REPUBLIQUE DU BENIN

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

INSTITUT NATONAL DE L'EAU (INE)

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté pour l'obtention du diplôme de Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : GEOHYDROLOGIE

CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES DU SYSTEME AQUIFERE DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE KANDI

Réalisé par :

SIDI IBRAHIMA Al-Khahar Chaabane

Sous la supervision de :

Maître de mémoire :
Pr Abdoukarim ALASSANE
Maître conférence des université CAMES
Enseignant chercheur à l'INE

Encadreur :
Dr. Ringo Fernand AVAHOUNLIN
Maître assistant des université CAMES
Enseignant chercheur à l'UNSTIM

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

Année académique : 2021-2022

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, comme preuve d'accomplissement de tout leur travail, pour l'investissement, la confiance qu'ils ont placé en moi.

Remerciements

Sans DIEU que peut l'homme ? Ce présent travail a pu se réaliser grâce à la grandeur du Tout Puissant, le tout miséricordieux, le très miséricordieux mais aussi grâce à des personnes formidables qui ont été d'un grand soutien dans cette période. Toutefois, qu'il me soit permis d'adresser des remerciements particuliers:

- Au Professeur Abdoukarim ALASSANE, Chef du département d'Hydrologie et de Gestion des Ressources en Eau (HGRE), pour sa disponibilité et ses précieux conseils ;
- Au Docteur Ringo Fernand AVAHOUNLIN, maître assistant des universités CAMES, enseignant chercheur à l'UNSTIM pour son précieux encadrement, ses conseils et sa disponibilité ;
- Au Docteur KOUDERIN Lucie, le chargé des stages au cabinet Hydrogéoclim Bénin pour nous avoir accueilli dans sa structure pour nos stages et pour sa bonne humeur et ses conseils avisés ;
- A tout le personnel de hydrogéoclim Bénin pour la bonne ambiance pendant le temps passé à leur coté et pour leur conseil et leur contribution de près ou de loin à mon travail ;
- À tout le personnel du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) en l'occurrence, Monsieur Mohamed BOURE SALMANOU pour ses précieuses contributions à la réalisation de ce travail, les Docteur Firmin ADANDEDJI et BOUKARI Ousmane pour leur sympathie et leur solidarité à mon égard ;
- À tous les responsables du Département d'Hydrologie et de Gestion des Ressources en Eau de l'Institut National de l'Eau (INE) ;
- À tout le corps professoral de l'Institut National de l'Eau ;
- À tous les Honorables membres du Jury qui apprécieront ce modeste travail ; merci pour le temps que vous sacrifierez au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- À nos aînés de la formation Professionnelle en Hydrologie en occurrence Bunel ICOUTCHIKA et Jimmy NATABOU, merci pour les encouragements, aides et conseils ;
- A monsieur BOTON, officier de police dans la commune de Kandi qui n'a pas hésité à sacrifier son temps libre pour me venir en aide lors de la campagne d'échantillonnage ;

- À tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce document, qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

Résumé

Garantir un accès à l'eau potable à la population du Bénin est le but visé par le gouvernement béninois en mettant sur pieds un plan de desserte en eau potable dans les zones d'inactivité de la SONEB. En vue de contribuer à l'amélioration de la qualité des eaux de consommation livrées aux populations de la commune de Kandi à travers l'évaluation de la potabilité des eaux souterraines, nous avons échantillonné au hasard dix (10) ouvrages d'AEP dans les arrondissements de la commune dont trois (03) à Angaradebou, trois (03) Bensekou, deux (02) Saah, un (01) Kandi II et un (01) Kandi III. Pour apprécier la qualité de ces eaux, des analyses physico-chimiques ont été effectuées au laboratoire d'analyse du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA). La méthodologie a consisté à une recherche documentaire, à la collecte et au traitement des données. Des résultats, il ressort que dans deux localités de la commune, les forages échantillonnés ont une qualité relativement mauvaise. A cet effet, on note surtout des taux élevés en nitrates et ammonium dépassant les normes chimiques nationales respectivement de 45 mg/l et de 0.5 mg/l et la température et ph dépassant celle physique respectivement de 25° et 6.5 à 8.5. Sur les dix (10) forages échantillonnés au total dans les cinq arrondissements, huit (08) sont de bonne qualité physico-chimique. La richesse en nitrates et en ammonium pourrait s'expliquer par la contamination de l'eau par les déchets organiques d'origine humaine et animale. Ces taux élevés de nitrates et d'ammonium sont à l'origine de la pollution organique de l'eau qui dégrade la qualité de cette dernière.

Mots clés : Kandi, échantillon, AEP, physico-chimique, BSK, contamination, forages, eaux souterraines.

Abstract

Guaranteeing access to drinking water for the population of Benin is the goal of the Beninese government in setting up a drinking water supply plan in the areas where SONEB is not active. In order to contribute to the improvement of the quality of drinking water delivered to the populations of the commune of Kandi through the evaluation of the potability of the groundwater, we randomly sampled ten (10) AEP works in the districts of the commune, including three (03) in Angaradebou, three (03) Bensekou, two (02) Saah, one (01) Kandi II and one (01) Kandi III. To assess the quality of these waters, physico-chemical analyses were carried out in the analytical laboratory of the Laboratory of Applied Hydrology (LHA). The methodology consisted of documentary research, data collection and processing. The results show that in two localities of the commune, the sampled boreholes have a relatively poor quality. In this regard, high levels of nitrates and ammonium exceeding the national chemical standards of 45 mg/l and 0.5 mg/l respectively, and the temperature and ph exceeding the physical standards of 25° and 6.5 to 8.5 respectively, were noted. Of the ten (10) boreholes sampled in total in the five districts, eight (08) are of good physico-chemical quality. The high levels of nitrates and ammonium could be explained by the contamination of the water by organic waste of human and animal origin. These high levels of nitrates and ammonium are at the origin of the organic pollution of the water which degrades its quality.

Key words: Kandi, sample, AEP, physico-chemical, BSK, contamination, boreholes, groundwater.

Sigles et abréviations

AEP : Approvisionnement en Eau Potable

BSK : Bassin Sédimentaire de Kandi

CE : Conductivité Electrique

GPS : Global Positioning System

INE : Institut National de l'Eau

IPO : Indices de Pollution Organique

IQE : Indices de Qualité de d'Eau

LHA : Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PCC-SAP : Plan Communal de Conservation de la Biodiversité du Système des Aires Protégées

PDC : Plan de Développements Communal

Ph : Potentiel d'hydrogène

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

SONEB : SOciété Nationale des Eaux du Bénin

TDS : Total Solides Dissous

UE : Union Européenne

Table des matières

Dédicaces 1
Remerciements 2
Résumé 4
Abstract 5
Sigles et abréviations 6
Liste des figures 9
Introduction générale 10
Chapitre I : Contexte Général de l'étude 12
1.1. Présentation de la zone d'étude 12
1.1.1. Situation géographique et administratif 12
1.1.2. Cadre physique de l'étude 15
1.2. Revue de littérature 21
1.3. Clarification conceptuelle 23
Chapitre II : Approche méthodologique 26
2.1. Recherche documentaire 26
2.2. Collecte des données 26
2.3. Traitement des données 29
Chapitre III : Résultats et discussion 36
3.1. Résultats 36
3.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux utilisées pour l'approvisionnement des populations en eau dans la commune de Kandi 36
3.1.2. Appréciation de la qualité des eaux souterraines des eaux utilisées pour l'approvisionnement des populations en eau dans la commune de Kandi. 42
3.2. Discussion 47
Conclusion Générale : 48
Références bibliographique : 49

Liste de tableaux

Tableau 1 *:* Population de la commune de Kandi (Résultats définitifs RGPH4, juin 2015) 13

Tableau 2 : Critères physico-chimiques pour une eau de boisson. 24

Tableau 3 : Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE (Brown et al., 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Aher et al., 2016) 33

