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

Licence Professionnelle en Ecohydrologie

==========

EVALUATION DE L'IMPACT DU BISEAU SALE SUR LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DANS L'ARRONDISSEMENT DE GRAND-POPO

Réalisé et présenté par :

SESSOU Mahougnon Floride Ambroisine

Mention : Excellente

Maître de Mémoire

Dr. YESSOUFOU Arouna

(Enseignant-Chercheur à l'INE)

Maître de stage

M. BOURE SALMANOU Mohamed

(Technicien au LHA)

Année scolaire: 2023-2024

DEDICACE

À mon père SESSOU Gbénou Alain, à ma mère DADJO HOUEGBAN Jéronime pour tous vos efforts consentis à mon égard.

REMERCIEMENTS

C'est pour moi un agréable devoir d'exprimer, au terme de ce travail, ma profonde gratitude à Dieu et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation. Mes sincères remerciements vont à l'endroit de :

- Docteur YESSOUFOU Arouna, mon maître de mémoire, pour son encadrement et sa disponibilité à suivre de près et à distance ce travail ;
- Professeur ALASSANE Abdoukarim, pour sa disponibilité et ses conseils pour enrichir et parfaire mon travail ;
- Professeur DOVONOU Flavien, le chef du département d'Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau (HGRE), pour sa lutte et sa dévotion pour assurer une formation de qualité aux étudiants ;
- Docteur BOUKARI Ousmane, coordonnateur de la formation en écohydrologie, pour tous ses efforts ;
- Monsieur BOURE SALMANOU Mohamed, mon maître de stage, pour son encadrement et sa disponibilité ;
- tous les responsables de la formation professionnelle en hydrologie à l'Institut National de l'Eau (INE) ;
- tous les Honorables membres du Jury qui ont accepté apprécier ce travail ; merci pour le temps que vous sacrifierez au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- tous nos camarades étudiants de la promotion 2021-2022 qui ont œuvré au maintien d'une atmosphère de convivialité entre nous, en particulier à ceux de l'écohydrologie pour tous leur amour, tous leurs soutiens et l'entraide dont nous avons tous fait preuve ;
- nos aînés de la formation professionnelle en hydrologie en l'occurrence KOTO SOUMANOU Soultane, FAYOMI Waris, AGONSANOU Ghislain, GNONLONSA Luc et GUIDI Eustache pour leurs conseils avisés ;
- mon père SESSOU Gbénou Alain pour son amour, pour le goût à l'effort qu'il a suscité en moi de par sa rigueur, pour sa force à garder la tête haute peu importe les difficultés de la vie et sa lutte quotidienne pour assurer un avenir meilleur à ses enfants ;
- ma mère DADJO HOUEGBAN Jéronime pour son amour, son affection, sa bienveillance, sa force, sa présence à mes côtés pour affronter tous les obstacles ;
- mes sœurs SESSOU Aurore, SESSOU Immaculée, SESSOU Christelle, SESSOU Mariane pour leur amour, leurs soutiens et leurs motivations ;

- mes nièces et neveux ;
- mon cher AKPLOGAN Kenneth pour son soutien ;
- Professeur LOKO Frédéric pour ses conseils avisés ;
- monsieur AHOUANDJINOU Charles pour son soutien et ses conseils ;
- toute la famille SESSOU ;
- toute la famille DADJO.

RESUME

Dans les zones littorales, les aquifères d'eaux souterraines d'eau douce sont en contact avec l'eau salée d'origine marine. Cette étude est effectuée dans la partie sud du Bénin dans le département du Mono. Elle a pour objectif l'évaluation de l'impact du biseau salé sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans l'arrondissement de Grand-Popo. Au total, vingt puits ont été échantillonnés dans dix villages. Les enquêtes menées auprès des populations ont permis de relever les principales sources d'eau dans l'arrondissement que sont la SONEB et les puits. Les maladies hydriques telles que la diarrhée, les infections sont celles qui sont souvent observées chez les populations. Les mesures des paramètres in-situ des échantillons d'eau ont révélé des valeurs de température non conformes (28,6°C à 30,2°C) à celle recommandée par l'OMS (inférieure à 25°C), de pH allant de 7,04 à 8,48, de salinité allant de 159 ppm à 1630 ppm et de conductivités allant de 320µS/cm à 3970 µS/cm nettement supérieures à la valeur admise par l'OMS confirmant ainsi, une intrusion saline. Trois ions chimiques ont été analysés : ions chlorures, ions sodium et ions potassium. L'analyse de ces échantillons par spectrophotométrie d'absorption atomique a révélé des teneurs en ions sodium élevées dépassant nettement celle admise par l'OMS (200 mg/L) et en ions potassium des valeurs ne dépassant pas celle recommandée par l'OMS (12 mg/L) exceptée une seule valeur. Par argentimétrie, les teneurs en chlorures ont révélé en général des valeurs au-dessus de celle recommandée par la norme béninoise (250 mg/L) pour l'eau de boisson et à usage domestique. Par ailleurs, une corrélation significative a été constatée entre les ions chlorures et sodium (r=0,84).

Mots-clés : *Impact, biseau salé, eaux souterraines, qualité physico-chimiques Grand-Popo.*

ABSTRACT

In coastal areas, freshwater aquifers are in contact with saltwater of marine origin. Freshwater, which is less dense than saltwater, "floats" on saltwater. This study was carried out in the southern part of Benin, in the Mono department. Its objective is to assess the impact of the saltwater wedge on the physico-chemical quality of groundwater in the Grand-Popo district. Twenty water wells were sampled in ten villages as part of our study. Surveys carried out among the local population revealed the main water sources in the district, namaly the SONEB and wells; water from wells is often used for household activities (laundry, dishes, cooking) and sometimes consumed. Water-borne diseases, such as diarrhea and infections, are commonly observed among the population. Twenty water wells were sampled across ten villages as part of our study. The in situ measurements of the physicochemical parameters of the samples revealed temperature values that did not comply with WHO recommendations (below 25°C), with values ranging from 28.6°C to 30.2°C, pH ranging from 7.04 to 8.48, salinity between 159 ppm and 1630 ppm, and conductivity ranging from 320 µS/cm to 3970 µS/cm, which significantly exceeds the WHO recommended value (2000 µS/cm), confirming saltwater intrusion.Three main ions were analyzed: chloride ions, sodium ions, and potassium ions. Analysis of these samples by atomic absorption spectrophotometry revealed high sodium ion levels well in excess of WHO guidelines (200mg/L), and potassium ion levels within WHO guidelines (12mg/L), with the exception of a single value. Chloride levels measured by silver metering generally exceeded the recommended Beninese standard (250mg/L/) for drinking and domestic water. A significant correlation was also found between chloride and sodium ions (r = 0.84).

Keywords: *Impact, saltwater wedge, groundwater, physicochemical quality, Grand-Popo.*

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

°C : Degré Celsius

µS/cm : Micro Siemens par centimètre

BSC : Bassin Sédimentaire Côtier

INSAE : Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique

LHA : Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

m : Mètre

mg/L : Milligramme par Litre

NQE : Norme de Qualité de l'Eau

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PDC : Plan de Développement Communal

pH : Potentiel d'Hydrogène

Ppm : Partie Par Millions

PSU : Unité Pratique de Salinité

RGPH 3 : Recensement Général de la Population et de l'Habitation.

SIG : Système d'Information Géographique

SONEB : Société Nationale des Eaux du Bénin

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schématisation du biseau salé. (Source : BGRM). 12
Figure 2: Illustration de la coupe schématique du biseau salé perpendiculaire au Littoral selon Ghyben-Herzberg (FRISSANT N. et al., 2005). 14
Figure 3: Carte de localisation de la zone d'étude (Source : OpenStreetmap, data 2023). 16
Figure 4 : Carte pédologique de l'arrondissement de Grand-Popo (Source : OpenStreetmap, data 2023). 17
Figure 5 : Hydrographie de l'arrondissement de Grand-Popo (Source : OpenStreetmap, data 2023 ; réalisée par SESSOU, 2024). 18
Figure 6 : Courbe ombrothermique de la commune de Grand-Popo. (Climate-Data.org). 20
Figure 7: Géologie de l'arrondissement de Grand-Popo (Source : OpenStreetmap, data 2023 ; réalisée par SESSOU, 2024). 21
Figure 8: Carte d'échantillonnage de l'arrondissement de Grand-Popo (Source : OpenStreetmap, data 2023, Travaux de terrain, 2024). 25
Figure 9 : Fréquence des différentes utilisations des sources d'approvisionnement en eau. .. 28
Figure 10 : Fréquence des maladies enregistrées au cours de l'enquête. 29
Figure 11 : Variation des valeurs de température au niveau des points d'échantillonnage. 30
Figure 12 : Variation des valeurs de pH au niveau des points d'échantillonnage. 30
Figure 13 : Variation des valeurs de salinité au niveau des points d'échantillonnage. 31
Figure 14 : Variation des valeurs de conductivité au niveau des points d'échantillonnage. ... 32
Figure 15: Variation des valeurs de chlorures au niveau des points d'échantillonnage. 32
Figure 16 : Carte des teneurs en chlorures des eaux souterraines de l'arrondissement de Grand-Popo. (Source : OpenStreetmap, data 2023, Travaux de terrain, 2024) 33
Figure 17: Variation des valeurs de sodium au niveau des points d'échantillonnage. 34
Figure 18 : Carte des teneurs en sodium des eaux souterraines de l'arrondissement de Grand-Popo. (Source : OpenStreetmap, data 2023, Travaux de terrain, 2024) 34
Figure 19: Variation des valeurs de potassium au niveau des points d'échantillonnage. 35
Figure 20 : Corrélation entre les concentrations d'ions chlorure et sodium dans les eaux de puits échantillonnés. 35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des eaux selon leurs conductivités (Rodier, 2009). 9

Tableau 2: Extrait des normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine en République du Bénin. 10

SOMMAIRE

DEDICACE ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME v

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES vii

LISTE DES FIGURES viii

LISTE DES TABLEAUX ix

SOMMAIRE x

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 6

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION. 28

CONCLUSION ET SUGGESTIONS 40

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 42

ANNEXES 44

Table des matières 48

INTRODUCTION GENERALE

« L'eau est le sang de la terre, la source de vie, essentielle à la survie de tous les êtres vivants » ainsi s'exclamait à raison Vandana Shiva, conférencière, écrivaine et écoféministe dans "*Sacred Waters*" (Chapter 14). La terre porte le nom de planète bleue parce que c'est ainsi qu'elle apparait depuis l'espace du fait que sa surface soit couverte d'eau à 70%. Même si l'eau est abondante, l'eau douce (eaux de surface et eaux souterraines) représente que 2,53% de toute l'eau de la planète et seule cette eau douce soutient la vie terrestre notamment la vie humaine. L'eau douce est donc un bien rare et précieux qui, si elle est contaminée, peut ne plus pouvoir remplir ses différents rôles écologiques (LeFèvre, 2013). Sa disponibilité en quantité et en qualité est un élément indispensable pour prévenir les maladies et améliorer la qualité de vie (Olduro et al, 2007). Les eaux souterraines assurent de nombreuses fonctions écologiques et délivrent plusieurs services aux activités humaines, parmi lesquels la production naturelle d'eau de qualité, la distribution naturelle d'eau sur un territoire et l'alimentation en eau des milieux aquatiques associés. Selon les contextes, elles peuvent également jouer un rôle d'assurance non négligeable contre les risques de sécheresse et de pollution pour l'approvisionnement en eau dans le futur. En France, 7 milliards de m^3/an d'eaux sont prélevées dans les nappes d'eau souterraine dont la moitié pour l'eau potable (Margat, 2000). En 2013, les prélèvements dans les eaux souterraines couvraient environ 68 % des besoins domestiques, 37 % des besoins agricoles d'eau d'irrigation et 38 % des besoins industriels (prélèvements des centrales nucléaires non compris) (CGDD, 2017). Au Bénin, les eaux souterraines constituent la seule source en eau potable donc de boisson de certaines populations car, plus à l'abri des polluants que les eaux de surfaces (Guergazi et *al.*, 2005). Dans les zones côtières, sous des conditions constantes, un état d'équilibre est établi entre l'eau douce et l'eau de mer. Toutefois, sous l'augmentation de la demande en eau causée en partie par la croissance démographique, les eaux souterraines deviennent exposées à la surexploitation et l'équilibre naturel perturbé. Ce qui conduit à une salinité agressive des eaux. L'exploitation d'un aquifère côtier est en général délicate et se heurte à un problème de quantité et qualité (El Mansouri et *al*., 2003). En effet, les changements climatiques accompagnés de rupture de sécheresse prolongées peuvent être à l'origine de la rupture de l'interface eau douce-eau salée entrainant l'avancée de biseau salin (Freeze et *al*.,1979). Ainsi, une forte exploitation entraîne une inversion du gradient hydraulique et par conséquent une augmentation de la salinité (Gaaloul et *al*., 2003). À ce problème de salinité des eaux souterraines, a été émis une hypothèse selon laquelle l'exploitation intensives des nappes côtières rend les risques de la contamination par l'eau de mer plus importants

(Shtivelman 2000, Panteleit 2001, Pulidio 2003). L'intrusion saline de l'eau de mer dans l'aquifère côtier, est un phénomène qui entraine périodiquement la salinisation des eaux souterraines. L'eau de mer, plus dense que l'eau douce, entre naturellement dans les aquifères côtiers jusqu'à une certaine profondeur en fonction de la charge d'eau douce sus-jacente. (Arfib et *al*.,2006). Le phénomène de l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers poreux a été étudié par Ghyben (1889) et Herzberg (1901) à la fin du XIXe siècle sur la base du principe des équilibres hydrostatiques (Bear et *al*.,1999). D'autres facteurs peuvent également contribuer à la salinité des eaux douces, comme la proximité géographique de la nappe du domaine marin et/ou des eaux salées, la géologie de l'aquifère, les changements climatiques et la surexploitation (Abdelhaleem 2007, Bouderbala 2015, Fekrache 2015, Chimouni 2017).

L'augmentation de la salinité des eaux souterraines dans les zones côtières pose un problème périlleux qui est la détérioration de la qualité des eaux. Ces eaux sont polluées à partir de la surface et sont inéluctablement endommagées par l'intrusion d'eau saline ce qui rend leur qualité douteuse. L'arrondissement de Grand-Popo, zone côtière du Bénin n'en est pas épargné. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail de recherche intitulé « Evaluation de l'impact du biseau salé sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans l'arrondissement de Grand-Popo »

PROBLEMATIQUE

JUSTIFICATION

Les zones côtières, sont confrontées à des défis croissants liés à la salinité pour l'approvisionnement en eau potable. C'est le cas de l'arrondissement de Grand-Popo à cause de sa proximité avec l'océan Atlantique. Cette région est vulnérable aux phénomènes d'intrusion saline en raison de l'élévation du niveau de la mer et de l'exploitation excessive des ressources en eau douce. Elle est également un important bassin de production maraîchère. Le maraîchage est une activité économique majeure dans l'arrondissement de Grand-Popo qui nécessite un pompage intensif des eaux souterraines pour l'irrigation des cultures maraichères ce qui, exacerbe le phénomène d'intrusion saline. Ce dernier peut gravement endommager les écosystèmes ou rendre non cultivables les terres agricoles si celles-ci sont irriguées à partir d'aquifères chargés en sel (Longuepée et al., 2007). En effet, l'extraction d'eau douce crée un déséquilibre entre les eaux douces et salées, favorisant ainsi la progression de l'eau de mer vers l'intérieur des terres qui affecte durablement la qualité du stock d'eau douce (Ferrari,2003). Bien que l'impact de l'intrusion saline sur les ressources en eau soit un problème reconnu à l'échelle mondiale, peu d'études ont été menées spécifiquement sur l'arrondissement de Grand-Popo. Il existe donc un besoin urgent de données locales pour mieux comprendre la dynamique de ce phénomène. Comprendre l'impact de cette salinité sur la qualité physico-chimique de l'eau de boisson est important pour évaluer les risques sur la qualité des eaux et sur la santé publique. En examinant les variations de la qualité de l'eau en fonction de la salinité, cette étude peut informer les décideurs sur les mesures à prendre pour garantir un accès durable à une eau potable dans cette région. D'où le choix du thème : **Evaluation de l'impact du biseau salé sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans l'arrondissement de Grand-Popo.**

OBJECTIFS

Objectif général

Evaluer l'impact du biseau salé sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans l'arrondissement de Grand-Popo.

