à 10 m de profondeur le pH est compris entre 4,5 et 5. De 11 à 17 m de profondeur les pH des échantillons sont inférieurs à 4,5. A 18 m de profondeur les valeurs de pH obtenues sont situées entre 5,6 et 6 tandis que de 19 à 20 m, elles se trouvent entre 6,1 et 7,3. En prenant en compte la coupe lithologique, il ressort, d'un point de vu global, que les couches constitutives de la lithologie de Hêvié sont de nature acide. Les couches sableuses (0-1m) ont un caractère légèrement acide voir neutre tandis que les couches argilo-sableuses ont un caractère acide qui varie avec la profondeur : une croissance de l'acidité entre 1 et 17m de profondeur suivie d'une décroissance entre 17 et 19 m de profondeur. La variation du pH dépend de la quantité des oxydants (tels que les nitrates, les oxydes de fer et de manganèse et les sulfates) et du type d'oxydant car la quantité de

protons consommés lors de leur réduction pourra être différente (Jeremy Jean-Guy COTTES, 2009). La figure 13 montre la variation du pH en fonction de la profondeur

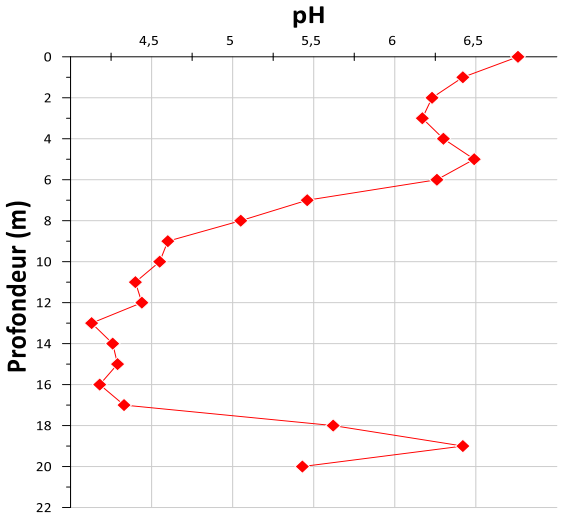


Figure 13 : variation du pH en fonction de la profondeur

- **La Conductivité Electrique (CE)**

Les valeurs enregistrées durant la période d'étude varient de 25 à 122 µS/cm pour la conductivité avec une moyenne respective de 78,38 µS/ cm. La plus forte valeur est obtenue à 9 m de profondeur du puits et la plus faible à 18 m de profondeur. La conductivité mesurée sur les échantillons de couches sableuse varie entre 26 et 46 µS/cm tandis que celle effectuée sur les échantillons de couche argilo-sableuse donne des valeurs situées entre 25 et 122 µS/cm. En ce qui concerne les échantillons de couche sablo-argileuses, les mesures de conductivité effectuées donnent des valeurs de 105 et 107 µS/cm. Ces résultats permettent également de souligner que les conductivités mesurées sur les échantillons de couche argilo-sableuse sont plus élevées que celles de couche sablo-argileuse et de couche sableuse, signe de présence de grandes quantités d'espèces ioniques en solution (Li^+, Na^+, k^+, NH_4^+, NO_3^-) (Jeremy Jean-Guy Cottes, 2009). Cela peut être dû à un changement de composition chimique du sol libérant des espèces ioniques dans la solution du sol. On peut donc conclure que la couche argilo-sableuse est plus minéralisée que la couche sablo-argileuse qui, à son tour, est plus minéralisée que la couche sableuse. La figure 14 présente la variation de la conductivité en fonction de la profondeur

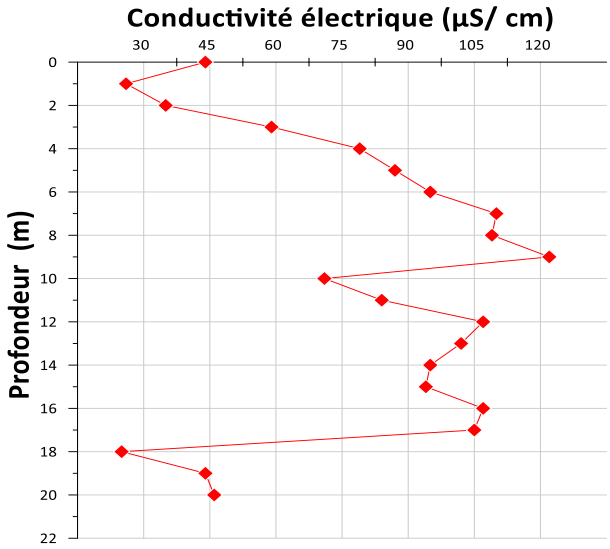


Figure 14 *: Variation de CE en fonction de la profondeur*

- **L'Oxygène Dissous (OD)**

L'oxygène dissous varie en fonction de la profondeur. La plus faible valeur (47,4 mg/L) est enregistrée à la surface de la terre et la plus grande (56,58mg/L) à 1m de profondeur avec une moyenne de 51,58mg/L. Cette faible variation de l'oxygène peut s'expliquée par la présence d'air et d'humidité dans la zone non saturée. La figure 15 montre la variation de l'oxygène en fonction de la profondeur

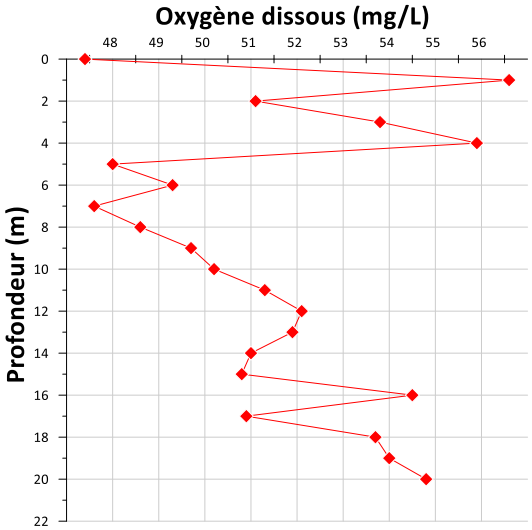


Figure 15: *Variation de l'oxygène dissous en fonction de la profondeur*

❖ **Le potentiel rédox (Eh)**

Les valeurs du potentiel rédox varient entre 79,8 et 273 mV avec une moyenne de 196,28. La plus forte valeur est enregistrée à 13 m de profondeur et la plus faible à 19 m de profondeur. De 0 à 1 m de profondeur on note une diminution du potentiel rédox qui quitte de 177,9 mV pour 109,3 mV. Cette profondeur correspond à la couche sableuse. De 2 à 16 m et de 18 à 20 m de profondeur on observe une augmentation du potentiel rédox qui devient importante à partir de 4 m de profondeur avec une valeur maximale de 273 mV à 13 m de profondeur. Ces profondeurs correspondent à la couche argilo-sableuse. Une diminution de 247,8 à 217,7 mV du potentiel rédox au niveau de la couche sablo-argileuse est également constaté de 16 à 17 m de profondeur. Cette analyse des valeurs de potentiel rédox nous permet d'identifier deux types de sol dans la ZNS de Hêvié. Il s'agit des sols réduits représentés par les couches sableuses et les sols modérément réduits représentés par les couches argilo-sableuses et sablo-argileuses. La figure 16 présente la variation du potentiel rédox en fonction de la profondeur

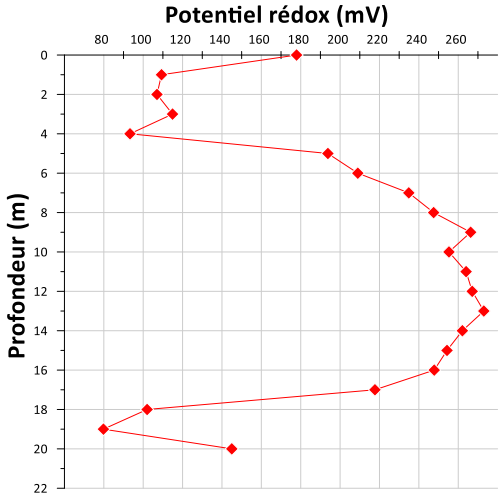


***Figure 16**: Variation du potentiel rédox en fonction de la profondeur*

❖ **Le Carbone Organique Total (COT)**

Le carbone organique total varie en fonction de la profondeur. De 0 à 2 m, 6 à 8 m et de 13 à 20 m de profondeur le taux du carbone organique totale est presque nul. Ainsi à ces profondeurs les couches géologiques sont dépourvues des matières organiques. De 4 à 5 m de profondeur et de 10 à 12 m de profondeur, on observe une présence importante du carbone organique totale dont la concentration varie entre 2 et 11 m de profondeur. Ceci montre que les couches géologiques localisées à ces profondeurs sont des couches riches en matières

organique. La figure 17 traduit la variation du carbone organique totale en fonction de la profondeur.