Tableau 4 : Grille simplifiée pour l'évaluation de la qualité globale des eaux souterraines..... 33

Tableau 5 : Grille des classes de l'indice de pollution organique (Leclercq, 2001) 34

Tableau 6 : Grille des classes de l'indice de pollution organique (Leclercq, 2001) 35

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des Indices de Qualité de l'Eau pour chaque échantillon. (SIDI, 2022)..... 43

Tableau 8 : Tableau récapitulatif de la qualité et des usages de l'eau pour chaque échantillon. (SIDI, 2022)..... 44

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des Indices de Pollution Organique de chaque échantillon. (SIDI, 2022)..... 45

Tableau 10 : Tableau récapitulatif de la qualité de l'eau souterraine (SIDI, 2022) 45

Liste des figures

Figure 1 : Carte de situation Géographique (SIDI, 2022)…… 12
Figure 2 : Evolution de la pluie depuis 1970 à 2015 (SIDI, 2022)…… 15
*Figure 3 :*Carte des formations pédologiques dans la commune de Kandi (SIDI, 2022)…… 16
Figure 4 : Carte de la végétation dans la commune de Kandi (SIDI, 2022)…… 17
Figure 5 : Carte hydrographique de la commune de Kandi (SIDI, 2022)…… 14
Figure 6 : Carte géologique de la commune de Kandi (SIDI, 2022)…… 18
Figure 7 : Carte hydrogéologique de la commune de Kandi (SIDI, 2022)…… 20
Figure 8 : carte de spatialisation des points d'échantillonnages dans la commune de Kandi (SIDI, 2022)……... 27
Figure 9 : Variation des TDS et du Ph selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)…… 36
Figure 10 : Variation de la conductivité et de la température selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)……... 37
Figure 11 : Variation de la concentration en nitrate et en nitrite selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)……... 38
Figure 12 : Variation de la concentration de l'ammonium et d'alcalinité selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)……...39
Figure 13 : Variation de la concentration de sulfate et d'orthophosphate selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)……...40
Figure 14 : Variation de la concentration de calcium et magnésium selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)…… 41
Figure 15 : Variation de la concentration en chlorure et en fluorure selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)…… 42

Introduction générale

Dans le but de la rédaction de mon mémoire de fin de formation en Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau à l'Institut National de l'Eau, j'ai eu à effectuer un stage dans la structure HYDROGEOCLIM Sarl, un bureau d'étude spécialisé dans les travaux d'ingénierie civile et géologique. Le stage effectué a porté sur la « **caractérisation physico-chimique des ressources en eau souterraines du système aquifère du bassin sédimentaire de Kandi »**

Le Bassin Sédimentaire de Kandi situé au Nord-Est du Bénin, regorge de plusieurs aquifères. Il est l'un des plus grands Bassins du Bénin avec environs 8700 km² de superficie, constituant la principale source d'approvisionnement en eau potable des populations des communes de Kandi, Malanville, Ségbana, Karimama, Gogounou et Kalalé (GBEWEZOUN, 2016) zone de forte activité agricole. L'agriculture intensive remarquée dans la zone pourrait induire une contamination aux eaux souterraines de la région en nitrate, impropre donc à la consommation. De même, dans ce bassin, la ville de Kandi, connaît des problèmes d'altération de la qualité des ressources en eau, notamment celle de la nappe phréatique, plus utilisée par les populations (Z. Tahirou et al, 2021).

Devant garantir la qualité de l'eau et faciliter l'accès aux populations pour leurs besoins qui ne cessent de croître du fait de la démographie qui augmente exponentiellement, il sera déterminé la qualité physico-chimique de l'eau du BSK, cadre dans lequel s'inscrit notre travail**.**

La présente étude a pour objectif d'évaluer les caractéristiques physico-chimiques des eaux de forage du Bassin Sédimentaire de Kandi. Nous nous appuierons sur des objectifs spécifiques pour pouvoir atteindre notre objectif général.

Les objectifs spécifiques visés sont :

- Identifier les forages d'approvisionnement en eau du BSK ;
- Analyser les paramètres physico-chimiques des eaux de forages du BSK ;
- Comparer la qualité physico-chimique des eaux de forages avec les normes de potabilité ;

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

- L'eau des forages du système aquifère du BSK sont les sources d'approvisionnement en eau dans les communes de l'Alibori ;
- Les teneurs des différents paramètres physico-chimiques des eaux de forages déterminent la qualité des eaux de consommation dans les communes de l'Alibori.

- Les eaux de forages du système aquifère du BSK sont polluées.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre aborde le contexte général de notre étude, le deuxième présente l'approche méthodologique et enfin le troisième chapitre porte sur les résultats et discussions.

Chapitre I : Contexte Général de l'étude

Ce chapitre nous plonge dans le cadre d'étude par la description de la ville de Kandi. Il sera question ici d'aborder le thème en général, de faire comprendre le sujet présenté.