Objectifs spécifiques

Trois objectifs sont fixés pour ce travail :

- caractériser les eaux de puits de l'arrondissement de Grand-Popo sur le plan physico-chimique.

- cartographier la zone d'étude en fonction des points d'eau de fortes teneurs en chlorures et en sodium ;
- évaluer les impacts sanitaires potentiels de la consommation d'eau salée sur la population ;

Hypothèses de recherche

- Les paramètres physico-chimiques tels que la température, la conductivité électrique, la salinité, le pH le chlorure, le sodium et le potassium des eaux souterraines augmentent significativement dans les zones proches du biseau salé ;
- Il existe un lien entre les teneurs en chlorures et en sodium des eaux;
- Les taux de maladies hydriques et de l'hypertension artérielle sont élevés dans l'arrondissement.

CHAPITRE 1 :

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Clarification

1.1. Impact

L'impact est défini comme, toute modification quantitative, qualitative et fonctionnelle, positive ou négative, subie par tout ou une partie d'un système (cible) à la suite d'un choc ou stress externe (d'origine anthropiques, artificielle ou naturelle) et dont la magnitude dépend de la valeur et de la vulnérabilité du système cible (GIEC, 2001)**.** Selon Larousse, l'impact est l'effet produit par quelque chose ; contrecoup, influence. Pour cette étude, un impact est la conséquence directe de la salinité sur l'eau consommée.

1.2. Biseau salé

C'est une partie d'un aquifère côtier envahi par de l'eau salée (marine) comprise entre la base de l'aquifère et une interface eau douce/eau salée ; (aquaportail.com). C'est la forme que prends l'interface entre l'eau douce et l'eau salée, une sorte de coin qui s'avance dans la nappe.

1.3. Qualité physico-chimique de l'eau de boisson

C'est le socle de l'écologie du cours d'eau. Elle sert de support à la vie aquatique. Elle est définie par un grand nombre de paramètres. Ces paramètres sont entre autres : l'oxygène dissout, le pH, la température, la conductivité, la turbidité, etc.

1.4. Eaux souterraines

Ce sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol.

1.5. Puits

Selon Larousse, c'est un grand trou généralement circulaire et doté d'un muraillement, creusé dans la terre pour atteindre la nappe aquifère souterraine (nappe libre ou phréatique)

1.6. Eau de boisson

Encore appelée « eau potable » est une eau que l'on peut boire ou utiliser à des fins domestiques et industrielles sans risque pour la santé. La potabilité des eaux de puits ordinaires, de forages et des eaux de robinets est un facteur déterminant pour la gestion de la qualité de la santé de la population urbaine et rurale.

1.7. Mers

Par opposition aux terres, sont de grandes étendues d'eau salée, qui couvrent la plus grande partie (environ 71%) de la surface terrestre (Wikipédia).

2. Les paramètres de l'eau potable

2.1. Les paramètres organoleptiques

Ces différents caractères doivent être appréciés au moment du prélèvement : certaines odeurs peuvent, par exemple, disparaitre pendant le transport, ou l'aspect de l'échantillon se modifier au cours du stockage

- **L'odeur**

Une eau destinée à l'alimentation doit être inodore en effet, toute odeur est un signe de pollution, il est peut-être défini comme : L'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles. La qualité de cette sensation particulière provoquée chacune de ces substances **(Rodier *et al.*, 1996).**

- **La couleur**

La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. Les colleurs réels et apparents sont approximativement identiques dans l'eau claire et les eaux de faible turbidité **(Rodier *et al.*, 1996).**

- **La saveur :**

Le goût n'a aucun appareil pour le mesurer. C'est un ensemble des sensations gustatives, olfactives et de sensibilité chimique communes perçues l'aliment ou la boisson set dans la bouche selon les physiologistes, il existe trois saveurs principales :

➢ Le salé,

➢ Le sucré,

➢ L'amer.

La saveur peut être définie comme : L'ensemble des sensations perçues à la suite de la stimulation, par certaines substances solubles des bougeons gustatifs. La qualité de cette sensation particulière provoquée par ces substances.

2.2. Les paramètres physico-chimiques :

2.2.1. La température (T°) :

C'est une caractéristique physique importante, elle joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la détermination du pH pour la connaissance de l'origine de l'eau des mélanges éventuels. Sa mesure est nécessaire pour accéder à la détermination du champ de densité et des courants. D'une façon générale, la température des eaux superficielles est influencée par la température de l'air et ceci d'autant plus que leur origine est moins profonde **(Hamed *et al.*, 2012).**

2.2.2. Le potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH (potentiel hydrogène) mesure la concentration en ion H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 10. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteur multiple, dont l'origine de l'eau. Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un ph –mètre ou par coloration **(Haslay *et al.*, 1993).** : le pH est relatif à la concentration des ions hydrogène dans le milieu, donc l'acidité du milieu. Cette notion a été introduite par Sorensen en 1909 qui l'avait défini comme le cologarithme décimal de la concentration en ions hydronium. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, dont la température et l'origine de l'eau, il représente une indication importante en ce qui concerne l'agressivité de l'eau (aptitude à dissoudre le calcaire). Les valeurs du potentiel Hydrogène se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles (Chapman et al., 1996).

2.2.3. La conductivité électrique :

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1cm elle est l'inverse de la résistivité électrique l'unité de conductivité est le micro siemens sur centimètre (µS/cm) **(Desjardins, 1990).** Elle définit le degré de minéralisation de l'eau et donc l'aptitude de l'eau à conduire le courant électrique. La minéralisation de l'eau est donnée par 08 ions majeurs : le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium, le sulfate, le chlorure, le carbonate et le bicarbonate. Les contrastes de conductivité mesurés sur un milieu permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélange ou d'infiltration. Elle sert d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau (Pescod, 1985 ; Rodier, 1984). Elle augmente avec la teneur en sels dissous et elle dépend aussi de la température. Elle s'exprime usuellement en micro siemens par centimètre (µS /cm) (SELHI et SMAIL, 2004).

Le tableau 1 traduit la classification des eaux en fonction de la conductivité de la manière suivante selon Rodier, 2009.

Tableau 1: Classification des eaux selon leurs conductivités (Rodier, 2009).

Conductivités électriques des eaux (µS/cm)	Minéralisation
Égale à 0,05	Eau déminéralisée
10 à 80	Eau de pluie
80 à 100	Eau peu minéralisée
300 à 500	Eau moyennement minéralisée
1000 à 3000	Eau saumâtre
Supérieure à 3000	Eau salée

2.2.4. Ions Chlorures (Cl^-) :

Les origines possibles de cet élément dans les eaux souterraines sont : dissolution du Chlorure de Sodium (NaCl) des roches évaporitiques, l'intrusion d'eau de mer et une origine anthropique (engrais organiques et inorganiques) (Debieche, 2002, Rodier et *al.*, 2009). L'OMS recommande pour la teneur en chlorures dans l'eau destinée à la consommation humaine une valeur guide de 250 mg/L pour des considérations gustatives et des risques de corrosion (RODIER et *al.*, 2009). Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations variables ils peuvent avoir plusieurs origines :

- Percolation à travers des terrains salés.
- Infiltration d'eaux marines dans les nappes phréatiques.
- Activités humaines et industrielles.

Les normes béninoises préconisent pour les chlorures une concentration maximale acceptable de 250mg/l.

2.2.5. Sodium (Na^+) :

Le sodium est un élément très abondant sur terre, notamment dans l'eau de mer sous forme de chlorure de sodium. L'origine de cet élément est liée principalement au lessivage des dépôts

évaporitiques (l'halite, NaCl), des phénomènes d'évaporation, et de l'eau de mer (Appelo et POSTAMA, 1996). Il se trouve dans la majorité des eaux souterraines et de surface (Potelon et al., 1998). Il joue un rôle essentiel dans le fonctionnement normal des nerfs et muscles. La norme de potabilité de l'OMS est de 200 mg/l pour le sodium (OMS, 2008).

2.2.6. Ions Potassium (K^+)

Le potassium est l'élément chimique de numéro atomique 19, de symbole K (du latin kalium). Ses propriétés chimiques sont voisines de celles du sodium. Sur terre et dans les autres corps rocheux, il est généralement lié à d'autres éléments au sein de nombreux minéraux. Il est présent dans l'eau de mer à une teneur d'environ 0,4 g/kg d'eau, sous la forme d'ions libres. Sa teneur en potassium dans les eaux naturelles est de l'ordre de 10 à 15 mg/L. À cette concentration, le potassium ne présente pas d'inconvénients pour la santé des individus. Le seuil de perception gustative est variable suivant le consommateur, se situe aux environs de 40 mg /L pour les chlorures de potassium. (Desjardins R., 1990)

3. Normes de potabilité des eaux en République du Bénin

La norme de potabilité des eaux de consommation est représentée par un chiffre qui fixe la limite supérieure ou inférieure à ne pas dépasser et à respecter pour un paramètre. En République du Bénin, l'eau destinée à la consommation doit respecter certaines normes, ces normes sont présentées dans le tableau. L'eau destinée à la consommation humaine et aux usages domestiques est soumise à des normes, physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques, afin de protéger la population des effets indésirables liés à la permanence de polluants physiques, chimiques microbiens et radioactifs dans les eaux de consommation (Décret nº 2001-094 fixant les normes de qualité de l'eau potable en République de Bénin).

Tableau 2: Extrait des normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine en République du Bénin. (Source : Décret n°2001-94 du 20 février 2001 fixant les normes de qualité de l'eau potable en République du Bénin)

Paramètres	Unités	Valeurs maximales permises
pH	-	6,5<pH<8,5
Chlorures	mg/L	250mg/L

4. Contamination de l'eau douce par l'eau de la mer

L'intrusion d'eau de mer peut exister dans des couches aquifères d'eau douce à cause des processus normaux ou aux activités humaines. Elle est provoquée par des diminutions des niveaux des eaux souterraines ou par des élévations des niveaux d'eau de mer. Quand on pompe de l'eau douce, on abaisse le niveau piézométrique dans la couche aquifère formant ainsi un cône de dépression (Capaccioni, B., et *al.*, 2005).

L'eau salée s'élève de 12 m tous les 0,3 m de dépression d'eau douce et forme un cône d'ascension. Les deux liquides miscibles se trouvent ainsi séparés par une zone qui est souvent assimilée à une interface limitant un biseau d'eau salée dont la pente est inclinée vers le continent, cette interface correspond à la zone de diffusion (Driscoli, F.C, 1984). L'intrusion peut affecter non seulement la qualité de l'eau aux niveaux du pompage du puits, mais aussi d'autre puits et d'autres parties non exploitées du bassin aquifère. Le pompage de l'eau douce entraîne la création normale d'un cône de dépression à la surface de la nappe phréatique. En réaction à ce cône de dépression, il se forme un cône inverse pour rééquilibrer les masses de densités différentes (Custodio, E. et al., G.A, 1987). Avec un abaissement du niveau phréatique, un puits qui, pendant un certain temps a pompé de l'eau douce peut subitement se mettre à pomper de l'eau salée.

En effet, des concentrations élevées en chlorure peuvent rendre l'eau non buvable et non utilisable pour beaucoup d'usages industriels, mais les problèmes relatifs à la santé humaine n'ont pas été encore assez soigneusement observés. Cependant, des concentrations élevées en sodium peuvent contribuer à certaines maladies du cœur ou à des problèmes d'hypertension, en particulier chez les individus fragiles. Une concentration élevée en chlorure peut avoir de mauvais effets sur l'environnement : elle peut produire une brûlure des feuilles et même la défoliation des feuilles dans les récoltes sensibles ; dans les lacs, elle peut augmenter la présence des métaux dans les eaux et empêcher la distribution de l'oxygène et des aliments et ainsi, nuire à la vie aquatique (Appelo,1993)

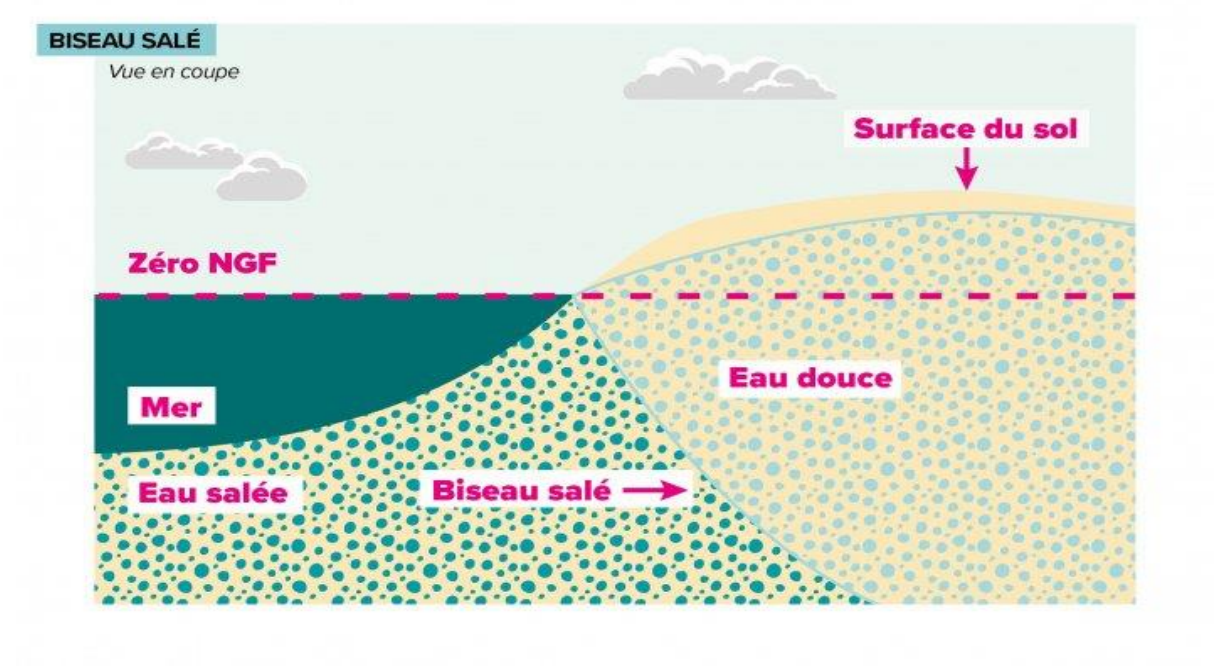


Figure 1: Schématisation du biseau salé. (Source : BGRM, 2009).

5. Approche hydrostatique de Ghyben-Herzberg

Ce principe propose une relation simple pour déterminer la forme et la position théorique du biseau salé à partir des densités et des pressions relatives.

Les hypothèses permettant d'appliquer cette formule sont les suivantes (Frissant *et al., 2005*)

- ✓ les deux fluides ne sont pas miscibles ;
- ✓ les deux fluides sont en équilibre hydrostatique dans un milieu homogène et poreux dans un aquifère unique ;
- ✓ leur contact est supposé être représenté par une interface nette.

Sur une ligne horizontale AA' (figure 2), l'égalité de pressions de l'eau salée et de l'eau douce s'écrit :

$$H.d_s = (H + h).d$$

Avec :

ds :*la masse volumique de l'eau salée*

d :*la masse volumique de l'eau douce*

h *:la hauteur d'eau douce au-dessus du niveau de la mer en un point A =Niveau piézométrie*

H :la profondeur de l'interface par rapport au Niveau zéro de la mer ;

Si d est égal à 1 on a :

$$H.(d_s - 1) = h$$

et

$$H = \frac{h}{ds - 1}$$

La masse volumique de l'eau varie en fonction de sa salinité. Pour une concentration équivalente de NaCl de 36 g/L, elle est égale à 1,025 kg/L (*FRISSANT et al*, 2005). Cette valeur représente la moyenne de salinité des mers et des océans.