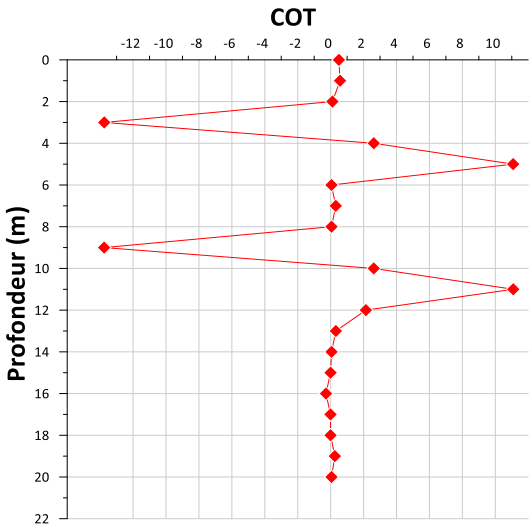


***Figure 17**: variation du COT en fonction de la profondeur*

Une analyse de trois (03) échantillons d'eaux prélevées au niveau de trois différents puits et un échantillon au niveau du puits creusé sur le site ont été effectués au laboratoire dans l'intention de voir l'impact des ordures sur la nappe superficielle.

4.1.7. Les paramètres physico-chimiques et les éléments traces métalliques des eaux des puits ciblés et d'échantillon d'eau du puits creusés sur le site

4.1.7.1 Paramètres physico-chimiques d'échantillon d'eau du puits creusés sur le site

Le Tableau 3 présente les différents résultats des paramètres obtenus in situ et au laboratoire.

***Tableau 3**: Paramètres de terrain et de laboratoire d'échantillon d'eau du puits creusés sur le site*

Paramètres / Puits	NO_3^-	PO_4^{3-}	NH_4^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	HCO_3^-	F^-	Ph	CE	OD
S1	63,66	7,1	0,06	28,56	10,45	1,31	12,3	0	5,37	673	4,96

D'après le tableau, la valeur du pH de l'échantillon d'eau prélevé au niveau de la nappe libre est de 5,37. Une comparaison avec les valeurs pH des sédiments permet de conclure que l'eau prélevée est fortement acide car elle se situe dans l'intervalle de 5,1 et 5,5. 673 µS/ cm est la valeur obtenue pour la conductivité. Cette valeur trouvée est supérieure à toutes les valeurs de la conductivité des sédiments. Cette eau à une conductivité élevée donc contient plus de

matières solides dissoutes et est par conséquent plus minéralisées. La quantité d'oxygène dissous est de 4,96 mg/L. Cette valeur de l'oxygène dissous confirme sa faible variation au niveau des sédiments. Cela veut dire que le milieu est anoxie. La valeur maximale permise pour le fluorure est 1,5 mg/L. Pour notre échantillon, la valeur trouvée est 0 mg/L. Cela veut dire que l'échantillon d'eau prélevé au niveau de la nappe libre ne contient pas des ions fluorures. Les valeurs du calcium, de magnésium, de nitrate, de sulfate, et d'ammonium obtenues sont respectivement de 28,56mg/L ; 10,45mg/L ; 63,66 mg/L ; 1,31 mg/L et de 0,06 mg/L dans l'échantillon d'eau prélevé. Cela montre une migration de ces espèces vers la nappe. L'analyse chimique des résultats du laboratoire montre que les espèces chimiques qui sont à l'origine de l'acidité du pH, de la minéralisation et qui sont oxydés et réduit lors des équations d'oxydo-réduction dans les échantillons du sol sont présent dans l'échantillon d'eau prélevée au niveau de la nappe libre.

4.1.7.2. Paramètres physico-chimiques des eaux des puits ciblés

- **Potentiel d'Hydrogène (pH)**

Les valeurs du pH de nos échantillons changent en fonction du site échantillonné. Les potentiels d'hydrogène obtenus se situent entre 5,16 et 5,46 avec une moyenne de 5,27. La plus faible valeur est enregistrée à Alasakomè et la plus grande à Houimè. Une comparaison avec les normes de qualité de l'eau potable en république du Bénin selon le décret n°2001-094 du 20 Février 2001, fixant le pH entre 6,5 et 8,5 permet de conclure que ces eaux ne respectent pas lesdites normes de qualité et sont acides. La figure 18 montre la variation du pH au niveau des différents puits.

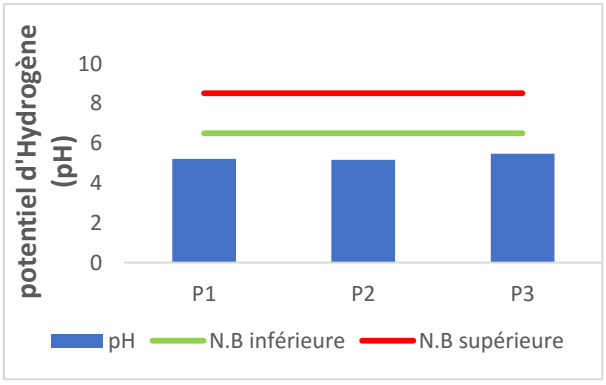


***Figure 18**: Variation du pH*

❖ Conductivité électrique/TDS

Les valeurs enregistrées durant la période d'étude varient de 35 à 64 µS/ cm pour la conductivité et de 17 à 32 mg/ l pour le TDS à une température variable entre 30°C et 32,5°C avec des moyennes respectives de 52,33 µS/ cm et 26 mg/l. Ces deux paramètres vont de paires. La plus forte valeur est obtenue au site P3 (Houimè). Les valeurs trouvées sont en conformité avec les normes. Les eaux ont une faible conductivité donc contiennent moins de matières solides dissoutes et sont par conséquent peu minéralisées, donc susceptibles d'être agressives. Une eau douce associée à un pH acide donne une eau agressive. La figure 19 montre la variation de la conductivité électrique et des TDS au niveau des différents puits.

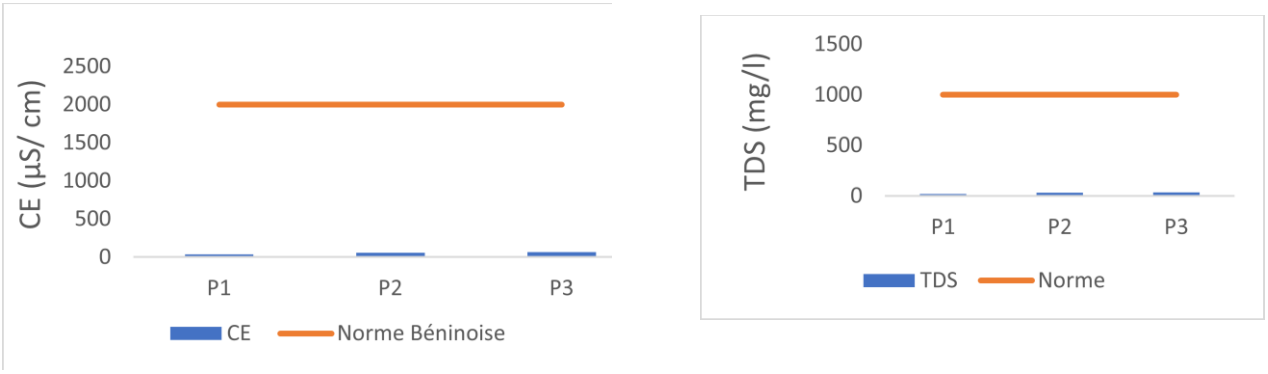


***Figure 19**: Variation de la Conductivité électrique et des TDS*

❖ Température

Dans notre zone d'étude, nous avons remarqué que la température varie entre 30 et 32,5°C avec une moyenne de 31°C. D'après le graphe de la figure 22, la valeur minimale de la température est observée au niveau de P2 (Alasakomè) et la valeur maximale au niveau de P3 (Houimè). Ces valeurs traduisent la température du milieu ambiant. On note par ailleurs que les valeurs obtenues sont relativement les mêmes que celles qui prévalent dans la région pendant la période de notre étude. La figure 20 présente la variation de la température au niveau des différents puits.