1.1. Présentation de la zone d'étude

1.1.1. Situation géographique et administratif

1.1.1.1. Situation géographique

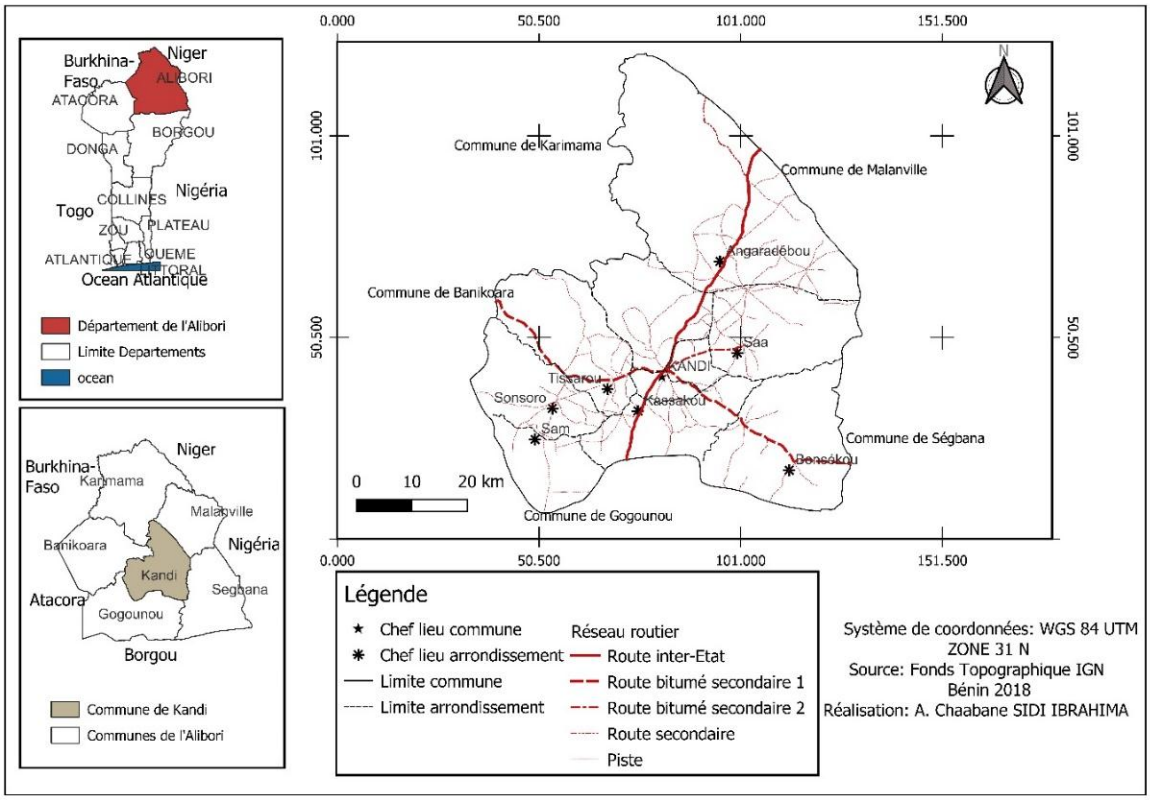


Figure 1 : **Carte de situation Géographique (SIDI, 2022)**

La présente étude a été réalisée dans la commune de Kandi, située au Nord-Est du Bénin. Elle est localisée au centre du département de l'Alibori. Située entre 10°55' et 11°39' de latitude Nord et 2°38' et 3°15' de longitude Est, elle s'étend sur une superficie de 3.421 km² ; soit 13 % de l'ensemble du département de l'Alibori (PDC, 2015). Elle est limitée au nord par la commune de Malanville, au sud par la commune de Gogounou, à l'est par la commune de Ségbana et à l'ouest par celle de Banikoara. La commune de Kandi est un carrefour qui donne accès à plusieurs localités du Bénin et de la sous-région, notamment le Nigeria et les pays de l'hinterland tels que le Niger, le Burkina-Faso et le Mali. La commune de Kandi compte 10 arrondissements dont 3 urbains (Kandi I, II, III) et 7 ruraux (Angaradébou, Kassakou, Sam,

Sonsoro, Saah, Donwari, Bensékou) avec les arrondissements d'Angaradébou et de Donwari qui sont riverains au parc W. (PCC-SAP, 2019)

1.1.1.2. Démographie et cadre administratif

La population de la commune de Kandi est passée de soixante-treize mille cent trente-huit (73.138) en 1992 à quatre-vingt-quinze mille deux cent six (95.206) habitants selon le RGPH 2002 puis à cent soixante-dix-neuf mille deux cent quatre-vingt-dix (179 290) en 2013. Selon les prévisions de l'INSAE, elle sera d'environ 134.101 habitants en 2015. La population de Kandi est jeune (51% ont moins de 15 ans contre 53,4% pour l'Alibori) et inégalement répartie. Le RPGH 2002 montre que la population urbaine est de vingt-sept mille deux cent vingt-sept (27.227) habitants. Le taux d'urbanisation est de 29 %. La densité moyenne est d'environ 28 habitants/km2 (20 habitants /km2 pour le département) en 2002.

Sur le plan ethnique et d'après le RPGH 2002, les Mokollé représentent 15% de la population totale, les Bariba 31,38%, les Dendi 9,47%, les Peulh 30,41% ; les Yoruba 5,93%, les Adja 0,3%, les Fon 1,65%, les Yom, Lokpa 0,1 %, les Otamari 0,2% et les autres ethnies représentent 5,56%.

Au plan religieux, 75,45% de la population est musulmane. Le catholicisme et le protestantisme représentent respectivement 16,75% et 1,13%. Les religions traditionnelles font 0,9% et le reste occupent 3,18%. (PCC-SAP, 2019). Le tableau 1 ci-dessous nous présente la situation administrative de la commune de Kandi.

Tableau 1 : Population de la commune de Kandi (Résultats definitifs RGPH4, juin 2015)

	Masculine	Féminine	Total
Arrondissement	88 998	90 292	179 290
ANGARADEBOU	14 845	15 272	30 117
BENSEKOU	3 138	3 233	6 371
DONWARI	10 381	10 397	20 778
KASSAKOU	5 701	5 881	11 582
SAAH	4 402	4 315	8 717
SAM	11 112	11 650	22 762
SONSORO	11 408	11 512	22 920
KANDI I	10 092	10 445	20 537
KANDI II	10 635	10 665	21 300
KANDI III	7 284	6 922	14 06

1.1.1.3. Régime hydro-climatique

❖ Hydrographie

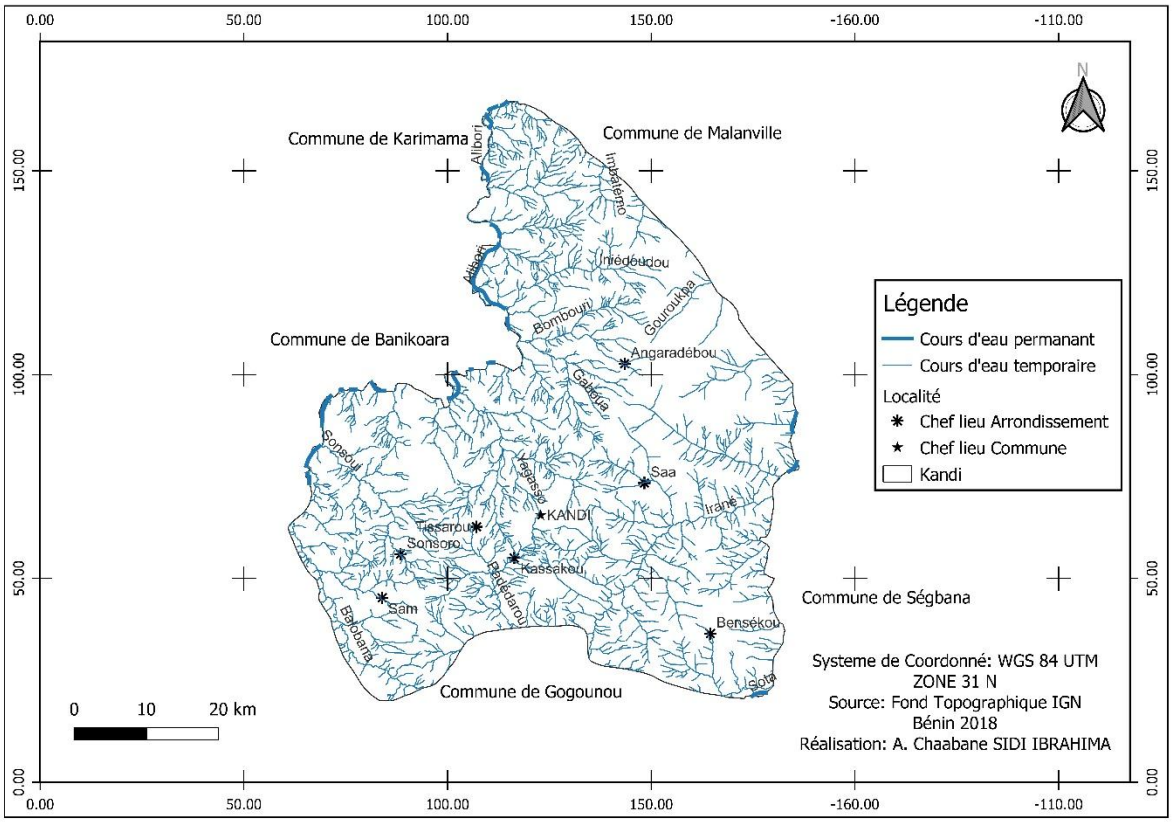


Figure 2 : Carte hydrographique de la commune de Kandi (SIDI, 2022)

Le réseau hydrographique de la commune de Kandi est dense avec une multitude de cours d'eau. La commune de Kandi est drainée par les rivières du bassin versant du Niger à l'exception du Mékrou qui longe la frontière Bénino -Burkinabé à l'extrême Ouest. Elle est donc arrosée par les affluents de l'Alibori et de la Sota (Hountondji et al., 2020). Le cours d'eau de l'Alibori a un volume annuel de 883 m3 et celui de la Sota un volume annuel de 1019 m3. Les bassins de l'Alibori et de la Sota couvrent respectivement des superficies de 8170 km2 et 13410 km2. Ils existent des retenues d'eau dans certaines localités : Tissarou, Gambanè-Touko, Sassabaga, etc. (PCC-SAP, 2019). On note également beaucoup de cours d'eau saisonniers tels que bombouri, bensékou, balobana etc.; dans la Commune de Kandi comme le montre la carte hydrographique ci-dessous (figure 5).