Ainsi pour $d_s = 1,025$ on a :

$$\boldsymbol{H = \frac{h}{0,025} = 40h}$$

Cela signifie qu'en un point quelconque de la nappe, l'interface eau douce eau salée se situe sous le niveau de la mer à une profondeur égale à 40 fois l'élévation du niveau de la nappe au-dessus du niveau de la mer.

Cette méthode a pour avantage d'apporter des ordres de grandeur sur la profondeur à laquelle se trouve l'interface eau douce/eau salée à partir des seules données piézométriques. Son utilisation est utile pour localiser rapidement les zones susceptibles d'être vulnérables aux intrusions salines. Cependant, si elles donnent une première approximation de la position du biseau salé, les hypothèses de Ghyben-Herzberg ne sont pas réalistes pour les raisons suivantes :

- les fluides, l'eau douce et l'eau salée, sont miscibles ;
- ces fluides sont soumis à des mouvements hydrodynamiques ;
- les écoulements de la nappe ne sont pas pris en compte ;
- Et un aquifère est rarement homogène et unique.

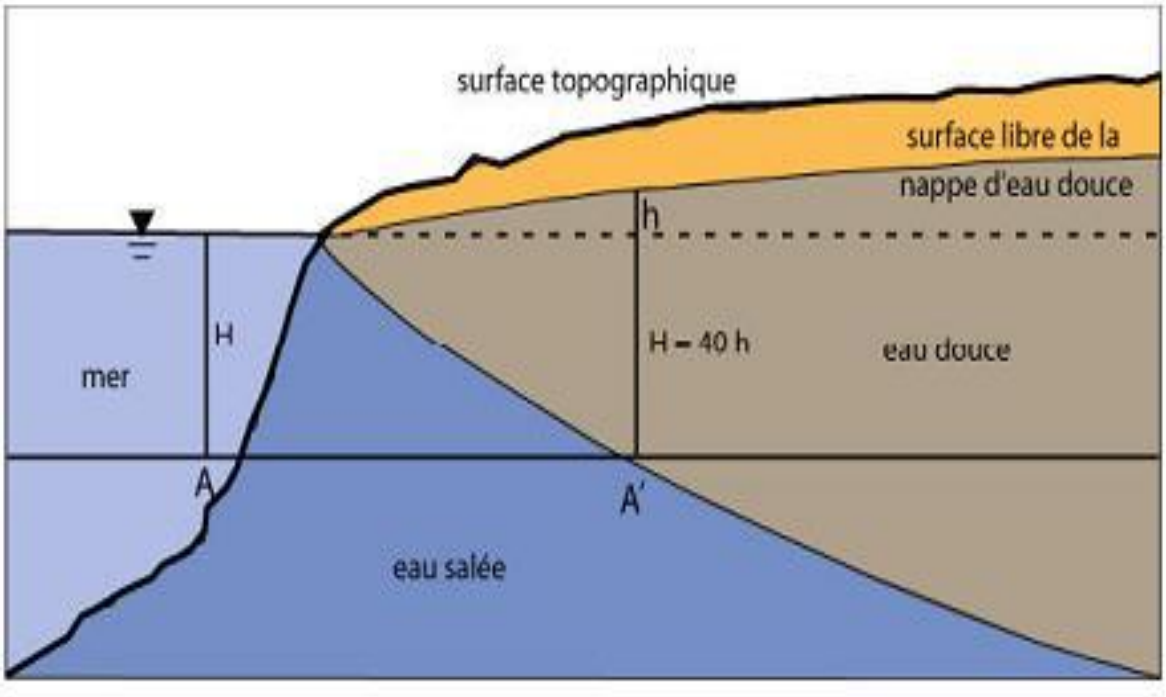


Figure 2: Illustration de la coupe schématique du biseau salé perpendiculaire au Littoral selon Ghyben-Herzberg (FRISSANT et al., 2005).

Au Bénin, les études antérieures dans le BSC ont montré que la formule de Ghyben-Herzberg permet de situer, à partir de la côte de l'eau dans les puits des sables littoraux (0,5 et 3 m en moyenne au-dessus du niveau moyen de la mer), la base du contact eau douce-eau salée entre 31 et 81 m (GEOHYDRAULIQUE, 1985).

CHAPITRE 2 :

CADRE D'ETUDE, MATERIEL ET METHODOLOGIE

CHAPITRE 2 : CADRE D'ETUDE, MATERIEL ET METHODOLOGIE.

2.1. CADRE D'ETUDE

2.1.1. Situation géographique

La présente étude s'est déroulée au Bénin dans la commune de Grand-Popo et plus précisément dans l'arrondissement de Grand- Popo qui est situé entre 6°15' et 6°20' de latitude Nord et 1°46' et 1°55' de longitude Est (Figure 3).

S'étendant sur une superficie de 289 km², la commune de Grand-Popo est limitée au Nord par les Communes d'Athiémé, de Comè et de Houéyogbé, au Sud par l'Océan Atlantique, au Sud-Ouest par les Communes de Ouidah et de Kpomassè et à l'Ouest par la République du Togo. (Figure 1). Elle a une densité moyenne de population d'environ 199 habitants/km² (INSAE, RGPH4, 2013). Elle compte sept (07) arrondissements dont Grand-Popo qui compte à son tour onze (11) villages : Agonnèkanmey, Akodessewa, Apoutagbo, Ewé-Condji, Hêvê, Houndjohoundji, Hounssoukoè, Onkuihoué, Saligato, Toklanhon et Yodo-Condji.

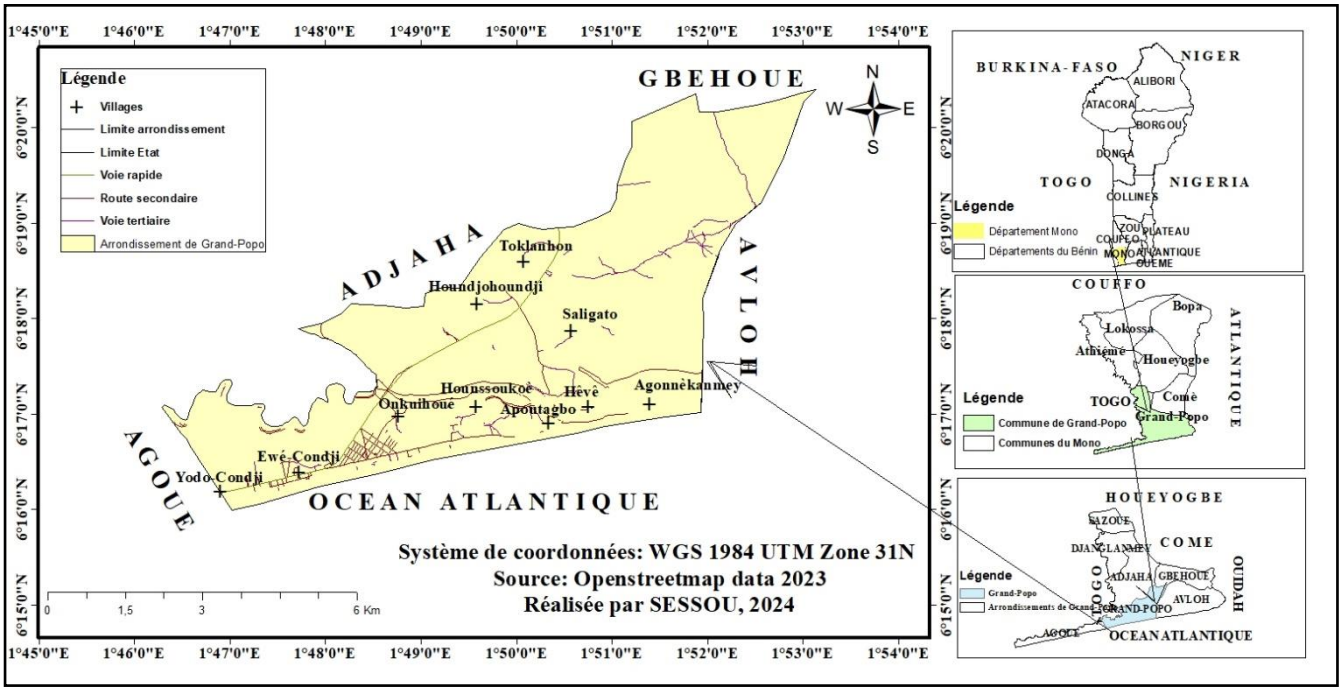


Figure 3: Carte de localisation de la zone d'étude (Source : OpenStreetmap, data 2023).

2.1.2. Aspect pédologique et végétation

Dans la commune de Grand- Popo, on distingue trois types de sols, correspondants aux trois grands ensembles de relief. Dans l'arrondissement de Grand-Popo, les sols du Littoral et des cordons dunaires sont sablonneux, constitués de sables fins, pauvres en matière organique et très perméables et où dominent les alluvions sableuses bien drainés. On trouve sur ces sols une végétation de *Cocos nucifera* (cocotiers).

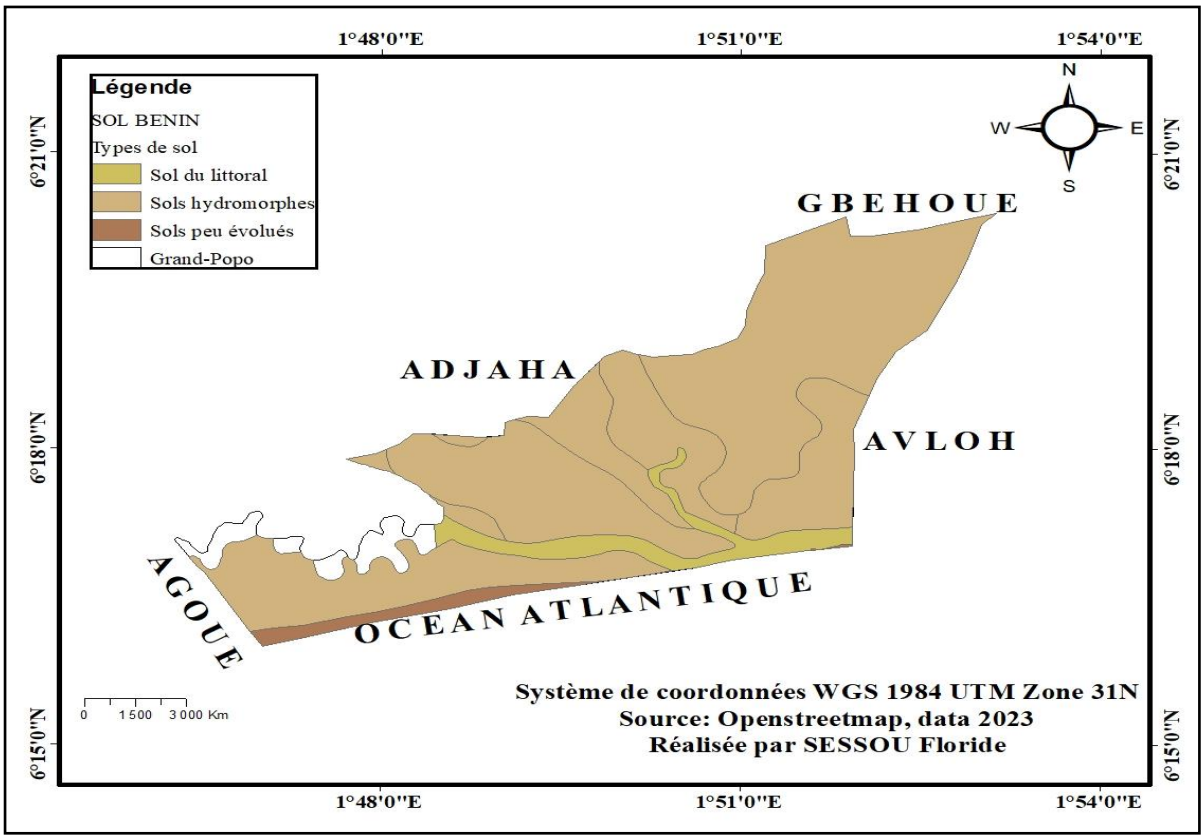


Figure 4 *:* Carte pédologique de l'arrondissement de Grand-Popo (Source : OpenStreetmap, data 2023).

2.1.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la Commune de Grand-Popo tout comme celui de l'arrondissement est localement important, cela comporte le fleuve Mono et une série d'affluents et d'effluents parmi lesquels on peut citer la Sazué, la lagune de Grand-Popo, le chenal d'Aho ainsi que des marais et les marécages. Ces cours d'eau ont tous un régime pluvial, tropical en rapport avec le régime de pluie et la durée de saturation des terrains qu'ils traversent.

a) **Le fleuve Mono** : d'une longueur d'environ 527km, il prend sa source dans les monts Alédjo dans l'Atacora au nord du Bénin et coule dans sa partie supérieure au Togo avant de constituer dans sa partie inférieure la frontière naturelle entre le Bénin et le Togo à partir d'Aplahoué sur une longueur de 100 km avant de se jeter dans la mer par la bouche du Roy. Il a un régime tropical très irrégulier avec de grandes variations inter annuelles et connaît une crue généralement située entre juin - octobre. Ceci s'explique par le fait que le cours d'eau reçoit en même temps, dans son cours supérieur, les eaux de la grande saison des pluies ainsi que celles de la petite saison dans son cours inférieur. Cette concentration des eaux en rapport avec les pentes entraîne les inondations à Grand-Popo. Il faut noter que la

mise en service du barrage de Nangbéto a modifié ce régime. Le fleuve se jette dans l'océan Atlantique par un large delta appelé "Bouche du Roy" au niveau du village Avloh plage ***(SDAC,2004).***

b) **La lagune de Grand-Popo** : à partir du village d'Agbanankin, le fleuve Mono communique avec la lagune de Grand-Popo. D'une longueur de 15 km environ, cette dernière communique de façon régulière avec celle de Ouidah à l'est et le Mono à l'ouest. Sur son parcours vers l'est, à la hauteur du village de Djondji, elle débouche dans le chenal Aho, exutoire du lac Ahémé sur 10 km environ. Le régime de la lagune de Grand-Popo est fortement influencé par celui du fleuve Mono surtout en période des crues entre juin-octobre.

c) **La rivière Sazué** : la Sazué est un défluent du fleuve Mono. D'une longueur de 35 km, elle coule parallèlement à ce dernier depuis la région de Zounhouè jusqu'à leur confluent à Hêvê. La Sazué est entièrement située dans le delta inférieur du Mono. Depuis la construction du barrage de Nangbéto, ce cours d'eau a vu ses caractères physico-chimiques modifiés.

d) **Les marais et les marécages** : ils occupent une grande partie de la commune de Grand-Popo. Ces marais et marécages sont limités au nord par le plateau de Comè, au sud par la lagune côtière, à l'ouest par le chenal d'Aho. Ce sont des milieux amphibiens, inondables en période de pluie et indispensables dans le système de reproduction des poissons.

e) Enfin, l'Océan Atlantique sur la façade sud de la commune.

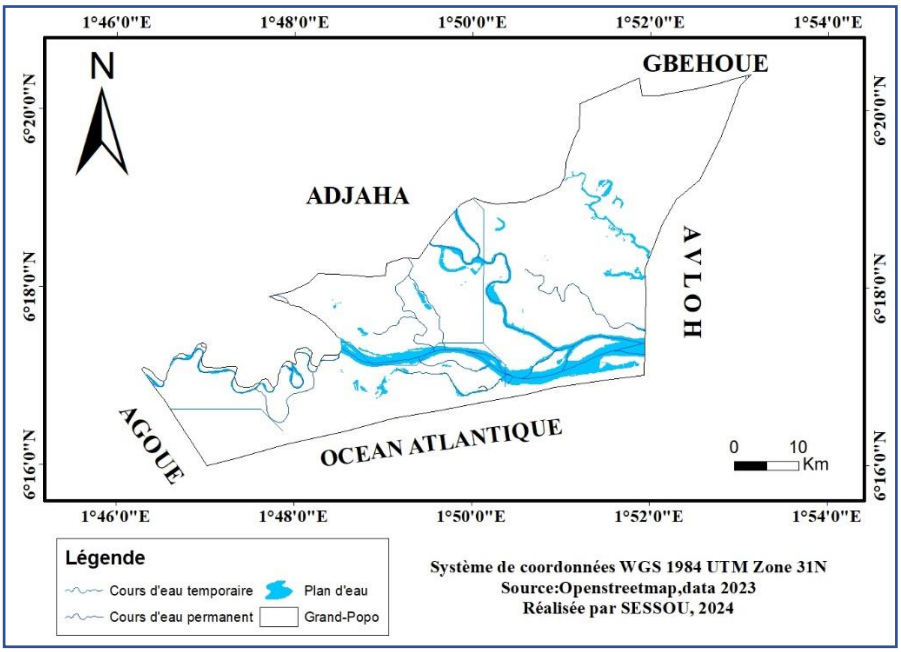


Figure 5 : Hydrographie de l'arrondissement de Grand-Popo (Source : OpenStreetmap, data 2023 ; réalisée par SESSOU, 2024).