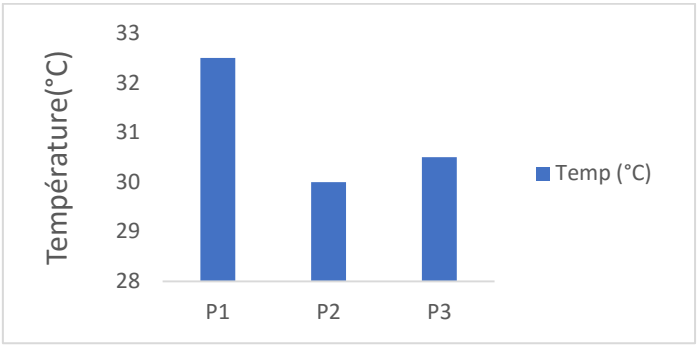


Figure 20: *Variation de la Température*

❖ **Oxygène dissous**

Au niveau des différents points d'eau à Hêvié la quantité d'oxygène dissous est comprise entre 4 et 7,5mg/L. La plus faible valeur est obtenue à Alasakomè (P2) et la plus forte valeur est obtenue à Houimè (P3). Toutes les valeurs sont supérieures à 5 mg/L excepté P2 comme la recommande les directives de l'OMS avec une moyenne de 5,66mg/L. Cela veut dire que les quantités d'oxygène dissous obtenues sont conformes aux recommandations de l'OMS. La figure 21 montre la variation de l'oxygène au niveau des différents points d'eau.

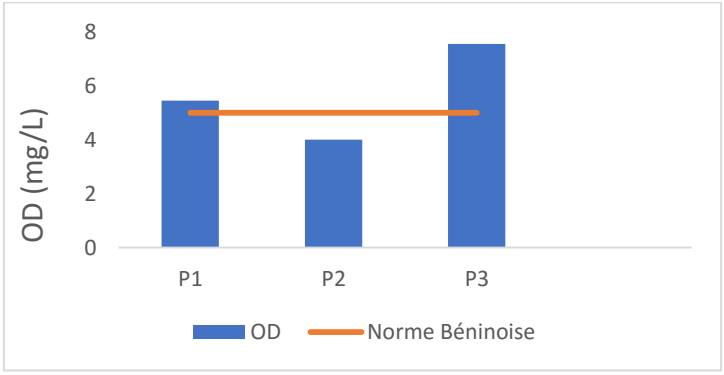


Figure 21: *Variation de l'Oxygène dissous*

❖ **L'orthophosphate**

Les valeurs d'orthophosphate varient entre 0,010 et 0,017mg/L avec une moyenne de 0,01 mg/L. Ces valeurs appartiennent respectivement aux sites P1 (Bethesda) et P3 (Houimè). Ces valeurs sont toutes inférieures à la valeur maximale (0,2 mg/L) admissible pour les eaux de consommation. La figure 22 montre la variation de l'orthophosphate au niveau des différents puits.

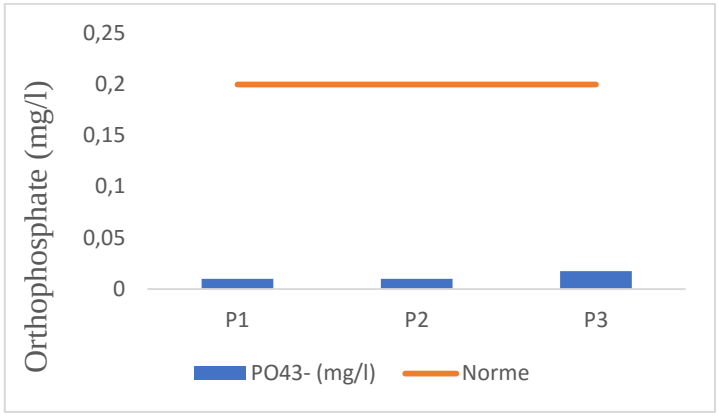


***Figure 22**: Variation de l'orthophosphate*

❖ **Nitrates**

La concentration des nitrates mesurée au niveau des différents point d'eau varie entre 0mg/L et 0,86mg/L. La présence de nitrate a été constaté à Alasakomè . Cette valeur obtenue est au-dessous de la norme. La figure 23 montre la variation de nitrate au niveau des différents puits.

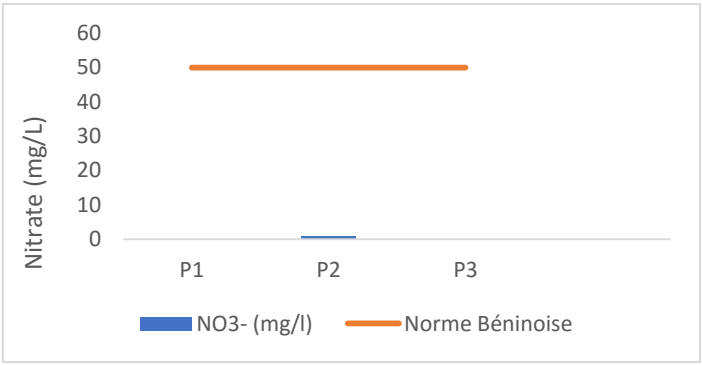


***Figure 23:** Variation de Nitrates*

❖ **Nitrites**

Les nitrites sont issus de la transformation ou de l'oxydation du nitrate sous l'action des microorganismes. Les concentrations de nitrite obtenues dans les différents points d'eau varient faiblement de 0,028 à 0,048mg/L. La plus faible valeur est obtenue à Bethesda (P1) et la plus forte valeur à Alasakomè (P2). La limite recommandée par l'OMS est de 3,2mg/L. Le graphe la figure 22 présente la variation de la concentration de nitrite au niveau des différents points d'eau. La figure 24 montre la variation de nitrites au niveau des différents puits.

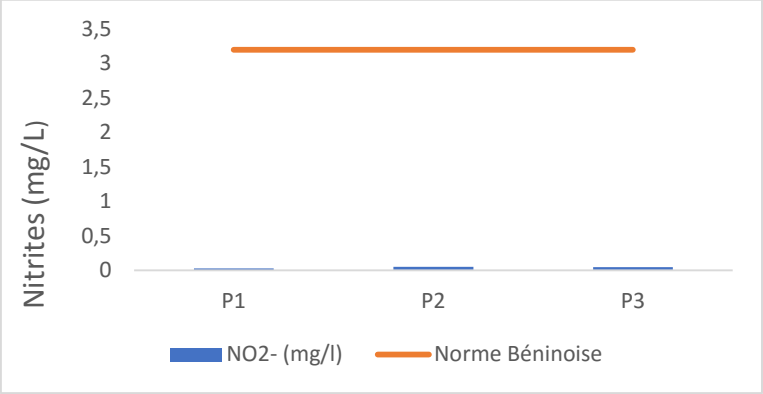


***Figure 24**: Variation de Nitrites*

❖ **Ammonium**

Les différentes valeurs obtenues pour l'ammonium sont au-dessous de la limite recommandée par l'OMS qui est de 0,5mg/L. La plus forte valeur est obtenue à Alasakomè (P2) et à Houimè (P3) qui est de 0,032mg/L, cette valeur résulte de l'infiltration des eaux qui sont chargé en déchets, la plus faible valeur est de 0,016mg/L est obtenue à Bethesda (P1). La figure 25 présente la variation de l'ammonium au niveau des différents puits