❖ Climat

Le climat de la commune de Kandi est du type soudanais caractérisé par deux saisons contrastées, une saison pluvieuse de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril. Les hauteurs annuelles de pluie varient considérablement entre 700 et 1400 MM. Mais avec

les changements climatiques, on observe souvent de décalage sensible dans l'installation des pluies et leur mauvaise répartition. La plus faible quantité d'eau recueillie depuis plus de trente ans était de 655 mm en 1988 et la plus forte est de 1379 mm en 1998 (Monographie Borgou-Alibori, 2019). Ainsi, comme dit plus tôt, nous constatons bien avec le graphique 2 que notre zone d'étude est bien traversée par un climat soudanien. L'analyse du graphe de cette figure montre que la commune de Kandi est gouvernée par un régime uni modal avec un maximum des pluies de 257,47mm en août. Les hauteurs mensuelles de pluie varient considérablement de 0 à 257,47mm. Les mois de novembre, décembre, janvier, février sont marqués par une sécheresse absolue caractérisée par l'harmattan (un vent sec et froid). La période de mi-mars à mi-octobre correspond à la saison pluvieuse avec le pic dans le mois d'août.

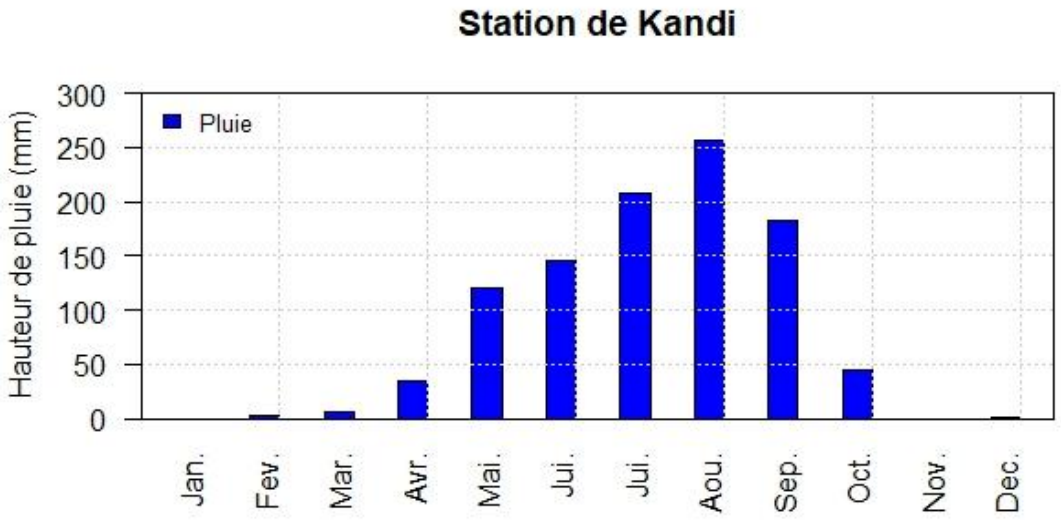


Figure 3 **: Evolution de la pluie depuis 1970 à 2015 (SIDI, 2022)**

1.1.2. Cadre physique de l'étude

1.1.2.1. Couverture végétale et pédologique

- Géomorphologie

Le relief de la commune de Kandi est très peu accidenté avec la prédominance d'un plateau s'étendant de Kandi à Gogounou d'une altitude de 200 à 300 m (PDC, 2015). Il est constitué de plateaux de grès entaillés par les vallées de la Sota (250km) et l'Alibori (338 Km) qui délimitent la commune à l'Est et à l'Ouest. On distingue aussi par endroit des collines faites

de roches dures telles que le granite et le quartzite (Monographie Borgou-Alibori, 2019). L'ensemble s'incline légèrement vers la vallée du Niger. La morphologie du relief comprend une série de cuesta aux sommets plats formée de cuirasses ou de grès ferrugineux (PDC, 2015).

- Sols

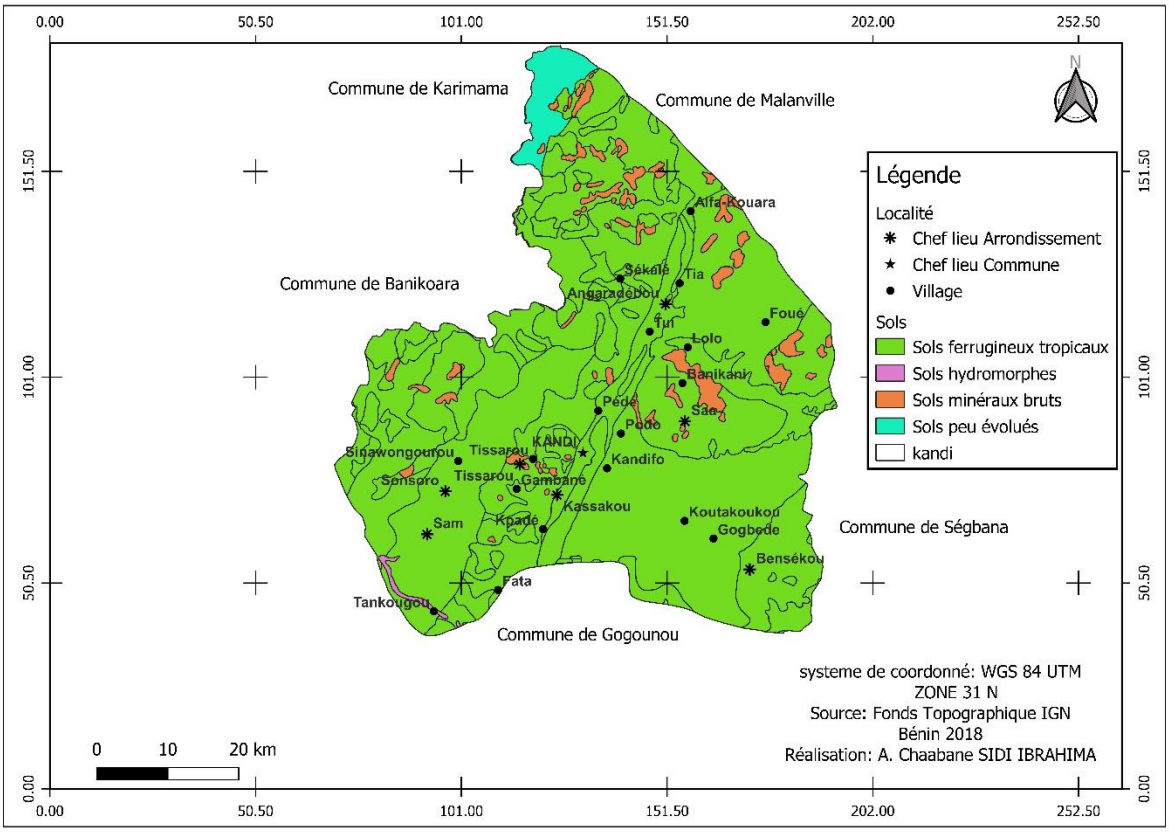


*Figure 4 :*Carte des formations pédologiques dans la commune de Kandi (SIDI, 2022)

Les sols de la commune de Kandi sont essentiellement de type ferrugineux tropicaux (Monographie Borgou-Alibori, 2019). Kandi est un domaine par excellence de sols ferrugineux qui résultent de l'altération de formations rocheuses en place (I. Youssouf et M. Lawani, 1981, p. 29). On y distingue aussi, les sols hydromorphes au Sud-Est de la commune montrant une permanente présence d'eau ; les sols de minéraux bruts et des sols évolués comme indiqué par la figure 3.