2.1.4. Faune

En ce qui concerne la faune, elle est constituée de mammifères, de reptiles et d'oiseaux. Cette faune est menacée et devient de plus en plus rare par suite de la destruction de leur habitat. Les mammifères les plus couramment rencontrés sont Hippotamus amphibius (hippopotame), le sitatunga ou antilope des marais, le Guib harnaché ou antilopes des galeries forestières, les céphalophes, les potamochères, les aulacodes, espèces très communes, les rats de Gambie etc. Trois catégories de reptiles ont été identifiées : ce sont les crocodiles et les varans, les tortues et les serpents. Ils font l'objet depuis une décennie de capture, et de commercialisation (vers le Togo) et de grande consommation. Cette activité aurait pour conséquence la prolifération des rongeurs. En ce qui est de la faune aviaire, elle est très riche en raison de l'existence de nombreuses zones humides. On y rencontre des canards d'eau ; des hérons ; des queleas ; des éperviers ; des francolins ***(PDC, 2005).***

2.1.5. Climat

La commune de Grand-Popo tout comme l'arrondissement de Grand-Popo jouit d'un climat subéquatorial de type Guinéen caractérisé par quatre (04) saisons plus ou moins marquées :

- une grande saison sèche de mi-novembre à mi-mars ;
- une grande saison de pluies de mi-mars à mi-juillet ;
- une petite saison sèche de mi-juillet à mi-septembre et
- une petite saison de pluies de mi-septembre à mi-novembre.

Les précipitations ont lieu principalement entre mars et juillet avec un maximum en juin. Elles se répartissent en moyenne sur 80 à 120 jours. Sur la décennie 90, la hauteur annuelle moyenne de pluies était de l'ordre de 900 mm à Grand Popo avec des minima à 730 mm et des maximas à 1145 mm. Du fait de l'influence maritime, les températures se caractérisent par des variations (diurne et annuelle) peu marquées. Les écarts thermiques annuels, en général très atténués sont de l'ordre de 2°C à 6°C environ. Les températures maximales les plus élevées sont relevées en mars (34°C) tandis que les températures les plus basses sont observées en Août (23°C). L'humidité relative est forte et varie entre 70% et 90% du fait de la proximité de la mer. Pendant l'été, (décembre à mars), l'alizé continental (ou harmattan) qui est un vent sec et chaud de secteur nord-est souffle à une vitesse de 2 à 3 m/s tandis que pendant l'hivernage (Avril à novembre), règne un régime de mousson avec l'alizé maritime venant de l'océan qui souffle à une vitesse dépassant parfois 20 m/s.

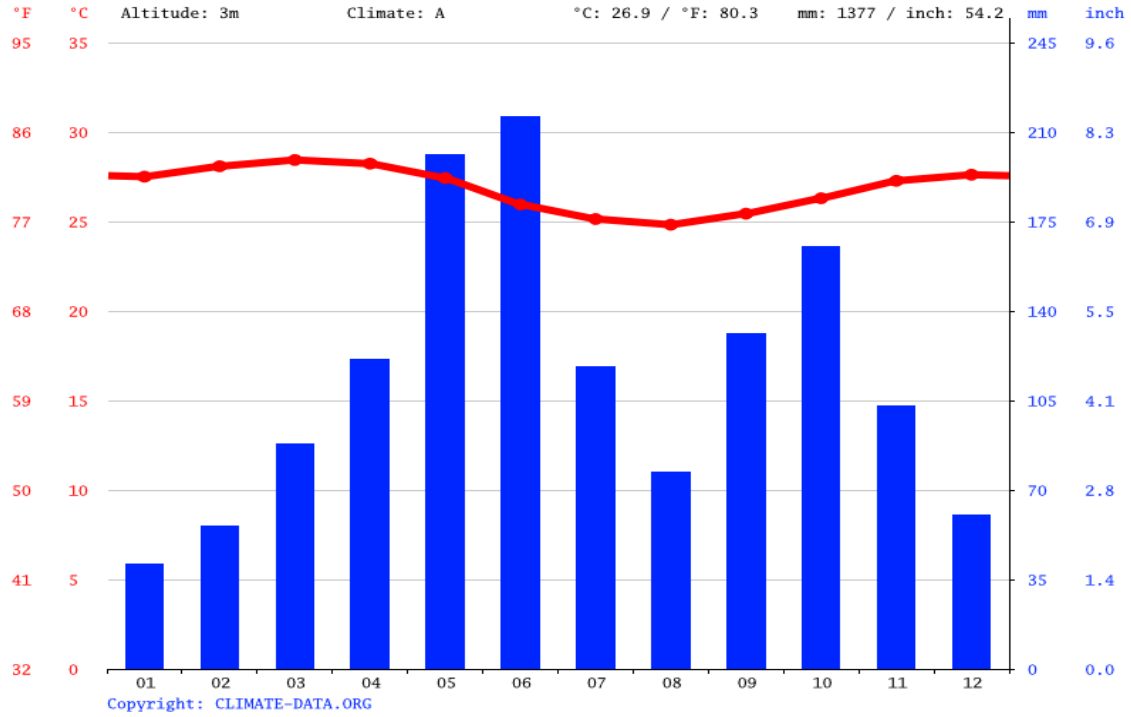


Figure 6 **:** Courbe ombrothermique de la commune de Grand-Popo. (Climate-Data.org).

2.1.6. Géologie

La commune de Grand-Popo appartient à l'âge géologique appelé « le quartenaire ». On distingue dans la zone d'étude (figure 7) quatre principaux groupes géologiques constitués de plusieurs niveaux lithologiques. Il s'agit de :

- dépôts alluvionnaires composés de sables, d'argile avec gravier subordonné et des niveaux charbonneux récents situés au Nord de la commune dans les arrondissements de Sazué et de Djanglanmè ;
- dépôts tidaux et lagunaires récents constitués de sables, d'argile et de niveaux charbonneux qui couvrent une grande partie des arrondissements de Adjaha, de Avlo, Gbèhoué, Grand-Popo et Agoué ;
- dépôts de cordon littoral anciens composés de sables jaune et ocre que l'on remarque à l'Est dans les localités comme Gbéhoué-Ouatchi, Gbéhoué-Pédah, (Arrondissement de Gbèhoué) et
- dépôts de cordon littoral récents constitués de sables blancs et gris que l'on retrouve dans les arrondissements d'Agoué, de Grand-popo et d'Avlo en particulier dans les villages de Azévi-condji, Gninhountimè, Matékpo, Hilacondji, etc.

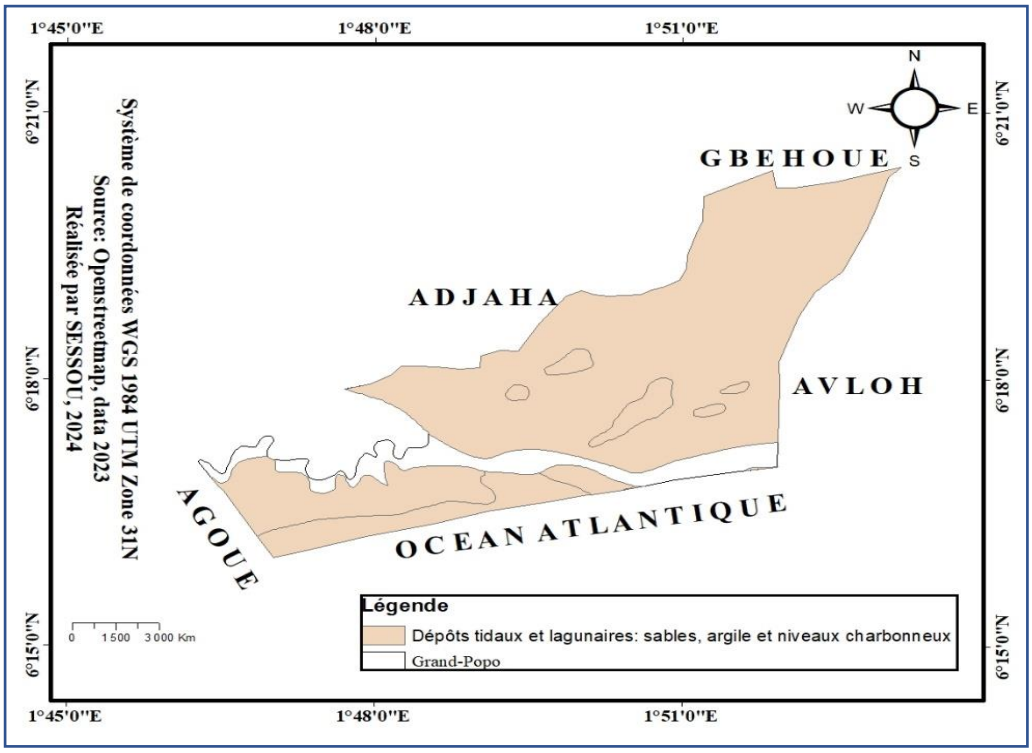


Figure 7: Géologie de l'arrondissement de Grand-Popo (Source : OpenStreetmap, data 2023 ; réalisée par SESSOU, 2024).

2.1.7. Socio-économie

Selon le RGPH3, la population de la commune de Grand Popo en 2002 est estimée à 40 335 habitants dont 19 254 hommes (48%) et 21081 femmes (52%). En 2013, la population comptait environ 57636 (INSAE, Juin, 2015). Le taux de croissance moyen de la population entre 1992 et 2002 est de 2**%.** Ce taux relativement faible peut s'expliquer par l'importance des mouvements migratoires en défaveur de Grand Popo. Les arrondissements d'Agoué et de Grand-Popo sont les plus peuplés et totalisent à eux deux 45% de la population totale de la commune. Les arrondissements les moins peuplés sont Avlo (8%) et Sazué (8%). En 2002, 55% de la population est rurale. Celle-ci est répartie dans les arrondissements ruraux (Adjaha, Avloh, Gbèhoué, Djanglamey, Sazué). La population de Grand-Popo est majoritairement jeune : 42,7% est âgée de 0-14 ans et 17,6% âgée de 6-11 ans. La population active (15-59 ans) représente 47,6% de la population. La population âgée de 6-14 ans est estimée à 13 767 enfants (soit 25,36%) et celle âgée de 6-11 ans, est estimée à 9 554 enfants. En utilisant les résultats des projections 2002-2030, la population de 5-14 ans atteindra 15 732 enfants.

L'historique du peuplement de Grand Popo tourne d'abord autour de ses groupes ethniques majoritaires que sont les Xwla et les Xuéla et les Guens ou Mina. Ces trois groupes ethniques

dérivèrent du grand groupe ethnique ADJA qui, chassé de la vallée du Nil s'installa, après une grande migration d'abord à Tado (Togo) au 13è et 14è siècle puis à Aplahoué au Bénin au 15è siècle. Les Xwla ou Popo se rencontrent un peu partout dans la commune mais surtout à l'Ouest de Grand-Popo et dans les zones lagunaires : ils représentent plus de 51 % de la population de la commune. Les xuéla ou Pédah se retrouvent davantage dans le Nord-Est de la Commune sur la bande de terre sablonneuse de Gbèhoué. Les Guens ou Mina se retrouvent surtout sur le littoral de la Commune principalement à Agoué et à Grand-Popo. Les autres ethnies sont les Ouatchis qui occupent le Nord et le Centre de la commune, les Kotafons que l'on retrouve au Nord-Est de la commune de Hamlangni à Gnito et les Aïzos qui occupent la bordure du fleuve mono, de Koutonkondji jusqu'au Sud de Vodomey. Aïzo et Kotafon de Djanglanmey s'adonnent surtout aux cultures saisonnières dans les bas-fonds. Enfin, le long du littoral, on retrouve diverses minorités ethniques venues du Ghana pour pratiquer la pêche maritime et un peu partout des Haoussa, des Yorubas et des Peulhs qui dominent surtout les activités d'élevage de bovins à l'ombre des cocotiers.

2.2. MATERIEL

Pour atteindre les objectifs fixés, le matériel suivant a été utilisé dans notre étude. Il s'agit de :

- un GPS (Un smartphone de marque Redmi Xiaomi, sur lequel était installé l'application Locus Map) pour relever les coordonnées géographiques des points de mesure ;
- un appareil photo nous a été utile pour la prise d'image sur le terrain ;
- un cahier pour noter les mesures prises ;
- un stylo et un ruban adhésif pour l'étiquetage des échantillons prélevés ;
- un multiparamètre de marque LAQUA ;
- une voiture qui a servi de moyen de transport pour aller de localité en localité ;
- des bouteilles en plastiques neuves de 1,5L pour prélever les échantillons d'eau à analyser ;
- une glacière pour conserver les échantillons d'eau, pour les matériels de terrain.

Les paramètres tels que le pH, la température, la conductivité électrique et la salinité ont été mesurés sur le terrain.



Photo 1 : Multi-paramètre de marque LAQUA.

Source : (Cliché, SESSOU, 2024)

Et de :

- verrerie de laboratoire (bécher, burette, erlenmeyer) ;
- les échantillons d'eau prélevée ;
- des solutions pour pouvoir doser et déterminer les paramètres recherchés ;
- de l'eau distillée ;
- une blouse, pour les analyses chimiques au laboratoire.

Pour le traitement des données collectées sur le terrain, des logiciels ont été utilisés notamment : le logiciel ArcGIS pour la réalisation des cartes, la projection des points de mesures. Excel 2016 pour le traitement statistique des données et la réalisation des courbes temporelles, Word 2016 a été utilisé pour le traitement de texte.

2.3. METHODOLOGIE

L'évaluation de l'impact du biseau salé sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans l'arrondissement de Grand-Popo suivra une méthodologie répartie en plusieurs étapes.

2.3.1. Recherche documentaire

Avant toute activité, nous avons jugé utile de prendre connaissance des travaux effectués sur la commune de Grand-Popo en général, les phénomènes de salinité ainsi que tous travaux ayant

rapport avec le sujet de la présente étude. Ces recherches documentaires ont servi de base pour la mise en place de la démarche suivi pour atteindre les différents objectifs fixés. Plusieurs sites internet et plusieurs documents ont été consultés à cet effet.

2.3.2. Collecte de données

À ce niveau, il s'agissait de regrouper les données dont nous avions réellement besoin pour mener à bien notre travail. À cette fin, nous avons effectué en premier lieu, une enquête sur le terrain (Annexe) à l'aide d'un questionnaire contenant les principales informations concernant l'exploitation des eaux souterraines. Et en second lieu, une campagne d'échantillonnage le 12 septembre 2024. Au total, Vingt (20) puits traditionnels ont été échantillonnés tout en prenant les coordonnées géographiques de chaque point de mesure.

- **Echantillonnage des eaux de puits**

C'est l'étape la plus importante de notre recherche car elle nous a permis de prélever quelques échantillons dans le but d'effectuer des analyses adaptées pour enrichir notre travail. Au total vingt (20) échantillons d'eau de puits ont été prélevés à raison de deux (02) échantillons au plus par village dans l'arrondissement de Grand-Popo en respectant la méthode de prélèvement des eaux souterraines dans un puits. Chaque échantillon est prélevé dans des bouteilles stériles de 1,5L à l'aide d'une puisette. Sur chacune de ces bouteilles il est collé une étiquette renseignant sur : le numéro, l'heure de prélèvement, la date, le lieu, les coordonnées géographiques. Cette fiche est remplie au niveau de chaque prélèvement. Ensuite chacun de ces échantillons est précieusement conservé dans une glacière et transporté le plus tôt possible au laboratoire pour les analyses dès la fin de la campagne. Les différents paramètres tels que le pH, la température, la conductivité électrique et la salinité ont été mesurés à l'aide d'un multi-paramètre sur le terrain. La figure 8 illustre la position des différents points d'eau échantillonnés.