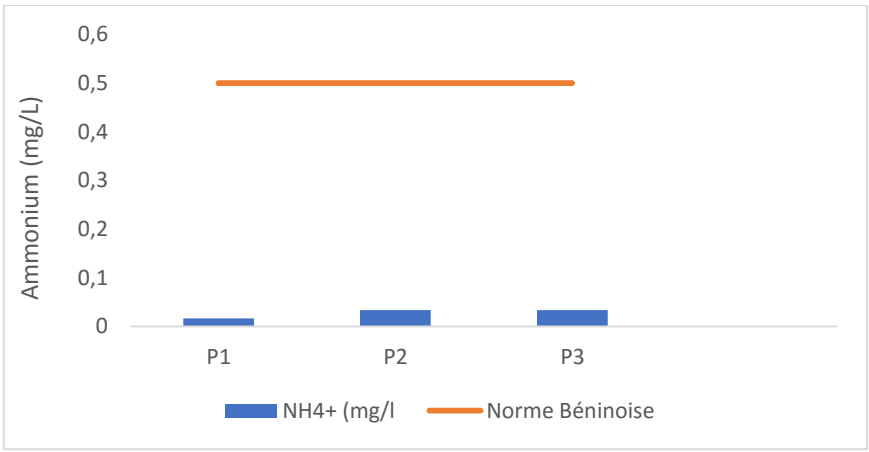


***Figure 25**: Variation de l'Ammonium*

4.1.8. Les métaux lourds

❖ **Fer^{2+}**

Le Fer^{2+} a été dosé au niveau des différentes point d'eau ciblées dans la zone d'étude. Les valeurs du Fer^{2+} varient entre 0,05 et 0,5mg/L avec une moyenne de 0,25mg/L, la plus forte valeur a été obtenue au niveau du P2 (Alasakomè) et est supérieure à la norme (0,3mg/L)

alors le puits de Alasakomè est pollué en Fer et n'est pas recommandé à la consommation humaine. La figure 26 montre la variation de Fer^{2+} au niveau des différents puits

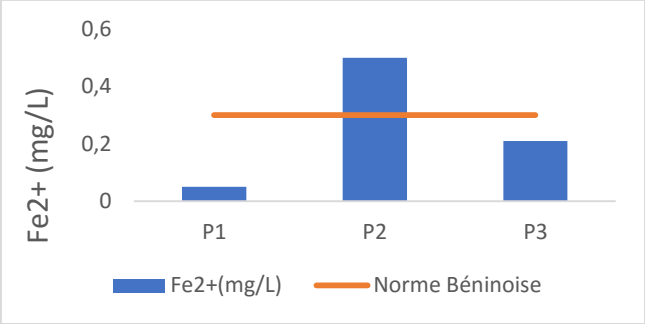


***Figure 26**: Variation de Fer^{2+}*

❖ **Zinc**

Le zinc a été dosé au niveau des différentes point d'eau ciblées dans la zone d'étude. Les valeurs du zinc varient entre 0,16 et 0,89mg/L avec une moyenne de 0,41mg/L. Toutes ces valeurs sont au-dessous de la norme béninoise qui est de 3mg/L donc ces eaux ne sont pas polluées en zinc. La figure 27 présente la variation de zinc au niveau des différents puits

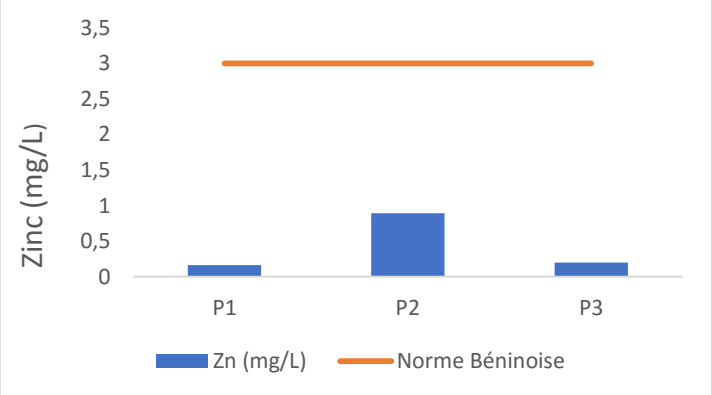


***Figure 27** : Variation de Zinc*

❖ **Plomb**

Le plomb a été dosé dans les échantillons prélevés au niveau des puits ciblés dans l'arrondissement de Hêvié. Les valeurs obtenues varient entre 0,028 et 0,088 mg/L. La plus faible valeur a été obtenue à Houimè (P3) et la plus forte à Alasakomè (P2) avec une moyenne 0,056. Cette forte valeur (0,088 mg/L) détecter à Alasakomè est supérieure à la norme béninoise (0,05mg/L) de même pour la valeur obtenue à Bethesda (P1). Ces puits sont

donc pollués en plomb et ne sont pas recommandés à la consommation humaine. La figure 28 traduit la variation de Plomb au niveau des différents puits

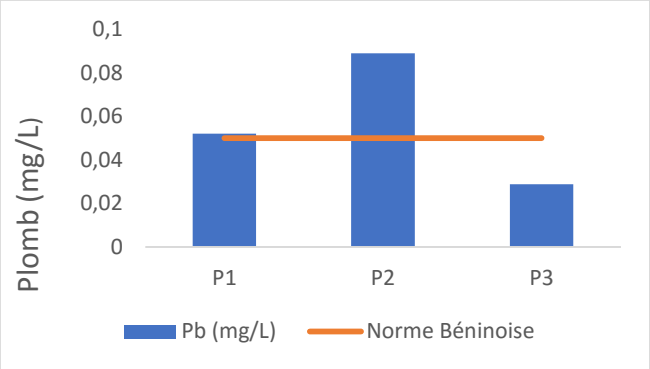


***Figure 28**: Variation de plomb*

❖ Cadmium

Le cadmium a été dosé dans les échantillons prélevés au niveau des puits ciblés dans l'arrondissement de Hêvié. Les valeurs obtenues varient entre 0,01 et 0,03 mg/L. La plus faible valeur a été obtenue à Alasakomè (P2) et la plus forte à Bethasda (P1) avec une moyenne 0,023. Toutes les valeurs sont supérieures à la norme béninoise (0,005mg/L). Ces puits sont donc pollués en cadnuim et ne sont pas recommandés à la consommation humaine. La figure 29 montre la variation de cadmium au niveau des différents puits

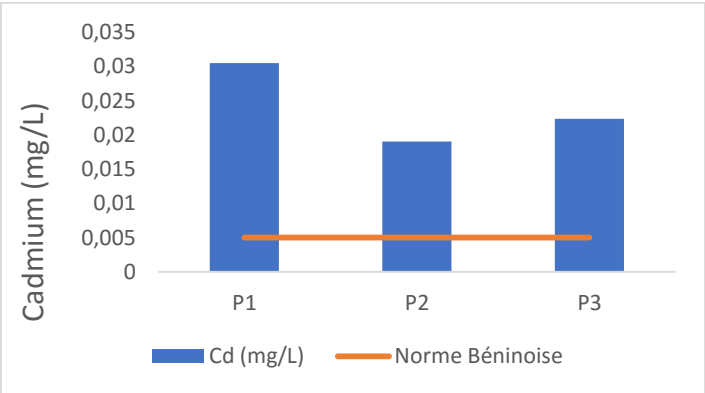


***Figure 29**: Variation de cadmium*

4.2. DISCUSSION

Notre discussion se présente en trois points, nous avons le premier qui concerne les différentes activités qui génèrent des ordures, le second point aborde les caractéristiques physico-chimiques des sédiments et dernier point parlera de la qualité physico-chimique et des métaux lourds des puits environnant la zone d'étude.