- Végétation

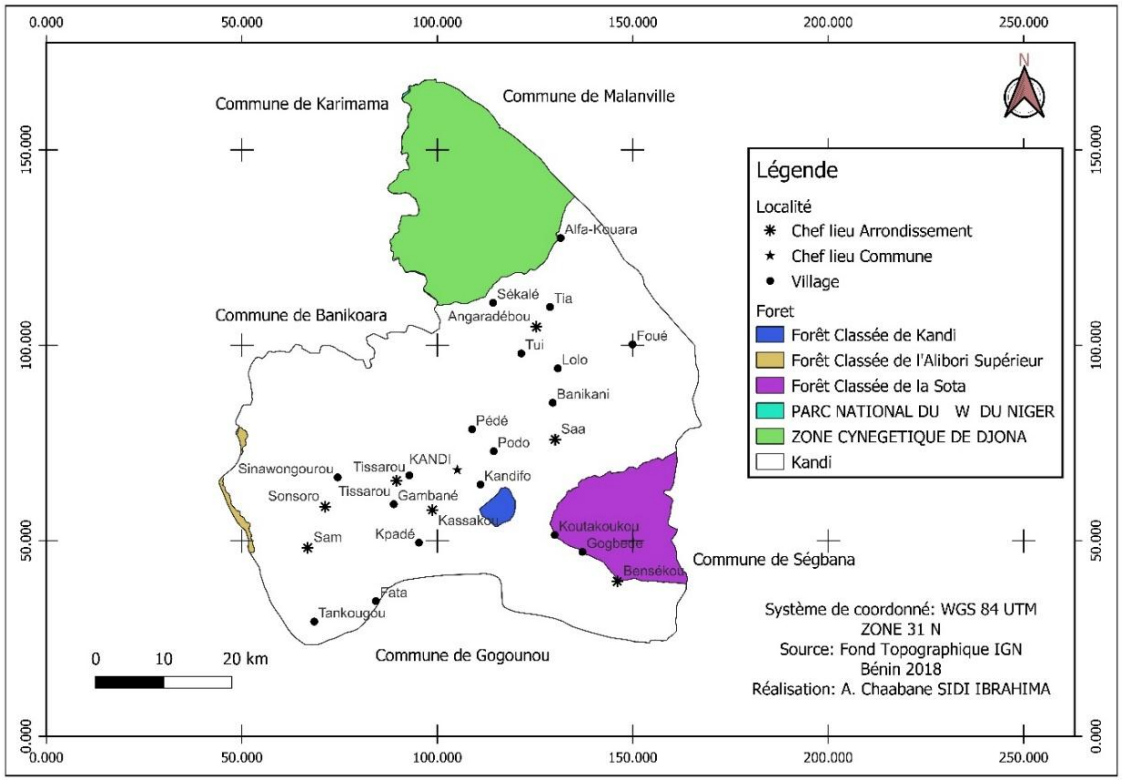


Figure 5 : Carte de la végétation dans la commune de Kandi (SIDI, 2022)

La végétation de la commune de Kandi est constituée de savane herbacée, arbustive et arborée avec quelques forêts galeries abritant une faune variée d'éléphants, de buffles, de céphalophes, de bubales (Monographie Borgou-Alibori, 2019). Comme illustré sur la figure n°4, cette dernière est formée de :

- Une savane arbustive clairsemée, dominée par des épineux dont l'Acacia seyal et l'Acacia siebenona au Nord et une savane arborée herbeuse fortement dégradée au Sud. On y trouve des arbres d'intérêt socio-économique comme Parkia biglobosa (néré), Butyrospermun Paradoxa (karité) et Adansonia digitata (baobab) qui sont des essences protégées.
- Les galeries forestières longent les cours d'eau, les vallons. Ces forêts sont peuplées d'essences telles que le caïlcédrat (Khaya Senegalensis), le faux acajou (khaya grandifolia) et le lingué (Afzélia africana). Cette végétation ainsi retrouvée dans cette commune se répartissent dans les forêts que comprend cette dernière. Partant des forêts classées au parc W qui a une petite portion à Kandi, on y retrouve une verdure non négligeable dont des espèces protégées.

- Les aires protégées :

Le parc W du Bénin et la zone cynégétique de la Djona ;

Les forêts classées (Alibori supérieur et Goun-Goun-Sota) qui occupent environ 55.540 ha du territoire communal. (PCC-SAP, 2019)

1.1.2.2. Géologie et hydrogéologie

- Géologie

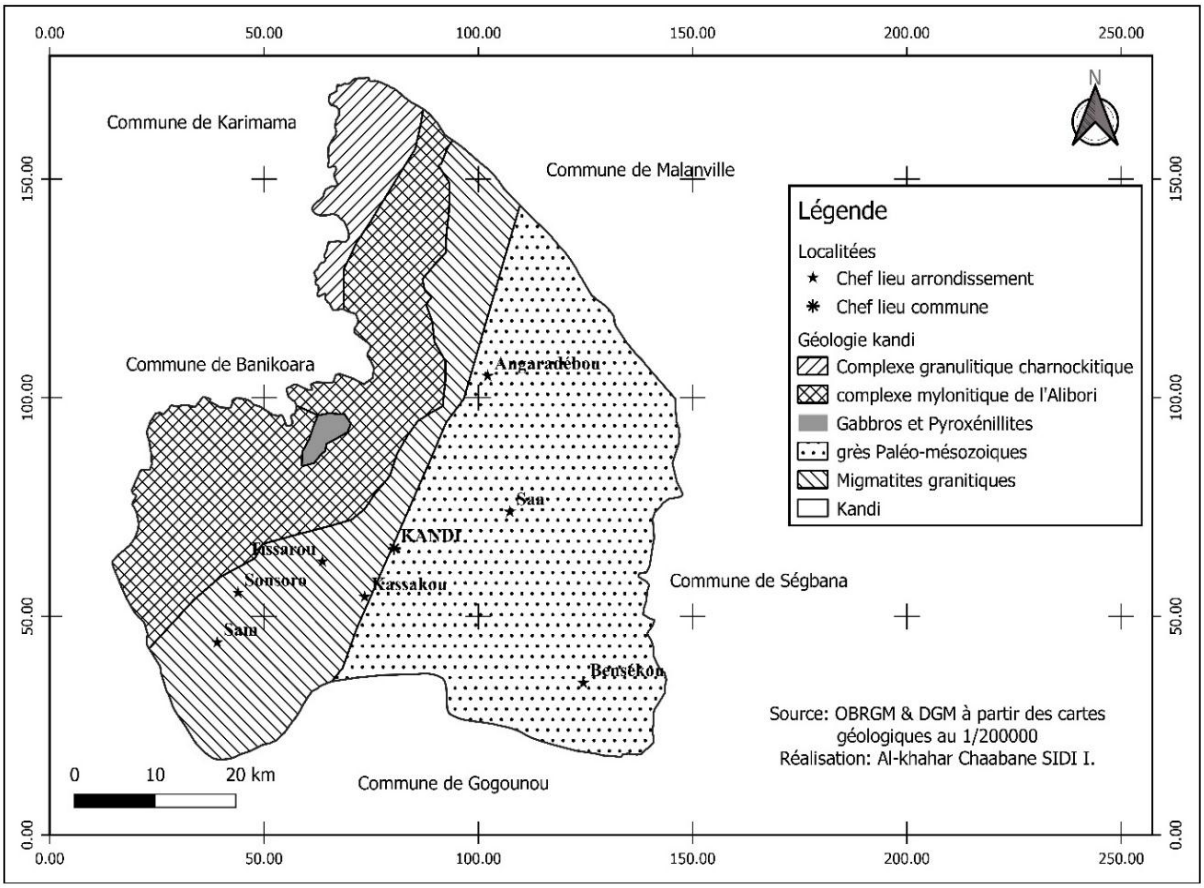


Figure 6 : Carte géologique de la commune de Kandi (SIDI, 2022)

La géologie de la commune de Kandi est d'une spécificité car elle renferme deux types de formation géologique. Ainsi, nous pouvons indiquer que cette commune compte en son sein des formations du socle et celles du sédimentaire. On distingue donc :

- La partie socle formé de :

Le socle ancien

On définit par le terme "socle ancien" l'ensemble des formations très métamorphisées du Dahoméen, de l'Atacorien et de la série de Kouandé-Boukombé ; des roches éruptives concordantes ou intrusives contenues dans ces formations. L'ensemble du socle a subi les orogénèses dahoméennes et/ou Atacoriennes et présente une orientation générale NNE - SSW.