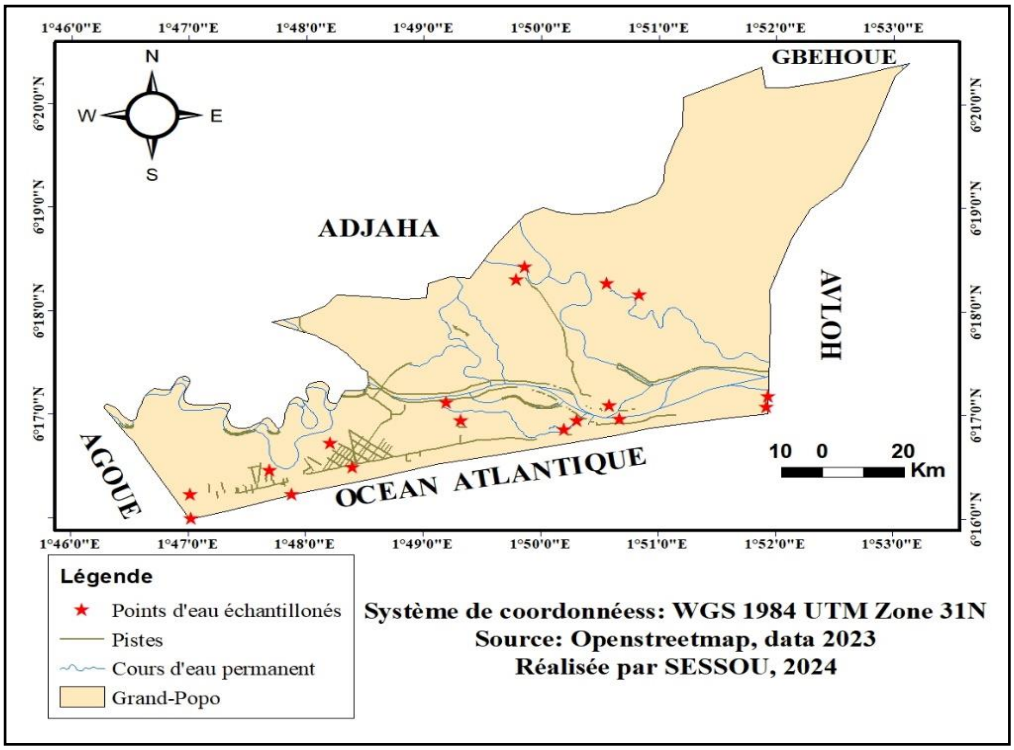


Figure 8: Carte d'échantillonnage de l'arrondissement de Grand-Popo (Source : OpenStreetmap, data 2023, Travaux de terrain, 2024).



Photo1 : Prélèvement d'échantillons

Source : (Cliché, SESSOU, septembre 2024)

- **Méthodologie d'analyse**

Dans cette évaluation de l'impact du biseau salé sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines, en plus de la mesure de la température, du pH, de la conductivité et de la salinité de tous les puits, la réalisation de certaines analyses chimiques qui sont en relation directe avec la minéralisation des eaux souterraines est importante pour ces puits représentatifs pour établir

l'impact. Ces analyses ont été effectuées dans le Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) à l'Institut National de l'Eau (INE).

L'analyse chimique des échantillons comporte le dosage des cations et anions majeurs des eaux souterraines (Cl^-, Na^+ et K^+), les analyses ont été effectuées conformément au protocole du laboratoire :

- Les ions chlorures (Cl^-) sont analysés par argentimétrie.

Procédé du dosage :

- prélever 5ml de l'échantillon à analyser à l'aide d'une pipette
- ajouter 5 gouttes de chromate de potassium (K_2CrO_4) : obtention d'une coloration jaunâtre.
- titrer avec la solution de nitrate d'argent ($AgNO_3$ à 0,01N) jusqu'à l'obtention d'une coloration brun rougeâtre. (Ayad, 2017)

- Les ions (Na^+ et K^+) sont analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique.

Il s'agit de la nébulisation de l'échantillon dans la flamme d'un spectrophotomètre d'absorption atomique. La mesure d'absorbance du sodium se fait à 589nm et celle du potassium à 766,5nm.

La détermination de la teneur de l'élément dosé est faite par la méthode directe à l'aide d'une courbe d'étalonnage (Rodier et al, 2009).

2.3.3. Traitement des données

Toutes les données rassemblées lors de la collecte sont traitées en fonction du résultat que nous recherchons. Cette étape a consisté notamment à la réalisation des graphes de variations de la température, du pH, de la conductivité, de la salinité et du potassium ; des cartes de spatialisation des valeurs, de chlorure et de sodium mesurées. Pour ce faire, plusieurs méthodes et programmes ont été utilisés. Il s'agit notamment des logiciels spécifiques comme ArcGIS et Excel 2016.

CHAPITRE 3 :
RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.

Ce dernier chapitre sera entièrement consacré à la présentation des différents résultats obtenus lors de notre étude.

3.1. RESULTATS

3.1.1. Résultats des enquêtes

- **Sources d'approvisionnement et usages**

La figure 8 ci-dessous présente la fréquence de l'usage des sources d'approvisionnement en eau. Les enquêtes menées dans l'arrondissement de Grand-Popo ont permis d'identifier deux sources d'approvisionnement en eau potable : la SONEB et les puits traditionnels. Sur 40 ménages enquêtés, les habitants de l'arrondissement de Grand-Popo font différents usages de l'eau des sources d'approvisionnements. De la figure ci-dessous, on remarque que l'eau de la SONEB est la principale source d'approvisionnement en eau de boisson (77,50%). Elle n'est pas du tout utilisée pour la lessive et la vaisselle (0%) quant aux eaux des puits, elles sont utilisées fréquemment pour les usages domestiques : bain (87,50%), cuisine (82,50%), lessive (100%), toilette (90%) et la vaisselle (100%). Mais soulignons que parfois, ces eaux de puits sont utilisées comme eau de boisson dans quelques parties de l'arrondissement en cas de coupure de l'eau de SONEB (22,50%) et aussi à cause de la faible couverture de l'arrondissement par la SONEB.

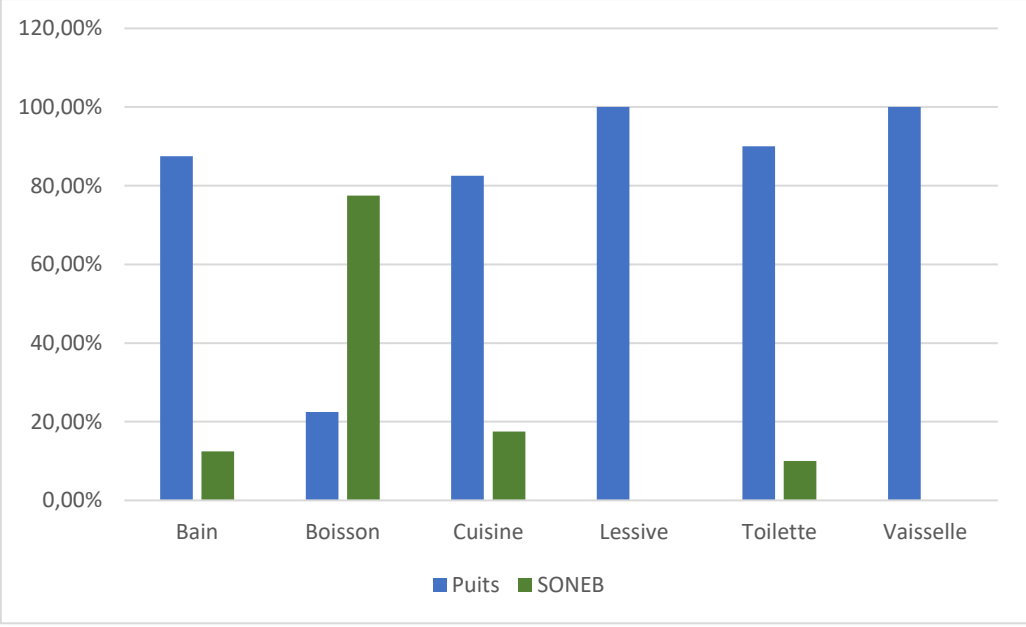


Figure 9 : Fréquence des différentes utilisations des sources d'approvisionnement en eau.

- **Répartition du taux d'apparition des maladies par catégorie d'âges.**

La figure 9 présente la répartition du taux d'apparition des maladies par catégorie de personnes dans l'arrondissement de Grand-Popo. De l'analyse de cette figure, il ressort que chez les enfants, la diarrhée se manifeste plus fréquemment (36,66%) que chez les adultes (28,33%) et les personnes âgées (16,66%). Par ailleurs, les infections s'enregistrent uniquement chez les adultes notamment chez les femmes (21,66%). En ce qui concerne l'hypertension artérielle, elle n'est pas trop fréquente dans les valeurs enregistrées (3,33% chez les personnes âgées) bien qu'elle soit une principale conséquence directe sur le plan de la santé de la consommation d'eau salée (The American Journal of Medicine, 88(4), S52-S57).

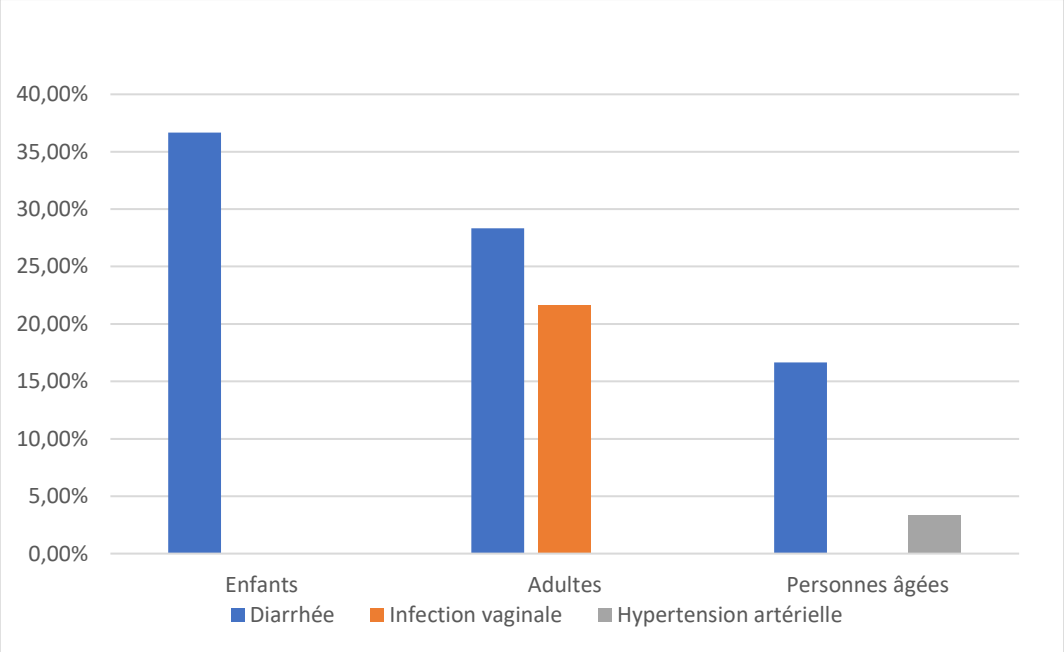


Figure 10 : Fréquence des maladies enregistrées au cours de l'enquête.

3.1.2. Résultats des analyses physico-chimiques

- **Température**

La température de l'eau est un facteur écologique entraînant d'importantes répercutions écologiques (Leynaud, 1968). La température idéale de l'eau est comprise entre 6° et 12°C (Degbey, 2011). On observe dans notre zone d'étude des valeurs de température qui oscillent entre 28,6°C et 30,2°C (Figure 10) avec une moyenne de 29,39°C.

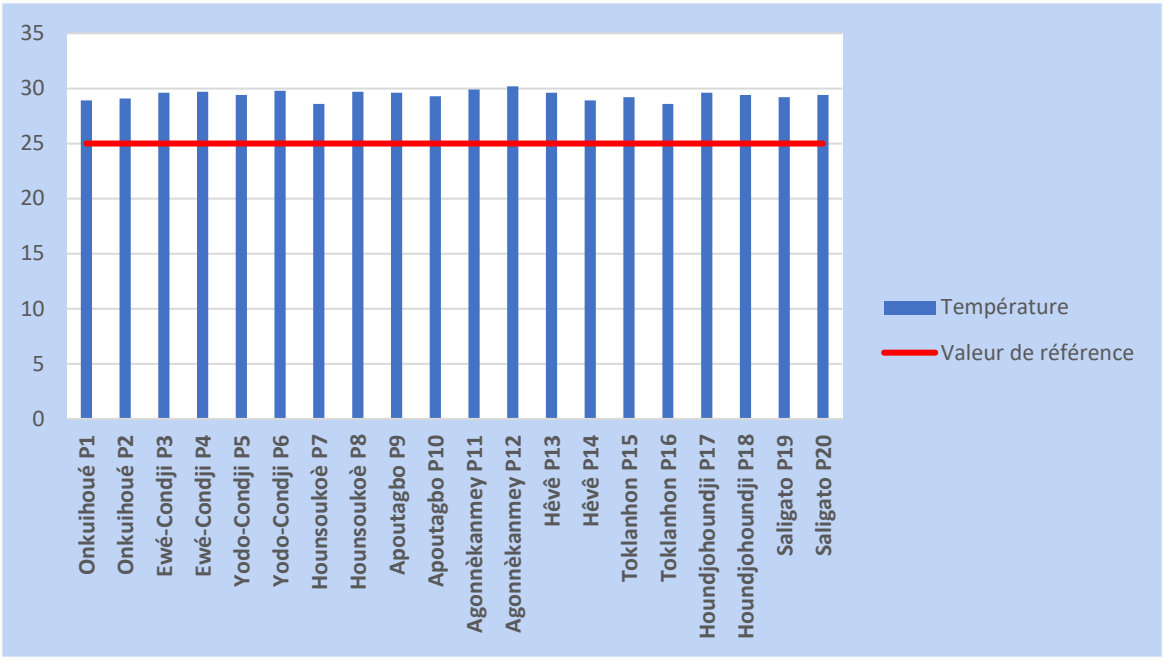


Figure 11 : Variation des valeurs de température au niveau des points d'échantillonnage.

- **pH**

La figure 11 présente la variation du pH. L'analyse de cette figure révèle que la valeur minimale du pH est de 7,04 relevée sur le point P15 à Toklanhon et la valeur maximale est de 8,48 relevée sur le point P11 à Agonnèkanmey avec une valeur moyenne de 7,57.