A Hêvié et ses environs sont menées des activités comme le commerce, l'agriculture, l'élevage, le lavage des motos et véhicules et surtout les activités domestiques qui sont des sources d'accumulation des déchets. Les déchets provoques une dégradation chronique de la qualité de sol et à long terme pourraient avoir un impact négatif sur la qualité des eaux souterraines. D'après les enquêtes, la majorité de la population de Hêvié n'est pas abonné à la SGDS-GN ce qui fait que les ordures sont retrouvées un peu partout dans l'arrondissement. Grâce à la précipitation, au ruissellement et au lessivage les polluants constitutifs de ces d'ordures de Hêvié migrent verticalement dans le milieu non saturé entre la surface du sol et la nappe, laissant dans son sillage des terrains imprégnés à une concentration proche de la saturation. Les contaminants émis par les industries ou apportés avec les épandages agricoles (boues de station d'épuration, engrais et pesticides) s'accumulent dans le sol et subissent divers processus physiques, chimiques et biologiques, qui peuvent conduire une partie des toxiques à migrer vers les nappes phréatiques ou à s'intégrer à la chaîne alimentaire (Adriano, 1986 ; Berrow et Burridge, 1984 ; McGrath, 1987 ; Tyler et al. 1989). En effet, l'intensité de la pollution des eaux souterraines dépend du type du sol et de la dose en polluants (White, 1986).

Aux vues des analyses des variations des paramètres physico-chimiques sédiments, il est à retenir que la couche argilo-sableuse est extrêmement acide et plus minéralisée du fait de sa capacité de stocké plus d'eau. La présence de l'oxygène dissous et les minéraux qui constituent cette couche fait intervenir des réactions d'oxydo-réduction et des réactions en milieu aqueux pour justifier l'acidité et la minéralisation de cette couche. La variation des paramètres physico-chimiques dépend de la quantité des oxydants (tels que les nitrates, les oxydes de fer et de manganèse et les sulfates) et du type d'oxydant car la quantité de protons consommés lors de leur réduction pourra être différente. Les demi-réactions ainsi que l'expression des potentiels, retrouvés grâce à la relation de Nernst, et associés à ces couples sont (Reddy and DeLaune 2008) :

NO_3^- / NO_2^- : $NO_3^- + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow NO_2^- + H_2O$

NO_2^- / NH_4^+ : $NH_4^+ + 2H_2O \leftrightarrow NO_2^- + 8H^+ + 6e^-$

La réduction du sulfate en sulfure implique le transfert de 8 électrons. Lors de cette réduction l'accepteur d'électrons est le sulfate SO_4^{2-} . Le donneur d'électrons est la matière organique. Les produits réduits obtenus diffèrent selon le pH du milieu.

$$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^- \rightarrow H_2S + 4H_2O$$

Wahid and Kamalam (1993), Suresh (2005) ainsi que Reddy et DeLaune (2008) ont également souligné que la réduction du fer semblait être fixée par l'équilibre Fe $(OH)_3$(amorphe) Fe^{2+}. La demi-réaction bilan peut s'écrire (Reddy and DeLaune 2008 ; Sinica 2012) :

$$F(OH)_3 + e^- + 3H^+ \leftrightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$$

Dans cette couche, l'oxygène, est l'accepteur d'électrons privilégié des micro-organismes. Ces accepteurs d'électrons sont principalement les oxydes d'azote tels que les nitrates, les oxydes de manganèse, les oxydes de fer, les sulfates et le dioxyde de carbone (Reddy and DeLaune 2008). En conséquence, l'oxygène est toujours utilisé en premier lieu par les microorganismes. La demi-réaction de réduction est alors (Ponnamperuma 1972) :

$$O_2 + 4H^+ + 4e- \leftrightarrow 2H_2O.$$

Les échanges gazeux entre l'air et la couche argilo-sableuse sont sévèrement limités, car les pores de cette couche sont remplis d'eau. La diffusion de l'oxygène dans l'eau est environ 10 000 fois plus lente que la diffusion d'O_2 dans l'air. Ainsi dans cette couche, l'oxygène ne peut plus pénétrer assez rapidement pour prendre en charge la demande biologique en oxygène des organismes, nécessaire dans le cadre de leur respiration, en raison du blocage des pores par l'eau. Ce qui justifie la faible variation de l'oxygène dans la couche argilo-sableuse. Les constituants majeurs de cette couche et les oxydants dont dépend la variation des paramètres sont à l'origine de l'augmentation de la conductivité électrique dans la couche argilo-sableuse. Dans cette couche le taux du carbone organique totale est élevé. Ce qui confirme la présence des matières organiques dans cette couche. La couche sableuse est perméable et légèrement acide voir neutre. Elle est moins minéralisée que la couche sablo-argileuse. C'est un sol réduit et traduit des faibles quantités d'oxygènes dissous à la surface. Ce qui peut expliquer l'absence des matières organique dans ce type de sol. La couche sablo-argileuse renferme une faible quantité de l'oxygène dissous. Elle est plus minéralisée que la couche sableuse et moins

minéralisée que la couche argilo-sableuse. C'est un sol modérément réduit et extrêmement acide ; un type de sol qui, dans lequel il y a absence des matières organiques

Les résultats révèlent que le pH est pratiquement acide avec une moyenne de 5,32. La plus faible valeur a été détectée à 13 m de profondeur et s'explique par la lithologie (couche argilo-sableuse) de la ZNS de Hêvié. Ce qui montre que la couche argilo-sableuse présente un caractère acide. D'après Hernot François, les couches argilo-sableuses présentent des atomes de surface à caractère accepteur ou donneur d'électrons. Les sites donneurs vont piéger les accepteurs d'électrons et inversement. Ceci est lié à un caractère acide des couches argilo-sableuses. Les échantillons de sol sont en général acides et donc des sols réduits. Ce qui est en conformité avec les résultats des paramètres physico-chimiques du sol de Landes (d'après Gomez et al., 1982) Cela peut être à l'origine des contaminants d'après Sparks en 2003. Les valeurs de conductivité électrique (moyenne 78,38 µS/cm) obtenues montrent la présence des minéraux dans la ZNS. Les cations sont sous formes d'ions libres dans le sol, mais surtout adsorbés sur des sites d'échange (Sparks and Huang 1985). K^{+}, Ca^{2+} et Mg^{2+} étant fortement attirés par les charges électriques négatives présentes sur les particules d'argile et de la matière organique. Ce qui explique une minéralisation importante dans le sol et précisément au niveau de la couche argilo-sableuse. Les valeurs de potentiel rédox obtenues nous permet d'identifier deux types de sol dans la ZNS de Hêvié. Il s'agit des sols réduits et les sols modérément réduits. Car les valeurs se situent ente -100 à 400 mV/ENH d'après Reddy and DeLaune (2008). De plus nous avons remarqué une relation entre le pH et le Eh. Car les résultats montrent qu'une augmentation du pH est accompagnée d'une diminution du Eh. Cette coévolution souligne le caractère interdépendant du Eh et du pH, dans des réactions impliquant un transfert d'électron mais également un transfert de protons, comme mis en avant lors de l'étude de l'équation du Nernst (van Breemen 1987 ; Bohrerova et al. 2004).

Les microorganismes abaissent le Eh (consommation de l'oxygène) mais possibilité de neutralisation dans le sol. La faible variation de l'oxygène dissous montre que la phase anaérobique est prédominante. En effet, les matières organiques en se dégradant consomment de l'oxygène ce qui fait baisser la quantité d'oxygène dissous. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus pour la ville d'Ouèsse Ouidah au Bénin (Toklo et al. 2016). Les résultats du COT obtenues montre que les couches géologiques contiennent des matières organiques. Plus les matières organiques se décomposent, plus la quantité d'oxygène devient faible. Ce qui fait que à Hêvié la variation de l'oxygène dissous est faible. Cela prouve que le sol de

Hêvié est riche en matière organiques. Nos résultats sont en accord avec ceux de Khattabi et al., 2002 ; Hamza et al., 2016. La variation de COT dans les profils sédimentaires est très irrégulière et semble refléter l'hétérogénéité de la composition lithologique. Les COT, représentent aussi les matières organiques, font parties de ces paramètres caractéristiques d'une contamination (Lisk, 1991 ; Christensen et *al.* 2001).