Le Dahoméen

Cette formation est constituée de divers groupes pétrographiques tous très métamorphiques comprenant essentiellement des migmatites et des gneiss.

Le groupe de Kandi

Ce groupe très étendu est constitué de para gneiss plutôt sombres : gneiss à biotite, gneiss à biotite et amphibole, gneiss à amphibole seule

- Les séries sédimentaires

Il s'agit ici des séries qui se sont déposées après les dernières manifestations granitiques. Si on excepte celles du Buem (Précambrien Supérieur), toutes ces séries ne sont pas métamorphisées.

Les grès de Kandi

Ces formations constituent le plateau situé au N-E du Bénin. A la base de cette série, se trouve un conglomérat de galets de quartz à ciment siliceux; on trouve ensuite une série de grès variés à stratifications entrecroisées attestant de l'origine continentale de la formation.

- **Hydrogéologie**

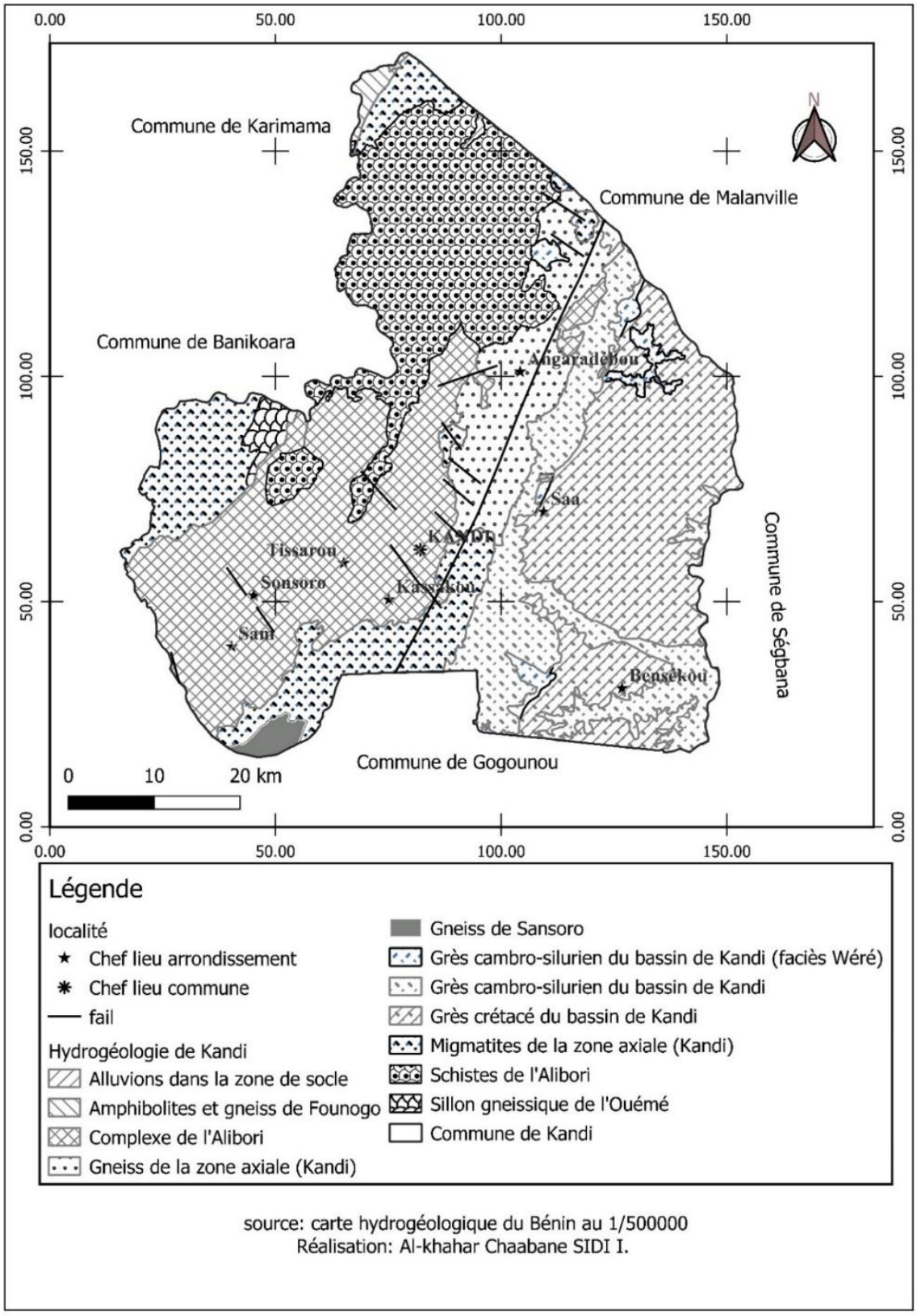


Figure 7 : Carte hydrogéologique de la commune de Kandi (SIDI, 2022)

L'hydrogéologie de la commune de Kandi est plus ou moins ancienne avec les âges allant du crétacé au dahoméen. Etant l'âge le plus récent dans l'hydrogéologie de Kandi, le crétacé se retrouve dans la partie sud-ouest de la commune. Elle est formée des grès du crétacé du bassin de Kandi, des grès grossiers, des silts et de l'argile. Généralement dans cette zone, les forages captent les grès du crétacé ou les grès cambro-silurien (les deux peu différentiables). D'âge supérieur, le cambro-silurien renferme ici deux faciès lithologiques. Distingués par leurs formations, les grès cambro-silurien du bassin de Kandi formé d'une part de grès fin, de silts et d'argile, diffère de celles du faciès de Wèrè d'autre part formé de conglomérats, de brèches et un complexe de grès avec silts et argiles.

S'en suit le Dahoméen et le protérozoïque indifférencié. Particulièrement formé dans un premier temps de gneiss, on y retrouve les gneiss de la zone axiale de Kandi formés de gneiss beiller granitique et d'amphibole, de gneiss de sansoro gneiss à muscovite et amphibole, de silon gneissique de l'Ouémé, gneiss à biotite, diorite et granite gneiss et le complexe de l'Alibori : gneiss à biotite, amphibole mylonitisés. Dans un second temps, il est formé de schistes, on y retrouve les schistes de l'Alibori formés de granulites retromorphosées en faciès schistes verts.

Avec un tel potentiel hydrogéologique, il est remarqué que les forages réalisés dans la commune sont nombreux dans l'ordre des 700 (699) forages avec des profondeurs oscillant entre 30 et 90 m en général avec un niveau d'eau compris entre 8 et 17 m. Avec un taux de réussite d'implantation compris entre 40 et 96%, ces forages débitent au maximum 1.3 à 8.2 m3/h selon le forage et on pour débit moyen 0.1 à 3.8m3/h/m.

1.2. Revue de littérature

La caractérisation physico-chimique des eaux souterraines est relative à l'analyse des paramètres influençant la qualité physico-chimique de ces eaux et de l'impact sanitaire de ces paramètres sur les eaux captées.