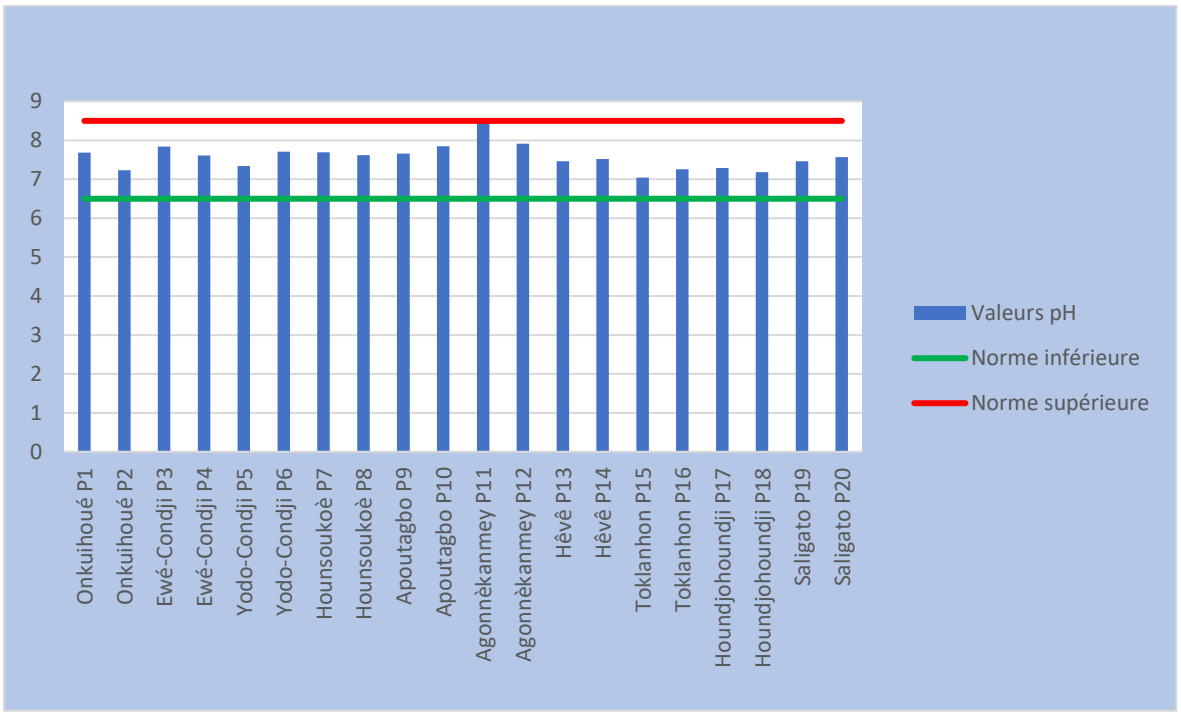


Figure 12 : Variation des valeurs de pH au niveau des points d'échantillonnage.

- **Salinité**

La figure 12 présente la variation de la salinité. On note que les valeurs de salinité enregistrées oscillent entre 159ppm et 1630 ppm avec une valeur moyenne de 737,85 ppm. La plus faible valeur est mesurée au point P11 à Agonnèkanmey tandis que la plus forte est obtenue au point P18 à Houndjohoundji.

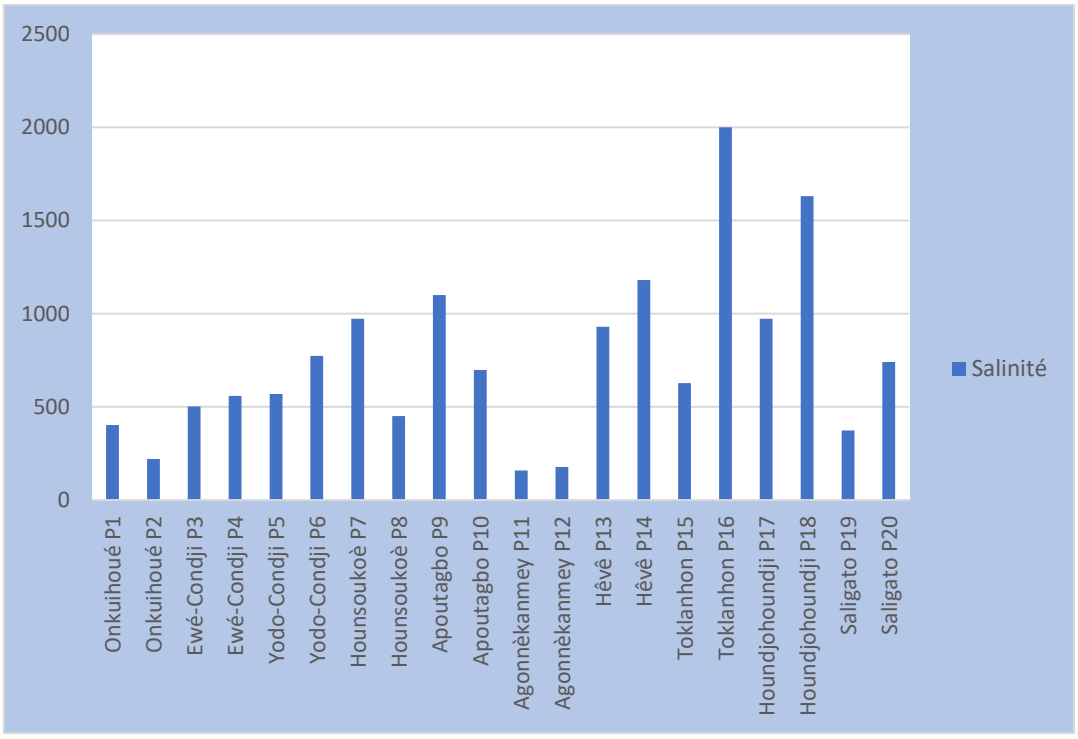


Figure 13 : Variation des valeurs de salinité au niveau des points d'échantillonnage.

- **Conductivité électrique**

La figure 13 présente la variation de la conductivité. On note que les valeurs de conductivités électriques enregistrées sont variables de 320 µS/cm au point P11 à Agonnèkanmey à 3970 µS/cm au point P16 à Toklanhon avec une valeur moyenne de 1404 µS/cm. Les résultats montrent que, bien que 70% des puits échantillonnés présentent une conductivité électrique inférieure aux normes OMS, des fortes valeurs de conductivités sont enregistrées au niveau de certains puits.

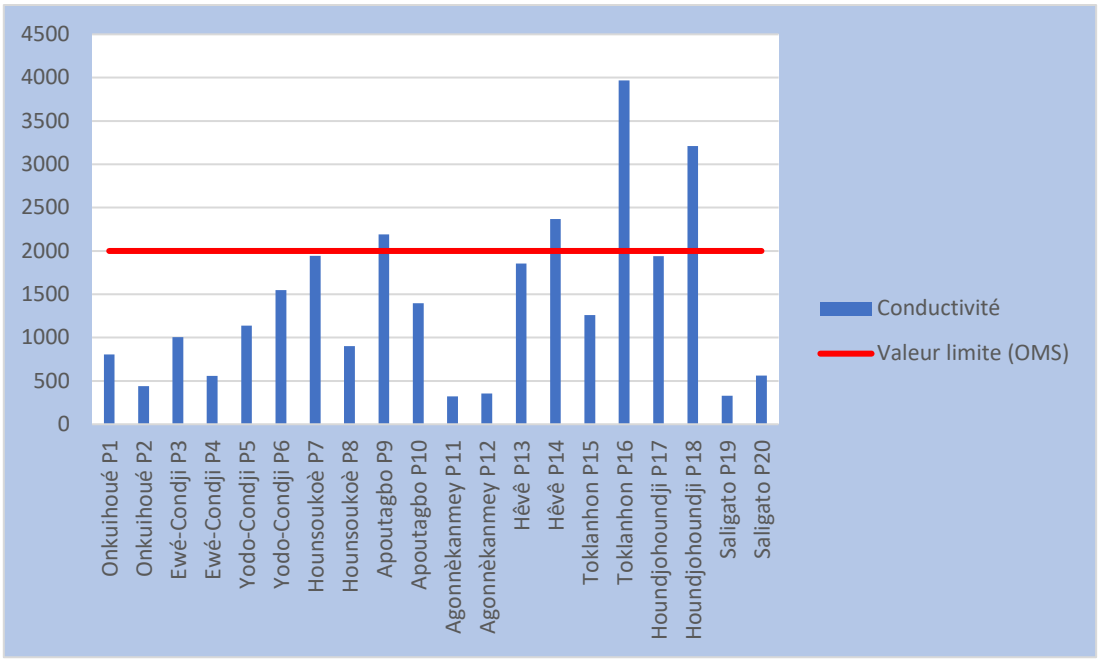


Figure 14 : Variation des valeurs de conductivité au niveau des points d'échantillonnage.

- **Chlorures**

La figure 14 présente la variation du chlorure. Les concentrations en chlorures obtenues au niveau des différents points varient entre 38,34mg/L et 1160,44 mg/L avec une valeur moyenne de 316,53 mg/L. La plus forte valeur est relevée au point P16 dans la localité de Toklanhon tandis que la plus faible valeur est relevée au point P12 dans la localité d'Agonnèkanmey.

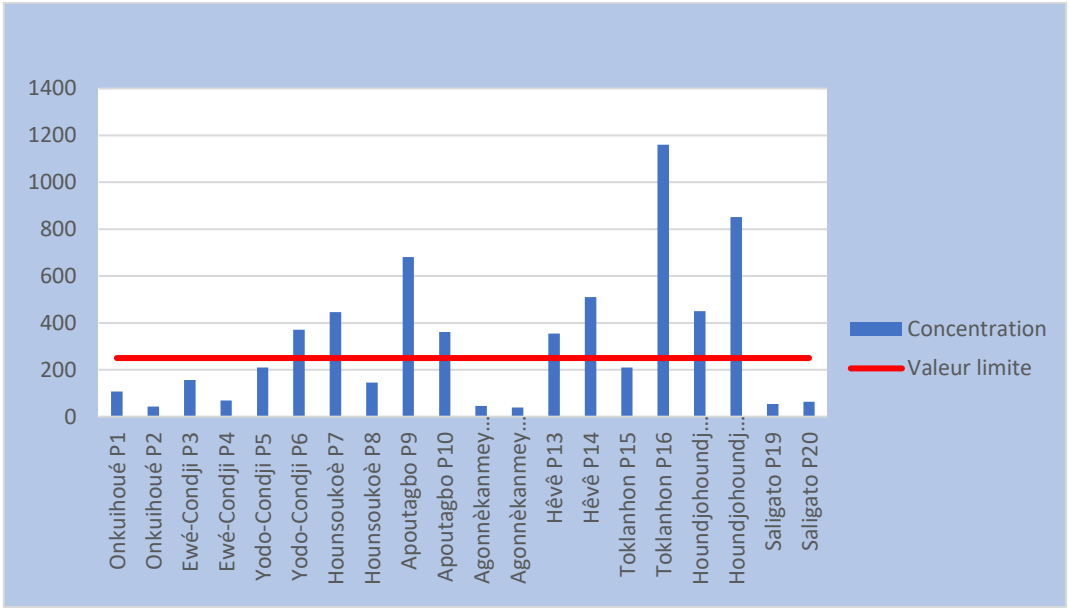


Figure 15: Variation des valeurs de chlorures au niveau des points d'échantillonnage.

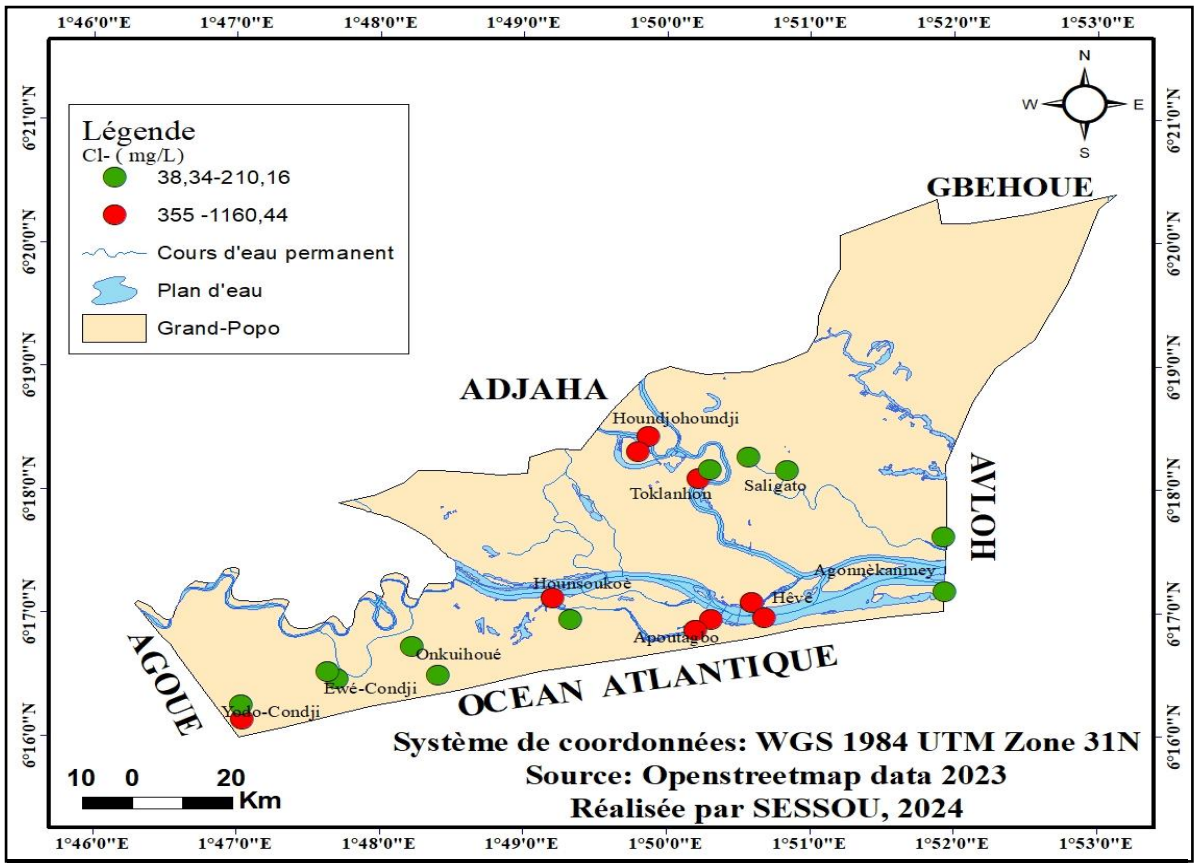


Figure 16 : Teneurs en chlorures des eaux souterraines de l'arrondissement de Grand-Popo. (Source : OpenStreetmap, data 2023, Travaux de terrain, 2024)

- **Sodium**

La présence de sodium dans l'eau souterraine est normale. L'analyse des données a montré que les teneurs moyennes en sodium dans les eaux des points étudiés varient entre 10,41 mg/L et 1000,32mg/L (Figure 15) avec une valeur moyenne de 244,888 mg/L. La plus forte valeur est relevée au point P16 à Toklanhon et la plus faible valeur est relevée au point P11 à Agonnèkanmey.

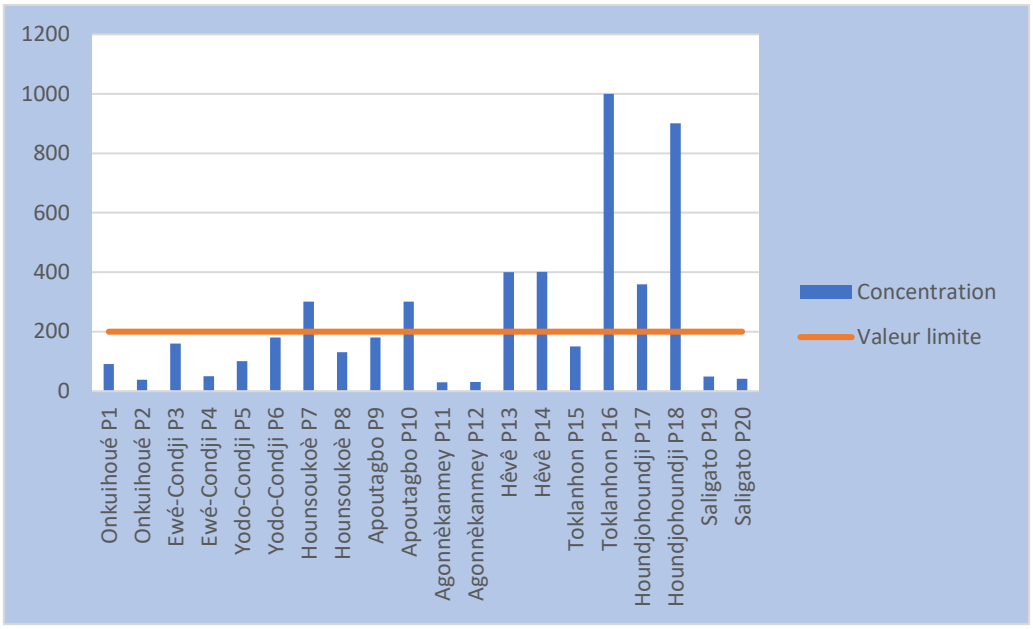


Figure 17: Variation des valeurs de sodium au niveau des points d'échantillonnage.