Les résultats de l'analyse physico-chimique des eaux révèlent que les valeurs de la température de l'eau obtenue varient d'un site à un autre, et sont comprises entre 30 °C et 32,5 °C avec une moyenne de 31 °C. Ces températures élevées s'expliquent par l'influence de la chaleur ambiante sur les eaux prélevées et aussi par les heures d'échantillonnage.

Les valeurs de températures retrouvées dans notre étude sont de même ordre que celles de 30 °C à 32 °C à Brazaville par Moukolo en 1993. Pratiquement, la température de l'eau n'a pas d'incidence directe sur la santé de l'homme (Rodier et *al.* 2009).

Les eaux échantillonnées aux alentours du site présentent un pH très acide (moyenne 5,27). Les échantillons d'eau ne respectent pas la norme (6,5 – 8,5). Les valeurs ainsi trouvées sont compatibles aux résultats de Dovonou et *al* (2018) qui ont démontré que les eaux des puits de Hêvié sont trop acides. De même que les résultats des travaux de licence de Anice POGNON en 2019 sur les eaux de puits de Togba.

Les valeurs de conductivité électrique (moyenne 52,33 µS/cm) et de TDS (moyenne 26 mg/l) obtenues sont conformes aux limites fixées par la norme béninoise (respectivement 2000 µS/cm et < 1000 mg/l). Ces eaux sont donc faiblement minéralisées et par conséquent sont des eaux douces. Les résultats obtenus pour la conductivité sont en accord avec ceux de Dovonou et *al.,* en juillet 2010 qui u ont montré que pendant la période d'étude la plus faible conductivité est enregistrée à Hêvié.

Excepté le P2 (Alasakomè) toutes les valeurs sont supérieures à 5 mg/L en ce qui concerne l'oxygène dissous comme la recommande les directives de l'OMS avec une moyenne de 5,66mg/L. Cela veut dire que les quantités d'oxygène dissous obtenues sont conformes aux recommandations de l'OMS. La faible valeur de la quantité d'oxygène dissous de P2 peut être due au rapprochement de la décharge de Alasakomè donc ce puits est chargé en matière oxydable. Nos résultats sont conformités avec ceux de H. ER-RAIOUI et al en 2011 qui ont montré que les puits proches de la décharge de Province de Larache - Maroc Nord-Occidental

sont chargés en matière oxydable et ceux qui sont éloignés sont peu chargés ce qui explique l'oxygénation des eaux de ces puits.

Les nitrates proviennent de l'oxydation des ammoniums en nitrites puis en nitrates. L'ion nitreux est instable. Il se transforme en nitrates qui sont l'état final de l'oxydation de l'ammonium, nous pouvons observer le phénomène inverse qui consiste en la réduction des nitrates en nitrites puis en ammonium sous l'action des microorganismes. La teneur enregistrée est de 0,86mg/L et est seulement présent dans l'eau de puits d'Alasakomè (P2). Cette teneur est inférieure à la norme admise par l'OMS (1980) qui est de 50 mg/L. La présence de ces ions (nitrite, ammonium, et nitrate) s'explique par la pratique des activités anthropiques dont le maraichage, la culture de maïs et aussi les divers déversements de polluants dont ceux qui produisent et rejette les ordures sont auteurs. La plus forte valeur du chlore est obtenue à Houimè (P3) (6,7mg/L) et la plus faible à Bethesda (P1) (2,2mg/L). Cela signifie que malgré la distance de P1 de la décharge l'eau de ce puits contient des microorganismes.

Les analyses des métaux montrent des eaux chargées en Pb, en Fer, en zinc et en cadmium, ce qui reflète le phénomène de contamination des eaux de ces puits qui sont proche de la décharge donc chargé en contaminants. Tous les quatre (04) métaux lourds ont une teneur élevée dans le puits d'Alasakomè (P2). Cette forte teneur des métaux lourds peut s'expliquée par l'ancienne décharge de Alasakomè . Ceci peut aussi être expliqué par des pratiques agricoles dans la région qui utilisent des fongicides, des herbicides et des insecticides pour la lutte chimique (El Bakouri, 2006). Nos résultats sont aussi en accord avec ceux obtenue par Dovonou et al en 2018 qui ont montré que les eaux des puits de la localité de Hêvié sont polluées par le plomb, et le cadmium. La présence de ces polluants chimiques dans l'eau de cette localité est la conséquence d'une ancienne décharge d'ordure située dans le secteur. En prenant par exemple la concentration en plomb de l'eau de ce puits qui est de 0,088 mg/L, alors que la norme béninoise est de 0,05 mg/L, il y a un problème de pollution de l'eau de ce puits individuel par le plomb. Les effets sur la santé sont connus pour de nombreuses substances chimiques susceptibles d'être présentes dans les eaux. Les individus qui consomment une eau riche en plomb sont exposés au saturnisme (Beauchamp, 2003). Le plomb agit au niveau du système nerveux périphérique en réduisant la vitesse de conduction des nerfs et peut créer des encéphalopathies graves chez l'enfant (Leyral et Vierling, 1997). Toutes les eaux des puits analysées contiennent du Fer à des taux variables entre 0,05 mg/L et

0,5 mg/L. Cette pollution par le Fer dans les eaux de puits serait due aux innombrables décharges sauvages d'ordure du secteur d'étude. Ces valeurs se rapprochent de celles de Azokpota (2005) qui a trouvé des teneurs en fer et plomb de valeurs respectivement de 0,8 mg/L et de 0,16 mg/L dans les eaux des puits des quartiers de Cotonou où se pratique les activités de teinturerie. En effet, l'intensité de la pollution des eaux souterraines dépend du type du sol et de la dose en polluants (White, 1986). C'est le cas de la nappe de Sèmè-Podji et d'autres de la sous-région telle que la nappe de Yembeul au Sénégal qui enregistre de fortes concentrations en polluants chimiques (Edorh ,2010). Ces résultats nous amènent à dire que le mode de gestion des ordures dans l'arrondissement de Hêvié contribue à la pollution chimique de l'aquifère superficiel de Hêvié. Par ailleurs, les différentes hypothèses que nous avons émises au début de nos travaux ont été vérifiées.