L'approvisionnement en eau potable pour les populations est un sujet très important pour les gouvernements du monde. Pour cela, ces derniers mettent tout en œuvre pour offrir aux populations de l'eau potable pour la consommation. Ainsi pour protéger la santé des populations, l'Etat du Niger, soutenu par les partenaires au développement a procédé à la réalisation de plusieurs points d'eau modernes captant les aquifères discontinus du socle fissuré et altéré censés fournir des eaux potables et pérennes (DJAHADI et al, 2021). Comme le Niger, le Bénin aussi s'inscrit dans la lignée. Par exemple à Dassa, dans sa politique nationale d'approvisionnement en eau potable, l'Etat a consenti beaucoup d'efforts dans la

réalisation des ouvrages hydrauliques afin de suppléer la SONEB qui peine à couvrir toute l'étendue du territoire national. Face à cette situation, il est important d'évaluer la qualité de l'eau de ces ouvrages dans cette commune et toute les autres où des forages sont réalisés non seulement par des structures publiques mais aussi par des particuliers pour assurer l'alimentation en eau de certaines communautés de la commune. Il est donc important de maîtriser les avantages et risques liés à l'utilisation de ce type d'ouvrage pour l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP). Cela passera en partie par l'analyse physico-chimique de ces eaux

Les paramètres physiques et chimiques comprennent la température, l'alcalinité, le pH, la conductivité, le TDS, l'oxygène dissous, l'ammonium, le phosphate, les nitrates, le sodium, le calcium et le magnésium. Outre ces paramètres, les éléments traces métalliques tels que le plomb ; le cadmium ; le zinc ; le cuivre ; l'arsenic ; le nickel ; le chrome sont des paramètres chimiques qui en fonction de leurs teneurs peuvent influencer la qualité physico-chimique des eaux souterraines. L'analyse des paramètres physico-chimiques succède à un échantillonnage d'eau dans les zones concernées par l'étude. Le choix des sites à prélever se fait à partir de plusieurs méthodes que sont le maillage, la méthode systématique, la méthode aléatoire, la méthode probabiliste, etc. La sélection des sites à prélever se fait à partir d'une distribution spatiale des points d'eaux de la zone (DJAHADI et al.2021).

L'étude de Maliki (1993) a notifié que la contamination physico-chimique des eaux souterraines par les nitrates est liée à un apport en matières azotées surtout d'origine anthropique. Boukari et al. (1996) ont également mis en évidence une pollution d'origine anthropique par nitrate, phosphate et potassium dans les secteurs de Togbin-Dèkoungbé, le pourtour Sud du lac, tout Cotonou-centre à l'Ouest du Chenal dans les eaux souterraines in HOUEMENOU, 2020.

Les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et de l'Union Européenne (UE) définissent les valeurs limites du ph (6,5-8,5), de la conductivité (80-1000µS/cm), des nitrates NO_3^- (50 mg/l) et aussi de plusieurs paramètres liés à la qualité d'une eau de boisson. D'après l'étude de S. Rabilou et al en 2018, les teneurs en nitrates varient de 1.5 à 149.96 mg/l ce qui dépasse la norme recommandée par l'OMS. De même, dans les travaux de Rabilou et al en 2018, les teneurs en ph et de sodium varient respectivement de 5 à 7.13 au lieu de 6.5-8.5 pour le ph et de 0 à 324 au lieu de 200mg/l pour le sodium. De l'étude menée par Mahamane et Guel en 2015 sur la physico-chimie des eaux souterraines, les résultats obtenus révèlent que le fer, le manganèse et le thallium déclassent les eaux souterraines

comme eau de boisson dans la localité de Yamtenga au Burkina-Faso par contre la présence dans l'eau des ETM tels que le zinc (valeurs obtenues inférieures à la norme de l'OMS « 3mg/l ») et le cuivre (valeurs obtenues inférieures à la norme de l'OMS « 2mg/l ») ne présentent aucun danger à la consommation dans cette localité.

D'un point de vue sanitaire, les paramètres physico-chimiques impactent les eaux souterraines de sorte à les polluer en fonction de leurs concentrations dans ces dernières et cela pourrait engendrer des maladies aux populations qui s'alimentent à partir de ces eaux. Selon l'étude de F. HOUEFONDE sur la caractérisation physico-chimique, la consommation de telles eaux peut engendrer la fluorose dentaire et osseuse ainsi que la méthémoglobinémie, l'hémochromatose primitive, les troubles neurologiques irréversibles. Ahoudi et al.2015 quant à lui déduit de son étude que la présence dans l'eau du cadmium, du plomb et du Nickel bien que ces eaux soient polluées ne présente pas de risques pour la santé de la population.

1.3. Clarification conceptuelle

- Qualité de l'eau :

La qualité de l'eau fait référence aux caractéristiques chimiques, physiques, biologiques et radiologiques de l'eau, des eaux de surface, des eaux profondes et des eaux souterraines. C'est une mesure de l'état de l'eau par rapport aux besoins d'une ou plusieurs espèces biotiques ou à tout besoin ou but humain. Elle est utilisée plus fréquemment en référence à un ensemble de normes permettant d'évaluer la conformité de cette dernière. Les normes les plus couramment utilisées pour évaluer la qualité de l'eau sont liées à la santé des écosystèmes, à la sécurité des contacts humains et à l'eau potable (www.aquaportail.com).

- Pollution des eaux souterraines

Bien que se trouvant en profondeur, les eaux souterraines peuvent être polluées. Malgré les nombreux filtrages que subissent ces eaux, il est toujours possible qu'elles contiennent des bactéries ou des éléments indésirables. En effet, les puits sont généralement pollués par la pénétration d'impuretés par les ouvertures, la contamination par la présence de fosses septiques, les fuites des conduits d'égouts, l'infiltration des dépotoirs ou les terrains d'enfouissement et les activités menées autour des puits. Avec la pluie, les eaux sont entraînées en partie par ruissellements et en partie par infiltration dans la nappe contribuant ainsi à sa recharge, mais aussi à sa pollution par l'entraînement des matières organiques et minérales de la surface. De plus, les activités anthropiques comme l'agriculture à travers les

intrants chimiques, les industries à travers les rejets… sont bien des sources de pollution qui modifie la qualité physico-chimique de l'eau (HOUEFONDE, 2014).

- Paramètres physico-chimiques de l'eau

Bien que la contamination de l'eau de boisson peut être d'origine naturelle, elle peut être aussi d'origine chimique et peut aussi entraîner un certain nombre de problèmes graves pour la santé. Les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), les normes de l'Union Européenne (UE) et les normes béninoises relatives à la qualité physico-chimique de l'eau de boisson sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Critères physico-chimiques pour une eau de boisson.

	Valeurs indicatives		
Eléments	OMS	UE	BENIN
Couleur	15	-	15 UcV
Turbidité (NTU)	5	5	5
pH	entre 6.5 et 9.5	≥ 6,5 et ≤ 9,5	6.5 < pH < 8.5
Conductivité (µs/cm)	2500	2500	2000
Ammonium (mg/L)	0.3	0.50	0.5
Nitrates (mg/L)	50	50	45
Nitrites (mg/L)	0.2	0.50	3.2
Sulfates (mg/L)	500	250	500
Fluorures (mg/L)	1.5	1.5	1.5
Phosphates (mg/L)	-	-	5
Fer total (mg/L)	0.5	0.2	0.3
Chlorure (mg/L)	250	250	250
Magnésium (mg/L)	-	-	50
Calcium (mg/L)	-	-	100
Dureté total	200	-	200

Source : (Directive de l'OMS, 2006 ; UE, 1998 ; norme béninoise, 2001)

- Eaux souterraines

Les eaux souterraines 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 (https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Eau_souterraines). Les eaux souterraines proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Celles-ci s'insinuent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches, humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable. Là, elles s'accumulent, remplissant le moindre

vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé aquifère. La nappe chemine en sous-sol sur la couche imperméable en suivant les pentes, parfois pendant des dizaines voire des centaines de kilomètres, avant de ressortir à l'air libre, alimentant une source ou un cours d'eau. Les nappes souterraines fournissent ainsi presque le tiers du débit total de tous les cours d'eau de la planète, soit environ 12 000 kilomètres cubes d'eau par an (AVOCANH, 2014).