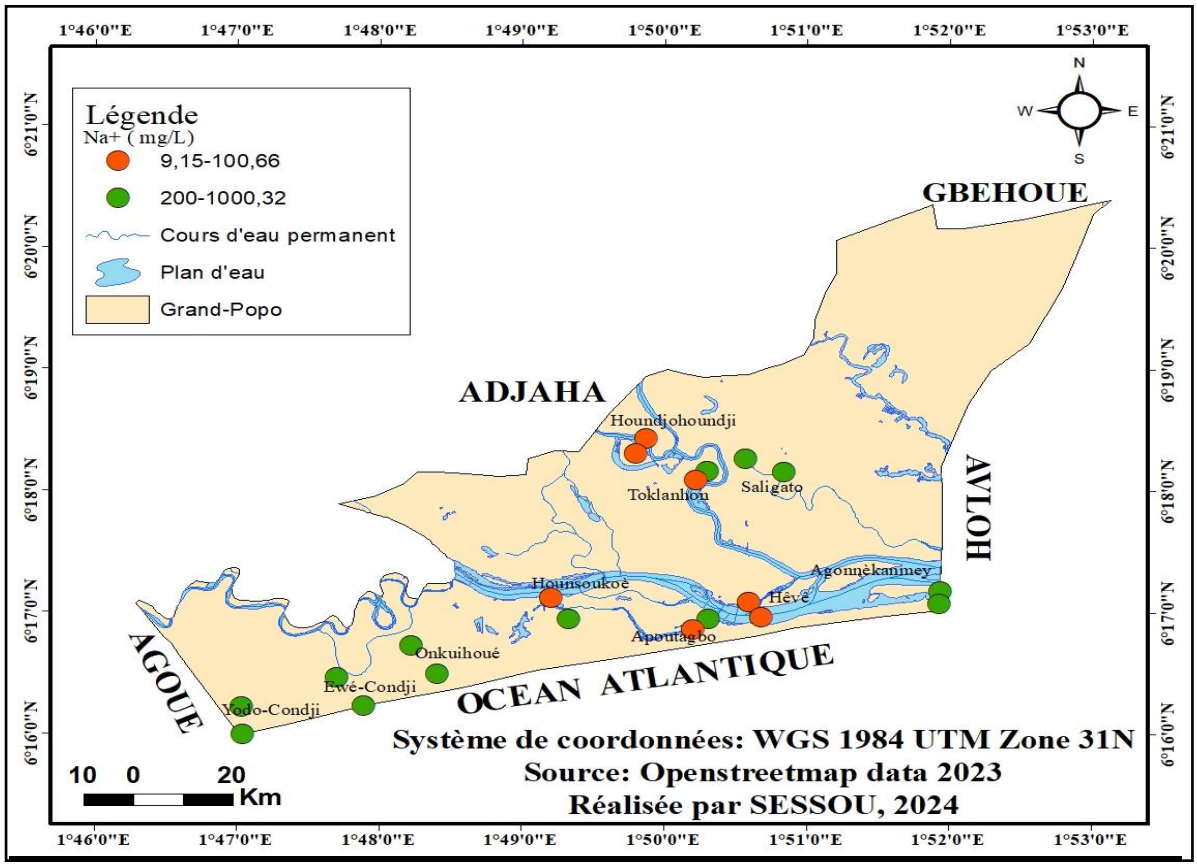


Figure 18 : Teneurs en sodium des eaux souterraines de l'arrondissement de Grand-Popo. (Source : OpenStreetmap, data 2023, Travaux de terrain, 2024)

- **Potassium**

La figure 16 présente la variation du potassium. L'analyse de cette figure révèle que la valeur minimale du potassium est de 0,42 mg/L relevée au point P2 à Onkuihoué et la valeur maximale

est de 17,88 mg/L relevée au point P16 à Toklanhon. On a donc une valeur moyenne de 3,64 mg/L.

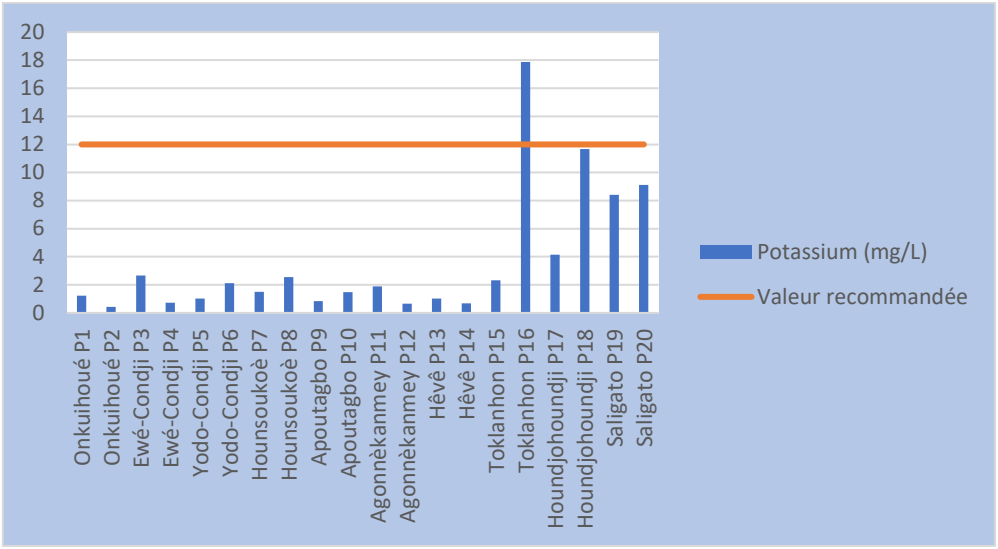


Figure 19: Variation des valeurs de potassium au niveau des points d'échantillonnage.

3.1.1. Relation entre ions chlorures et sodiums

On observe une bonne corrélation entre les ions chlorures et les ions sodiums des eaux de puits échantillonnées comme indiqué ci-dessous avec le coefficient de corrélation r =0,82.

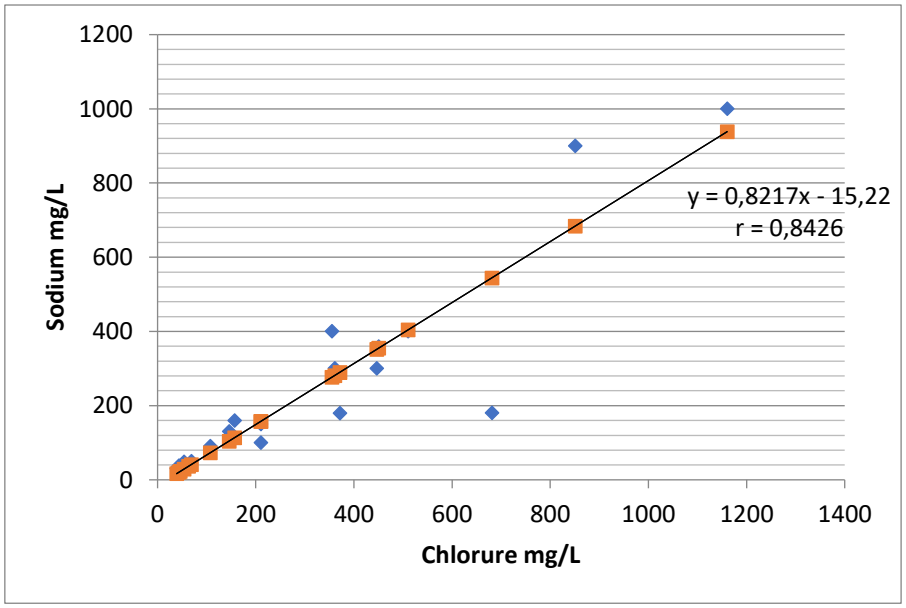


Figure 20 : Corrélation entre les concentrations d'ions chlorure et sodium dans les eaux de puits échantillonnés.

3.2. Discussion

Les valeurs des paramètres physico-chimiques collectées au cours de nos travaux et obtenues grâce aux analyses faites au laboratoire, ont permis d'apprécier la qualité des eaux de puits de l'arrondissement de Grand-Popo.

En effet, les valeurs de température mesurées varient de 28,6 à 30,2°C. Ces valeurs de température ont connu une légère variation par rapport à celles mesurées par Degbevi (2013) entre 26,5°C et 32°C et Kouvahe (2017) entre 28,4°C et 33°C lors de leurs travaux de terrain. Elles sont par contre semblables à celles rapportées par Maoudombaye et al (2015) et Bakouan et al (2017) dans les eaux souterraines du Tchad et du Burkina Faso avec des moyennes respectives 31,95 ± 2,24°C et 31,3 ± 1,6°C. Une variation de température d'un point de mesure à un autre est fonction de la période, du temps ou encore de l'heure à laquelle les mesures ont été effectuées. Nous remarquons que toutes les températures des eaux des différents points d'échantillonnage dépassent la référence de qualité fixée à 25°C (Source : Code de la Santé Publique en France). Mais malgré que ces valeurs ne soient élevées, elles ne présenteraient aucun danger pour la santé humaine, mais posent un problème d'acceptabilité car une eau fraîche est généralement plus agréable au goût qu'une eau tiède.

Quant aux valeurs de pH enregistrées, elles varient de 7,04 à 8,48. Ces valeurs de pH obtenues oscillent dans la tranche de valeurs **(6.5<pH<8.5)** tolérables par les normes béninoises comme le stipule l'article 17 du Décret N°2001-094 du 20 Février 2001 fixant les normes de qualité de l'eau potable en République du Bénin. Les caractéristiques du pH sont liées à la nature géologique des formations aquifères et aux terrains traversés (Boubakar, 2010). L'analyse de nos échantillons d'eau a dévoilé que le pH est proche de la basicité, pour la plupart des eaux prélevées. Ces valeurs de pH sont, pour la majorité en-dessous de celles (6,1 et 8) obtenues par Kouvahe (2017) sur la commune de Grand-Popo.

En ce qui concerne la salinité, la variation est caractérisée par une augmentation progressive de celle-ci en fonction de la valeur de la conductivité mesurée au niveau du point. La valeur maximale (2000ppm) soit 2 PSU est obtenue au point P16 où la valeur de la conductivité est maximale (3970µS/cm). Remarquons que ces valeurs ne sont pas si grande comparée à celle des mers et océans en moyenne (34 et 35 PSU, Dorsey E., 1940)

Les valeurs de la conductivité électrique sont variables de 320 à 3970 µS/cm. Ce qui atteste d'une minéralisation moyenne de 1404,6 µS/cm. La valeur maximale recommandée pour la conductivité électrique par l'OMS est de 2000 µS/cm. Les résultats montrent que les

conductivités enregistrées sont assez fortes, bien que 64% des puits échantillonnés présentent une conductivité électrique inférieure aux normes OMS. Ce qui correspond à une forte minéralisation de ces eaux. Les fortes valeurs de conductivités électriques sont observées respectivement pour les eaux prélevées à Apoutagbo P9, Hêvê P14, Toklanhon P16 et Houndjohoundji P18 avec des valeurs atteignant 2190, 2370, 3970 et 3210 µS/cm. La plus faible valeur de conductivité électrique est observée dans la localité d'Agonnèkanmey P11 (320 µS/cm). En se référant à la norme de salinité adoptée par l'OMS en 1998, une eau est qualifiée d'« eau saline » lorsque la conductivité est comprise entre 1000 et 3000 µS/cm comme l'indique le tableau 2. Dans le cas où la conductivité est supérieure à 3000 µS/cm on est en présence d'une « eau de mer ». Étant donné que les eaux des puits échantillonnées à Yodo-Condji, Hounssoukoè P7, Apoutagbo, Hêvê, Toklanhon P15 présentent des valeurs de conductivités supérieures entre 1000µS/cm et 3000 µS/cm on pourrait les qualifier d'« eau saline » d'après le tableau de classification des eaux en fonction de la conductivité de la manière suivante selon Rodier (2009). En outre, ceux échantillonnés à Toklanhon P16 et Houndjohoundji P18 présentent des valeurs supérieures à 3000 µS/cm. Ce qui atteste sans doute d'une intrusion d'eau de mer. Mais, il faut remarquer que les deux points d'eau échantillonnés (Toklanhon et Houndjohoundji) sont proches de la lagune de Grand-Popo. Cette configuration pourrait expliquer les fortes valeurs de conductivités électriques obtenues dans ces deux localités qui sont aussi à proximité de la mer.

A propos des concentrations en chlorures, les teneurs des échantillons d'eau analysés affichent des valeurs oscillantes entre 38,34 mg/L et 1160,44 mg/L. Les points d'eau ayant les valeurs élevées en ions chlorures sont situés respectivement dans les localités de Yodo-Condji (P6), Hounssoukoè (P7), Apoutagbo, Hêvê, Toklanhon (P16) et de Houndjohoundji. Cette situation laisse suspecter une intrusion d'eau saline car les valeurs obtenues au niveau de ces points d'eau sont supérieures à celles recommandées par les normes béninoises soit 250mg/L. Pour les autres points d'eau échantillonnés les teneurs en ions chlorures restent conformes aux normes et oscillent entre 38,84mg/L et 210,16mg/L. Ces eaux ne souffrent donc pas encore d'une salinisation remarquable. Par ailleurs, la minéralisation des eaux souterraines augmente généralement avec le sens de l'écoulement.

Pour ce qui est du sodium, selon Rodier J. *et al*., 2009, les précipitations apportent une quantité de sodium minime dans l'eau souterraine, les teneurs anormalement élevées peuvent provenir du lessivage de sels, ou de la percolation à travers des terrains salés ou de l'infiltration d'eaux saumâtres. L'analyse des données a montré que les teneurs moyennes en sodium dans les eaux

des points étudiés varient entre 10,41 mg/L à 1000,32mg/L. Nous avons remarqué que les points d'eau situés à Hounssoukoè P7, Apoutagbo P9, Hêvê (P13 et P14), Toklanhon P16, et Houndjohoundji (P17 et P18) présentent des valeurs respectives de 300,89mg/L ; 300,64 mg/L ; 200,44 mg/L ; 300,89mg/L ; 1000,32mg/L ; 259,54 mg/L et 900,36 mg/L. Selon les recommandations de l'OMS (2017), la quantité de sodium nécessaire dans une eau destinée à la consommation doit être inférieure à 200 mg/L. Or, les teneurs obtenues pour les points d'eau échantillonnés dans ces localités sont au-dessus de cette valeur. Ces eaux ne respectent donc pas les normes de potabilités.

Quant aux valeurs de potassium, en se basant sur la norme recommandée de l'OMS (2017) selon laquelle la concentration en ions potassium ne doit pas excéder 12 mg/L dans les eaux de consommations, on peut en conclure que les eaux analysées au cours de cette étude sont de bonne qualité sauf celle relevée au point P16 à Toklanhon dont la concentration est de 17,88 mg/L. Les teneurs en ions potassium des eaux analysées sont similaires à celles obtenues par plusieurs auteurs (Mahamane et Guel, 2015 ; Fambi et al., 2022). Elles sont toutefois en général inférieures à celles rapportées par M'Baye et al. (2019) dont certaines atteignent 40 mg/L de potassium.

Par ailleurs, le coefficient de corrélation entre les ions chlorures et sodiums des eaux échantillonnées est **r= 0,84.** Ce qui signifie une forte corrélation positive entre les ions chlorures et sodium Ainsi on pourrait déduire qu'une teneur élevée en ions chlorures est synonyme d'une teneur en ions sodiums élevée dans l'eau car généralement ces deux ions ont la même source dans l'eau. L'hypothèse selon laquelle il existerait une relation sigificative entre les ions chlorures et sodium est donc vérifiée.