CONCLUSION ET SUGGESTIONS

Au terme de cette étude réalisée dans l'arrondissement de Hêvié (commune d'Abomey-Calavi) et portant sur l'évaluation des paramètres physico-chimiques dans la ZNS au-dessous des tas d'ordures et la qualité des eaux des puits environnants, il ressort d'après les résultats que les eaux sont contaminées par des métaux lourds. Cette contamination est due à la mauvaise gestion des ordures. Le niveau de contamination de ces échantillons varie d'un puits à un autre. En effet les eaux analysées sont chargées en métaux lourds ce qui fait qu'elles ne sont pas recommandées pour la consommation humaine sans traitement ; la plus forte charge étant enregistrée à Alasakomè pour tous les quatre (04) métaux dosés. L'origine de ces métaux lourds peut être dû à la décharge située juste à côté de ce puits. La consommation de ces eaux sans traitement expose donc les habitants à plusieurs cas de maladies d'origine hydrique. Dans la zone non saturée, les paramètres varient en fonction de la profondeur et de la lithologie des couches traversées ce qui fait que nous avons distingué deux types de sol : le sol réduit et modérément réduit. La couche argilo-sableuse présente un caractère acide et à une propriété de colmatage pour attirer plus les espèces chimiques. Cette propriété de colmatage la rend plus minéralisée que les autres couches. Les ordures se retrouvant un peu partout dans l'arrondissement de Hêvié, ils se dégradent et produisent du lixiviat qui s'infiltre dans le sol et qui pollue la nappe superficielle. Etant donné que cette nappe affleure à la surface de la terre l'infiltration du lixiviat est rapide. Les eaux consommées sont donc malsaines et pourraient constituer une source de maladie d'origine hydrique. Les résultats de cette étude interpellent tous les acteurs œuvrant pour l'accès à la gestion des ordures et à l'eau potable à intégrer des actions de sensibilisation en matière des ordures, indispensables à la consommation effective d'eau potable dans l'arrondissement de Hêvié. Ainsi pour améliorer l'accès à la gestion des ordures et à une eau de bonne qualité dans l'arrondissement de Hêvié ayant fait l'objet de notre étude, nous formulons les suggestions suivantes. Pour éviter la mauvaise gestion des ordures, plusieurs règles sont à respecter par les habitants de Hêvié. Il est nécessaire de sensibiliser les populations de façon continue sur les règles d'hygiène ; sensibiliser les habitants sur l'utilisation des engrais chimiques afin de réduire les problèmes de pollutions ; organiser une surveillance de la qualité des eaux ne respectant pas les normes au moins une fois par trimestre durant deux années afin de pouvoir prendre une décision ; Créer des centres de collectes où les habitants pourraient jeter les ordures afin de mettre fin aux dépotoirs sauvages. Il faut aussi penser à une amélioration du service de la SGDS-GN en

envisageant une extension du service non seulement sur tout Hêvié mais aussi sur tout le Bénin.

PERSPECTIVES

Il convient alors de poursuivre et d'approfondir les connaissances sur la thématique afin d'apporter davantage de clarté aux résultats. Il conviendra dans la suite des travaux de :

- Etudier les différents processus de transfert de polluant vers la nappe.
- Etudier l'influence de ces paramètres physico-chimiques de la ZNS sur le transfert de polluant vers la nappe superficielle.
- Etudier les conditions de transfert de polluant dans la ZNS.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Adriano DC. 2013. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. Springer Science & Business Media.
2. AFNOR 1987. - Qualité des Sols. Méthodes d'analyse. Recueil de normes françaises. Paris,135p.
3. Anice. Pognon. 2019. Résultats des travaux de Licence : Qualité physico-chimique et bactériologique des puits dans l'arrondissement de Togba.
4. Barrow NJ. 1975. Reactions of fertilizer sulphate in soils. Sulphur Australas Agric.:50–57.
5. Barrow NJ. 1987. The effects of phosphate on zinc sorption by a soil. J Soil Sci. 38:453–459.
6. Bavel D, Martí C. 1974. Plant Ash and Heat Intensity Effects on Chemicaland Physical Properties of Two Contrasting Soils. Arid Land Res Manag.
7. Biaou C.F., 2006. Monographie de Abomey-Calavi. Afrique Conseil, 72p.
8. Biaou C.F., 2006. Monographie de Abomey-Calavi. Afrique Conseil, 72p.
9. Bokou Abdoul-Wassirou. 2022. Résultats des travaux de Master : Etude de la lithologie et des paramètres hydrodynamiques de la zone non saturée (ZNS) du Continental Terminal (CT) des plateaux d'Allada et de Sakété dans le Delta de l'Ouémé.
10. Chouti Waris Y., 2007. Evaluation de la qualité des eaux des puits couverts munis de pompe dans la commune de Porto-Novo, Institut de Mathématique et de Sciences Physiques, Université d'Abomey-Calavi, 15p.
11. Cottes J, Saquet A, Palayret L, Husson O, Beghin R, Allen D, Scheiner J, Cabanes C, Guiresse M. 2019. Effects of soil redox potential (Eh) and pH on growth of sunflower and wheat. Arch Agron Soil Sci. 0:1–15.
12. Cox P., Griffith M., Angles M., Deere D., Ferguson C., 2005. Concentrations of pathogens and indicators in animal feces in the Sydney watershed. *Appl Environ Microbiol*, 71, 5929-5934.
13. Décret – 2001-094 du 20 Février (2001) portant norme de l'eau potable en République du BENIN
14. DeLaune RD, Devai I, Crozier CR, Kelle P. 2002. Sulfate reduction in Louisiana marsh soils of varying salinities. Commun Soil Sci Plant Anal. 33 :79–94
15. DESIRE, 2012 : Etat des lieux de la mobilisation des ressources en eau souterraine dans la commune d'Abomey-Calavi.

16. DG Eau, (2008). Bénin : l'eau potable en milieu rurale, 1page.
17. Edorh A., Gnandi K., Elegbede Manou B., Enonhedo SF., Boko M., (2007). Qualité de l'eau des nappes et son impact sur la santé des populations de Kérou. Clim. Dével. 4 : 27-37.
18. Flavien Edia Dovonou, Clément Balogoun, Mathieu Hounsou, Marlyse Nicoue et Daouda Mama. Rev. Ivoir. Sci. Technol., 31 (2018) 1 - 21 Impact des comportements sur la qualité des eaux de consommation dans la commune d'Abomey-Calavi : cas de l'arrondissement de Hêvié, 21 pages.
19. Flint, A., L., Kwicklis, E., Fabryka-Martin, J., Bodvarsson, G., (2002). Estimating recharge at Yucca Mountain, Nevada, USA : comparaison of methods Hydrogeollogy Journal. (10)., DOI : 10.1007/ 10040-001-0169-1, 180-204.
20. Freeze, R.A. and Cherry, J.A. 1979 Groundwater. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.
21. Gallopin G. C., F. Rijsberman, 2000. THREE GLOBAL WATER SCENARIOS. Int. J. Wat., vol.1.
22. Géraldine Picot, Fabrice Bernard & Nor-Edine Abriak . Caractérisation de la zone non saturée d'une friche industrielle pour modéliser le flux de polluant transitant vers un système fluvial. Revue Européenne de Génie Civil, Volume 9, 2005-Issue 7-8.
23. Hillet, D. (1980), Fundamentals ofsoil physics et processus physiaues. Ed Vander.
24. Horton. 1933. Reduced Phosphorus Compounds in the Environment. Crit Rev Environ Sci Technol.
25. INSAE (1988) : Premier Recensement Général de la Population et de l'Habitat, 1979 ; Population de l'Atlantique : villages et quartier de ville, Cotonou, 1-3.
26. INSAE (1994) : Deuxième Recensement Général de la Population et de l'Habitat, 1992 ; Population de l'Atlantique : villages et quartier de ville, Cotonou, 7-9.
27. INSAE (2004) : Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitat, 2002 ; Cahier des villages et quartier de ville : département de l'Atlantique, Cotonou, 11-14.
28. INSAE (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique), 2016. Effectifs de la population des villages et quartiers de ville du Benin. (RGPH-4, 2013). 17p.
29. J. Rodier, (2009). Analyse de l'eau ; Eaux. Ed. DUNODBORDAS, Paris, 9ème édition.1526pages.