En nous basant sur la carte piézométrique réalisée par Kouvahe lors de ses travaux en 2018, nous pouvons dire que les niveaux piézométriques de l'arrondissement de Grand-Popo équivalent à -1m dans les dépressions piézométriques témoignant ainsi de la sensibilité de ces secteurs à une invasion par les eaux salées de la mer et par les eaux saumâtres de la lagune de Grand-Popo. Ces dépressions sont observées à Hêvê, Apoutagbo, Houndjohoundji et Toklanhon. Ce qui justifie encore plus, les concentrations élevées en conductivité, en chlorures et en sodium dans les eaux échantillonnées au niveau de ces localités. Le biseau salé se situerait donc le long de la lagune côtière de Grand-Popo et des villages Houndjohoundji et Toklanhon. En ce qui concerne l'interface eau douce/eau salée, l'application de la formule hydrostatique de Ghyben-Herzberg situe dans l'arrondissement de Grand-Popo, l'interface eau douce/eau salée à des profondeurs pas assez importantes soit -87,72 à 246,4 m. Sur le plateau, les profondeurs de l'interface eau douce/eau salée se situe entre 20 m et 170 m environ. Dans la plaine littorale,

l'interface entre eau douce/eau salée se situe entre -30 m et 20 m environ en partant de la côte. Une diminution progressive des profondeurs de l'interface eau douce/eau salée sur le plateau est notée au fur et à mesure qu'on s'approche de la lagune de Grand-Popo et de la mer. Ces faibles profondeurs constatées en bordure de la lagune de Grand-Popo et de la côte pourraient être dues au transit de l'eau de mer.

En outre, les résultats des enquêtes ont révélé que les maladies hydriques telles que la diarrhée et les infections sont bien observées en grande partie dans les villages bien que l'usage principal des eaux de puits ne soit pas la boisson mais la préparation par contre, l'hypertension artérielle n'est pas si enregistrée comme maladie.

CONCLUSION ET SUGGESTIONS

L'étude menée sur l'impact du biseau salé sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans l'arrondissement de Grand-Popo a révélé une contamination significative de ces ressources en eau. Cet arrondissement appartient à la zone sédimentaire du Bénin. De nombreux travaux ont été menés pour déterminer la limite du biseau salé dans la commune entière. Les résultats obtenus, notamment les fortes concentrations en conductivité électrique, chlorures et sodium au-delà des normes, témoignent d'une intrusion saline avancée dans l'aquifère. Cette situation est principalement attribuable à la proximité de l'océan Atlantique, à l'exploitation excessive des ressources en eau et à la nature géologique de la région.

L'infiltration d'eau de mer dans les nappes phréatiques pose de sérieux problèmes pour les populations locales, sur le plan de la santé bien qu'ils ne soient pas encore visibles que sur celui des activités socio-économiques. La consommation d'une eau de mauvaise qualité peut entraîner des maladies liées à la salinité et limiter les usages de l'eau pour l'agriculture et l'élevage.

Afin d'atténuer les impacts de la salinisation des eaux souterraines et de préserver cette ressource vitale, il est recommandé d'éviter les ouvrages nécessitant de gros débit d'exploitation. Ainsi, il serait préférable d'étendre le réseau de la SONEB dans toute la commune. En outre, il faudrait l'installation des piézomètres pour un suivi rigoureux des fluctuations des nappes superficielles et profondes. Comme suggestions, nous proposons de :

- **renforcer le suivi de la qualité des eaux :** il est essentiel de mettre en place un système de surveillance régulier des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines afin de détecter rapidement toute évolution de la qualité et d'ajuster les mesures de gestion en conséquence.
- **optimiser la gestion des ressources en eau :** une gestion rationnelle de l'eau, notamment en réduisant les prélèvements excessifs et en favorisant l'utilisation d'eaux alternatives (eaux de pluie, eaux usées traitées), est indispensable pour réduire la pression sur l'aquifère.
- **mettre en place de techniques de dessalement :** pour les zones les plus touchées par la salinisation (Hêvê, Apoutagbo, Houndjohoundji, Toklanhon), l'installation de systèmes de dessalement pourrait être envisagée tout en tenant compte des coûts énergétiques et environnementaux associés.
- **sensibiliser des populations :** il est important de sensibiliser les populations locales aux

enjeux liés à la qualité de l'eau et aux bonnes pratiques de gestion de cette ressource.

- **collaborer entre acteurs :** une collaboration étroite entre les pouvoirs publics, les chercheurs, les ONG et les populations locales est nécessaire pour mettre en œuvre des solutions durables et adaptées au contexte local.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abdelhaleem Saleh A. I. 2007. *Impact of pumping on saltwater intrusion in Gaza coastal aquifer, Palestine*. Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master in Water and Environmental Engineering, Faculty of Graduate Studies, at An-Najah National University, Nablus, Palestine, 105p.
2. Arfib B., Cavalera T. & Gilli E. 2006. Influence de l'hydrodynamique sur l'intrusion saline en aquifère karstique côtier. *Comptes Rendus Géoscience,* 338, 757-767.
3. Bakouan C, Guel B, Hantson AL. 2017. Caractérisation physico-chimique des eaux des forages des villages de Tanlili et Lilgomdé dans la région Nord du Burkina Faso - Corrélation entre les paramètres physico-chimiques. *Afr. Sci*., **13**(6) : 325-337.
4. Bear J., Cheng A. H. D., Sorek S. *et al*. 1999. Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. *Kluwer Academic Publishers*, 625p.
5. Bouderbala A. 2015. *Contribution des méthodes hydrochimiques et géophysiques à l'acquisition de la minéralisation dans les zones côtières cas de la nappe alluviale de l'oued Nador - Tipaza (Algérie)*. Thèse de Doctorat en sciences de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie, 277p.
6. Capaccioni, B., et al 2005. Saline intrusion and refreshening in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwaters. Journal of Hydrology 307.
7. Chapman, D. (1996) Water Quality Assessments : A Guide to the Use of Biota, Sediment and Water in Environmental Monitoring.
8. Chimouni H. 2017. *L'évaluation du degré de pollution par l'intrusion marine de l'oued Sebaou (partie bas Sebaou)*. Master en génie de l'environnement de l'Université M'Hamed Bougara Boumerdes, Algérie, 94p.
9. Chouti W. K., Chitou N. E., Kèlomè N., Kpako B. Boniface H., Vlavonou Dorcas H., Tossou M., et al., 2017, *Caractérisation physico-chimique Et Etude De la toxicité de la lagune côtière, De Togbin A Grand-Popo (Sud-Ouest Bénin)*, European scientific journal, 13 (27) 131.
10. Custodio, E. et Bruggeman, G.A., 1987, *Groundwater Problems in Coastal Areas*, Études et rapports d'hydrologie, Paris (France), Unesco, 596 p.
11. Daye M., 2009, *Intrusion Saline à Tripoli*, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme du Master 2 Recherche.

12. Driscoll, F.C., 1984, *Groundwater and Wells*, St Paul (Minesota, É.-U.), E. Johnson Inc., 440 p.
13. Dorsey E., *Properties of Ordinary Water Substance in all of its Phases : Water-Vapor, Water and all the Ices*, 1940, p. 419.
14. El Mansouri B., Loukili Y., Esselaoui D. 2003. Mise en évidence et étude du phénomène de l'upconing dans la nappe côtière du Rharb (NW du Maroc). *Instituto Geologico y Minero de Espana*, Madrid. ISBN. 84, 7840-470-8.
15. Fekrache F. 2015. *Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara-Annaba (Algérie)*. Thèse du doctorat en sciences de l'Université Badji Mokhtar–Annaba, Algérie, 279.
16. Freeze R. A. & Cherry J. A. 1979. Groundwater. *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, NJ. 604p.
17. Gaaloul N., Alexander H., Cheng D. 2003. Hydrogeological and hydrochemical investigation of Coastal Aquifers in Tunisia-Crisis in overexploitation and salinization. Second *International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers-Monitoring, Modeling and Management*, Merida, Mexico, 13p.
18. Guergazi et al, (2005*) Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra (Algérie). Pratique de la chloration*, Larhyss Journal, 4, 119-127.
19. Guidi E. A. (2021), *Transport et dispersion de la salinité dans la lagune de Grand-Popo,* Mémoire de licence professionnelle en hydrologie, Institut National de l'Eau, Bénin, 63p.
20. Kouvahe O. A. D. (2017), *Etude de la salinité des ressources en eau souterraines de la commune de Grand-Popo*, Mémoire de licence professionnelle en hydrologie, Institut National de l'Eau, Bénin, 61p.
21. Maoudombaye T, Ndoutamia G, Seid Ali M, Ngakou A. 2015. Etude comparative de la qualité physico-chimique des eaux de puits, de forages et de rivières consommées dans le bassin pétrolier de Doba au Tchad. *Larhyss J*., 24 : 193-208.
22. Olduro AO, Aderiye BI (2007). *Efficacité de l'extrait de Moringa Oleifera Sead sur la microflore des eaux de surface et souterraines* L. Plant Sci.6 : 438-453.
23. Rodier J., Legube B., Merlet N. (2009). L'analyse de l'eau, Ed. Dunod, 78- 1368p.
24. Segouali W. et Zerdoudi A., 2022-2023, *La qualité physico-chimique de l'eau potable de la région de Guelma*, Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master P.79.
25. The American Journal of Medicine, 88(4), S52-S57.
26. Vandana S. "*Sacred Waters*" (Chapter 14).

ANNEXES

Annexe 1

Questionnaire d'enquête

Section 1 : Informations générales

Age : ☐ ans Sexe : ☐ Profession :

Quartier de résidence : Durée de résidence à Grand-Popo :

Section 2 : Sources d'eau de boisson

Quelles sont les principales sources d'eau de boisson que vous utilisez ?

Puits : ☐ Forages : ☐ Réseau public ☐ Eau de bouteille : ☐ Autres : ☐

Depuis combien de temps utilisez-vous cette source d'eau ?

Avez-vous remarqué des changements dans la qualité de l'eau au cours de ces dernières années ? (Goût, odeur, couleur) Si oui, lesquels ?

Section 3 : Perception de la qualité de l'eau

Selon vous, l'eau que vous consommez est-elle de bonne qualité ? OUI : ☐ NON : ☐

Avez-vous déjà eu des problèmes de santé que vous associez à la consommation d'eau ? (Diarrhée, maladie de peau…) Si oui, lesquels ?

Avez-vous déjà entendu parler de l'intrusion saline à Grand-Popo ? OUI : ☐ NON : ☐

Selon vous, l'intrusion saline pourrait-elle avoir un impact sur la qualité de votre eau de boisson ? OUI : ☐ NON : ☐

Section 4 : Pratiques d'hygiène et de traitement de l'eau

Traitez-vous votre eau avant de la consommer ? OUI : ☐ NON : ☐ Si oui, quelles méthodes utilisez-vous ? (Filtration, ébullition, ajout de produits chimiques, etc.) ?

Avez-vous d'autres observations à partager concernant la qualité de l'eau à Grand-Popo ?

Merci pour votre participation !

Annexe 2 : Quelques photos.



Photo 2 : Glacière de conservation pour les échantillons.



Photo 3 : Echantillons prélevés ;



Photo 4 : Dosage des ions chlorures. (i)



Photo 5 : Titrage avec la solution de nitrate d'argent.(ii)



Photo 6 : Détermination des ions chlorures (iii)

Source : (Cliché, SESSOU, septembre 2024)

Annexe 3 : Codes et coordonnées géographiques des points de prélèvement.

Codes	Points d'échantillonnage	Coordonnées géographiques en UTM	
		Longitude	**Latitude**
P1	Onkuihoué	368007.506	693739.352
P2	Onkuihoué	367659.974	693165.830
P3	Ewé-Condji	366698.204	693681.536
P4	Ewé-Condji	366579.070	693787.589
P5	Yodo-Condji	365461.706	693297.646
P6	Yodo-Condji	365476.041	693083.530
P7	Hounsoukoè	369476.025	694885.924
P8	Hounsoukoè	369700.217	694562.895
P9	Apoutagbo	371520.159	694566.237
P10	Apoutagbo	371319.816	694411.445
P11	Agonnèkanmey	374523.009	694990.857
P12	Agonnèkanmey	374500.970	695803.427
P13	Hêvê	372038.949	694828.567
P14	Hêvê	372193.989	694600.010
P15	Toklanhon	371495.728	696814.435
P16	Toklanhon	371359.330	696668.142
P17	Houndjohoundji	370710.714	697300.856
P18	Houndjohoundji	370.576.202	697074.441
P19	Saligato	372000,010	697000.500
P20	Saligato	372500.456	696800.469

Annexe 4 : Caractéristiques physico-chimiques de l'arrondissement de Grand-Popo.

Paramètres / Points	Température (en °C)	pH	Conductivité (en µS/cm)	Salinité (en ppm)	Chlorure (Cl^-)	Sodium (Na^+)	Potassium (K^+)
P1	28,9	7,68	806	403	107,1	95,76	1,23
P2	29,1	7,23	440	220	43,31	30,81	0,42
P3	29,6	7,84	1004	502	156,91	170,17	2,67
P4	29,7	7,61	558	279	68,87	10,41	0,73
P5	29,4	7,34	1140	569	210,16	100,66	1,02
P6	29,8	7,71	1550	773	371,33	180,03	2,11
P7	28,6	7,69	1942	973	446,59	300,89	1,51
P8	29,7	7,62	900	450	145,55	130,93	2,56
P9	29,6	7,66	2190	1100	680,87	300,64	0,83
P10	29,3	7,85	1395	698	360,68	100,64	1,49
P11	29,9	8,48	320	159	46,15	30,32	1,88
P12	30,2	7,91	354	177	38,34	30,54	0,65
P13	29,6	7,46	1854	930	355	200,44	1,02
P14	28,9	7,52	2370	1180	510,12	300,89	0,68
P15	29,2	7,04	1259	628	210,16	160,78	2,32
P16	28,6	7,26	3970	2000	1160,44	1000,32	17,88
P17	29,6	7,29	1940	972	450,44	259,54	4,15
P18	29,4	7,18	3210	1630	850,91	900,36	11,67
P19	29,2	7,46	330	374	53,96	60,15	8,40
P20	29,4	7,47	560	740	63,19	60,3	9,11

Table des matières

DEDICACE ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME v

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES vii

LISTE DES FIGURES viii

LISTE DES TABLEAUX ix

SOMMAIRE x

INTRODUCTION GENERALE 1

Problématique 3

Justification 3

Objectifs 3

Objectif général 3

Objectifs spécifiques 3

Hypothèses de recherche 4

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 6

1. Clarification 6

1.1. Impact 6

1.2. Biseau salé 6

1.3. Qualité physico-chimique de l'eau de boisson 6

1.4. Eaux souterraines 6

1.5. Puits 6

1.6. Eau de boisson 6

1.7. Mers 7

2. Les paramètres de l'eau potable 7

2.1. Les paramètres organoleptiques 7

2.2. Les paramètres physico-chimiques : 8

2.2.1. La température (T°) : 8
2.2.2. Le potentiel d'hydrogène (pH) : 8
2.2.3. La conductivité électrique : 8
2.2.4. Ions Chlorures (Cl^-) : 9
2.2.5. Ions Sodium (Na^+) : 9
2.2.6. Ions Potassium (K^+) 10
3. Normes de potabilité des eaux en République du Bénin 10
4. Contamination de l'eau douce par l'eau de la mer 11
5. Approche hydrostatique de Ghyben-Herzberg 12
CHAPITRE 2 : CADRE D'ETUDE, MATERIEL ET METHODOLOGIE. 16
2.1. CADRE D'ETUDE 16
2.1.1. Situation géographique 16
2.1.2. Aspect pédologique et végétation 16
2.1.3. Réseau hydrographique 17
2.1.4. Faune 19
2.1.5. Climat 19
2.1.6. Géologie 20
2.1.7. Aspect socio-économique 21
2.2. MATERIEL 22
2.3. METHODOLOGIE 23
2.3.1. Recherche documentaire 23
2.3.2. Collecte de données 24
2.3.3. Traitement des données 26
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION. 28
3.1. RESULTATS 28
3.1.1. Résultat des enquêtes 28
3.1.2. Résultats des analyses physico-chimiques 29
3.1.1. Relation entre ions chlorures et sodiums 35
3.2. Discussion 36

CONCLUSION ET SUGGESTIONS 40

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 42

ANNEXES 44

Annexe 1 44

Annexe 2 : Quelques photos. 45

Annexe 3 : Codes et coordonnées géographiques des points de prélèvement. 46

Annexe 4 : Caractéristiques physico-chimiques de l'arrondissement de Grand-Popo. 47

Table des matières 48