30. Jérémy Jean Guy Cottes. 2019. Le couple Eh/pH du sol. Thèse de Doctorat, Université de TOULOUSE, p. 166-208.
31. Khattabi, H., (2002). Intérêts de l'étude des paramètres hydrogéologiques et hydrobiologiques pour la compréhension du fonctionnement de la station de traitement des lixiviats de la décharge d'ordures ménagères d'Etueffont (Belfort, France). Thèse de doctorat, UFR sciences et techniques, Besançon.
32. Mamadou Sall. 2010. Transfert de nitrate à travers la zone non saturée du sol vers la nappe phréatique de la zone des Niayes : caractérisation et modélisation. Thèse de doctorat r en sciences agronomiques et ingénierie biologique.
33. Mengel K, Kirkby EA. 2001. Principles of Plant Nutrition. 5th ed. Springer Netherlands.
34. Monographie de Abomey-Calavi, *AFRIQUE CONSEIL*, Mars 2006. 16p..
35. Murielle Perronnet. Réactivité des matériaux argileux dans un contexte de corrosion métallique. Application au stockage profond des déchets radioactifs en site argileux. Géologie appliquée. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2004. Français. tel-00007766
36. Pezeshki SR. 2001. Wetland plant responses to soil flooding. Environ Exp Bot. 46 :299–312.
37. Ponnamperuma FN, Tianco EM, Loy T. 1967. Redox equilibria in flooded soils: i. the iron hydroxide systems. Soil Sci. 103:374–382 .
38. Reddy KR, DeLaune RD. 2008. Biogeochemistry of wetlands: science and applications. Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
39. Simmers JR, Bingham FT. 1988. Retention of Boron by Layer Silicates, Sesquoxides, and Soil Materials: II. Sesquioxides 1. Soil Sci Soc Am J. 32:364–369
40. Sogbo E.A., 2013. Dynamique urbaine et insécurité dans la commune d'Abomey-Calavi.
41. Sparks DL. 2003. Environmental soil chemistry. 2nd ed. Amsterdam : Academic Press
42. These Doa. Etat. Université de Nancy, INRA public. 286 p.
43. Trabelsi I., Sellami I., Dhifallah T., Medhioub K., Bousselmi L., Ghrabi A., Coupling of anoxic and aerobic biological treatment of landfill leachate, Desalination. 248 (2009) 185-192.
44. Turlan Tristan. 2018. Les déchets-Collecte Traitement Tri Recyclage.
45. van Breemen N. 1987. Effects of redox processes on soil acidity. Neth J Agr Sci.:271–279.

46. Volkoff B., Willaime P., 1976. Notice explicative n°66. Carte pédologique de reconnaissance de la République populaire du Bénin à 1/200 000. Feuille de Porto-Novo (1). Paris, France, ORSTOM. 39p.
47. Westcott CC. 1978. Ph measurements. Academic Press.
48. White AF, Brantley SL. 1986. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
49. Zektser I. S., L. G. Everett, 2004. Groundwater resources of the world and their use. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP. pp 346.
50. Zogo D., (2016). Analyse des eaux de consommation,50pages

ANNEXE

Tableau 4*: Les coordonnées géographiques des tas d'ordures dans l'arrondissement de Hêvié*

Sites	Latitude	Longitude
Alassakomè1	712415,23	415517,19
Abamè1	713363,922	415394,281
Alassakomè2	712629,834	415218,237
Dandjèto	712341,127	415160,687
Fonkomey	712440,269	415254,034
Hessa	711196,91	416089,009
Daglé	711180,877	416198,245
Adovié	710198,016	416295,433
Banikanni	710159,029	415262,991
Lokodjèmin	710279,973	416478,173
Dogoudo	716926,409	416442,423
Sogan	713840,423	416421,044
Akossavié1	710398,536	416248,493
Akossavié2	715935,797	416133,177
Akossavié3	71495,138	416112,621
Akossavié4	717355,807	416087,106
Houinmin1	710169,15	415317,182
Houinmin2	712555,25	416109,389
Sèzounmè	711562,519	416128,865
Tohounou	711380,579	416461,758
Dodji1	710033,537	417210,021
Abamè2	713655,426	416667,826
Dossèvié1	713471,038	416782,241
Dossèvié2	713245,821	416720,313
Mairie	711312,736	417435,732
Zoungo	712022,264	416760,973
Dodji2	715946,87	419680,193
Dodji3	708109,367	418952,839
Houintoto	708861,077	418988,307
Adoko	719697,349	417805,859
Ahohouènou	716000,002	415877,788

Dossounou	714577,767	417055,923

Tableau 5: *Coordonnées géographique des puits ciblés*

Code	Xcoord	Ycoord
Hèvié-Bethesda (Puit)	414708,26	712462,9
Alasakomè /Hèvié(puits)	415034,01	712589,32
Houimè/Hèvié (Puit)	414744,06	712078,01

Tableau 6 : Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques des sédiments en fonction de la profondeur

Profondeur (m)	p H	CE (µS/cm)	Eh (mV)	O2 (mg/L))	COT (mgC/L)
0	6.76	44	177.9	47.4	0.5018
1	6.42	26	109.3	56.6	0.5707
2	6.23	35	107	51.1	0.1071
3	6.17	59	114.9	53.8	-13.7494
4	6.3	79	93.3	55.9	2.6199
5	6.49	87	193.8	48	11.0829
6	6.26	95	209	49.3	0.0522
7	5.46	110	234.9	47.6	0.3092
8	5.05	109	247.5	48.6	0.0535
9	4.6	122	266.3	49.7	-13.7577
10	4.55	71	255.3	50.2	2.6196
11	4.4	84	264	51.3	11.0906
12	4.44	107	267.1	52.1	2.1389
13	4.13	102	273	51.9	0.3156
14	4.26	95	262.1	51	0.0538
15	4.29	94	254.3	50.8	-0.0044
16	4.18	107	247.8	54.5	-0.2841
17	4.33	105	217.7	50.9	-0.0069
18	5.62	25	102	53.7	-0.0048
19	6.42	44	79.8	54	0.2535
20	5.43	46	145	54.8	0.0536

Tableau 7 *: Comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques sédiments*

Paramètres	Unité	Minimum	Maximum	Moyenne ± Ecart-type
Ph	-	4.13	6.76	5,32 ± 0,95

Oxygène dissous	mg/L	47,4	56.6	51,58 ± 2,69
Conductivité Electrique	µS/cm	25	122	78,38 ± 30,79
Potentiel rédox	Mv	79.8	273	196,28 ± 69,69
COT (mgC/L)	mgC/L	-13.7577	11.0906	0,19 ± 5,66

Tableau 8: Paramètres de terrain et de laboratoire des puits ciblés

Puits	CE	Temp (°C)	TDS	pH	OD	NO3- (mg/l)	NO2- (mg/l)	NH4+ (mg/l	PO43- (mg/l)
P1	35	32,5	17	5,21	5,44	0	0,028415	0,0160582	0,0100214
P2	58	30	29	5,16	4	0,861817	0,048242	0,0329746	0,0100214
P3	64	30,5	32	5,46	7,55	0	0,043836	0,0329746	0,0174428

Tableau 9: Comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques avec les normes

Paramètres	**Unité**	**Norme OMS**	**Normes béninoises**	**Minimum**	**Maximum**	**Moyenne ± Ecart-Type**
CE	µS/cm	25	2000	35	64	52,33 ± 15,30
Temp	(°C)	25		30	32,5	31 ± 1,32
TDS	mg/l	<1000		17	32	26 ± 7,93
pH	-	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	5,16	5,46	5,27 ± 0,16
OD	mg/l	5		4	7,55	5,66 ± 1,78
NO3-	mg/l	45		0	0,86	0,28 ± 0,49
NO2-	mg/l	3,2		0,02	0,04	0,04± 0,01
NH4+	mg/l	0,5		0,01	0,03	0,02 ± 0,00
PO43-	mg/l	0,2		0,01	0,01	0,01 ± 0,00

Tableau 10 : Résultats d'analyse des éléments traces métallique

Métaux / Puits	Fe2+(mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Cd (mg/L)
P1	0,05	0,0521185	0,16	0,0304557
P2	0,5	0,08894594	0,89	0,018989817
P3	0,21	0,0288486	0,2	0,022327937

Tableau 11: Comparaison des moyennes des métaux lourds avec les normes

Métaux lourds	Unité	Norme Béninoise	Minimum	Maximum	Moyenne ± Ecart-Type
Fe2+	mg/L	0,3	0,05	0,5	0,25 ± 0,22
Pb	mg/L	0,05	0,02	0,08	0,05 ± 0,03
Zn	mg/L	3	0,16	0,89	0,41 ± 0,41
Cd	mg/L	0,005	0,01898982	0,0304557	0,02 ± 0,00

Quelques photos de terrain



a : puits proximité d'un tas d'ordure



b : puits d'échantionnage



c : tas d'ordure



d : cylindre pour l'échantillon du sol

Planche 3 *: Quelques photos de terrain (Cliché DOSSOU S., 2022)*