- Eau potable

L'eau potable est une eau ayant des caractéristiques microbiennes, chimiques et physiques qui répondent aux directives de l'OMS ou aux normes nationales relatives à la qualité de l'eau de boisson (OMS).

Afin de s'assurer de la qualité, de la potabilité des eaux de cette commune, il est donc nécessaire de passer à l'analyse de ces paramètres. Comment doit-on donc procéder pour le faire ?

Chapitre II : Approche méthodologique

La démarche méthodologique adoptée comprend trois étapes :

1-la recherche documentaire ;

2- la collecte des données et ;

3- le traitement de celles-ci.

2.1. Recherche documentaire

Cette étape de la méthodologie a été celle des recherches sur le net, dans les bureaux d'études, les bibliothèques et sociétés sur notre cadre d'étude. Cette recherche a été orientée vers tous les documents ayant rapport avec notre thème. Nous avons aussi eu besoin des textes concernant la détermination des Indices de Qualité de l'Eau (IQE) afin de déterminer la qualité des eaux concernées. La collecte de données a permis d'avoir des informations générales sur notre zone d'étude.

2.2. Collecte des données

Cette étape a été pour nous l'occasion de faire nos investigations et de recueillir des informations nécessaires à notre étude à travers la campagne d'échantillonnage. En plus, nous avons eu à faire la collecte des données relatives aux sources d'alimentation de la zone d'études, aux différentes activités menées dans les alentours de la zone d'études et aux zones de rejet afin de pouvoir identifier les sources des éléments chimiques présents dans l'eau étudiée.

- Campagne d'échantillonnage

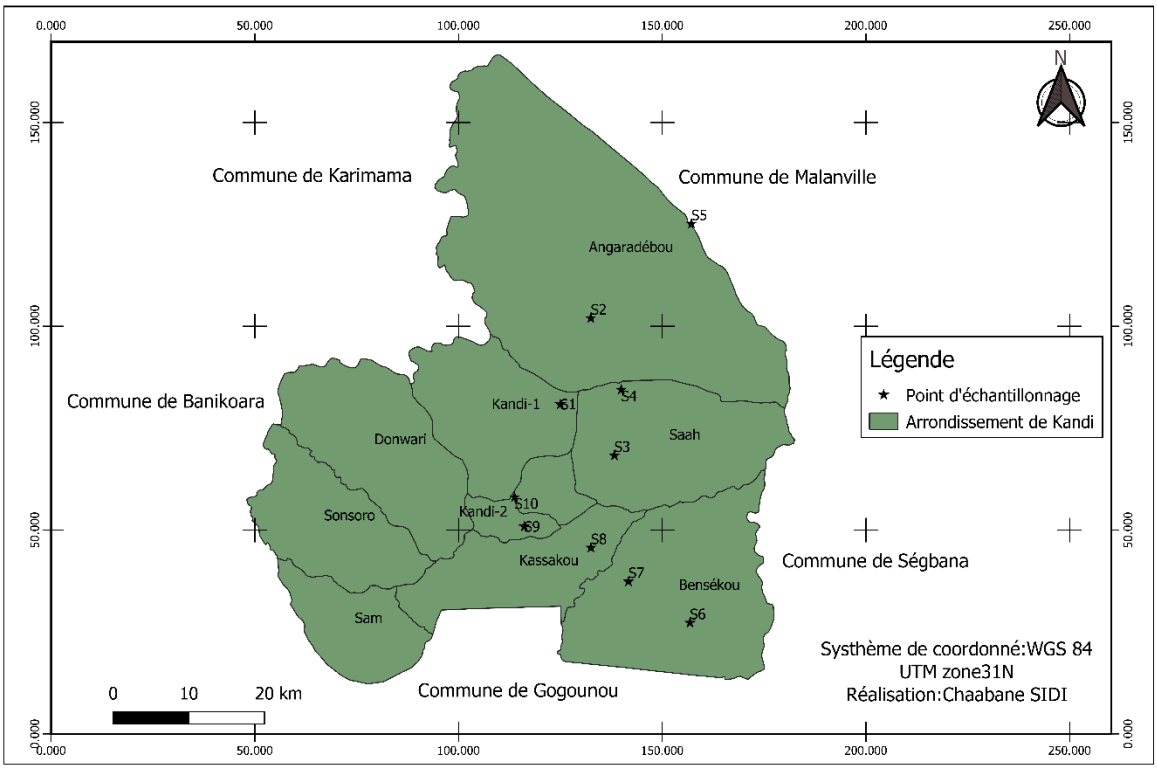


Figure 8 : Carte de spatialisation des points d'échantillonnage dans la commune de Kandi (SIDI, 2022)

Le prélèvement des échantillons pour analyses chimiques est d'une grande importance puisque les résultats reflètent directement les caractéristiques chimiques de l'eau prélevée. Le but de l'échantillonnage est d'avoir un échantillon bien représentatif de l'état complet du milieu d'études. Pour cela, des règles sont à suivre au moment de l'échantillonnage, au cours du transport et au cours de la conservation. Ainsi, pour ce faire, le logiciel Qgis a été utilisé pour réaliser la carte de spatialisation (figure 8) des différents points d'approvisionnements d'eau dans la commune afin de réaliser une sélection de point d'échantillonnage qu'on a estimé pouvoir combler les attentes suscitées par notre thématique. Les points d'échantillonnage de notre campagne ont été choisis par la méthode aléatoire pour répondre à nos besoins. La période allant du lundi 21 au jeudi 24 novembre 2022 a été la période où nous avons décidé de passer aux travaux de terrain. Elle a concerné la principale source d'approvisionnement en eau de la population de Kandi, c'est-à-dire, les AEP, principalement les pompes à motricité humaine. Elle a concerné la portion de la commune qui s'étend sur le Bassin Sédimentaire de Kandi (BSK) c'est-à-dire, dans les arrondissements de Bensékou,

Angaradébou, Kandi II, Kandi III et Saah, le tout en 10 points de prélèvement illustrés ici sur la *figure 8*.

❖ Avant l'échantillonnage :

- Les bouteilles utilisées pour les prélèvements d'eau ont été préalablement lavées et rincées au laboratoire, ensuite rincées avec l'eau à prélever sur le terrain ;
- Les instruments utilisés pour relever les différents paramètres in situ ont été calibrés.

L'échantillonnage a été réalisé selon les règles normales concernant chaque infrastructure rencontrée lors de la campagne.

❖ Pendant l'échantillonnage

Au cours de l'échantillonnage, il a été suivi le protocole d'échantillonnage afin de pouvoir aboutir à nos objectifs. Le GPS a été utilisé pour confirmer les points de prélèvement qui, par Google maps, ont été repérés et dont la fonctionnalité nous a permis de nous rendre au différents points. Pendant cette campagne, il a aussi été question du manque d'information sur les forages hors d'usage (non fonctionnel) véritable casse-tête qui nous a obligé à changer certains de ces points choisis au préalable. La question de la barrière de la langue persiste toujours car faute de compréhension de la langue, il m'a été difficile pour la majorité des points échantillonnés de parler aux populations afin de me faciliter la campagne.



Photo 1 : Photos prises lors du prélèvement.

❖ Après l'échantillonnage

Après la campagne, les échantillons ont été conservés dans les normes requises comme par exemple, à une température assez basse, puis transporté vers le LHA où ont été réalisées les analyses chimiques. Il s'en est donc suivi l'étape de traitement de données.

- Outils de collecte

La campagne d'échantillonnage réalisé a été possible grâce à des appareils qui nous ont permis de réaliser cette dernière avec moins de difficulté. Nous évoquons ici :

-un téléphone portable pour la prise d'image, un stylo pour noter les mesures, un GPS pour repérer les sites d'échantillonnage choisi à l'aide du maillage préalablement fait, des bouteilles plastiques pour recueillir les échantillons d'eau, une glacière pour conserver les échantillons 'intacts' jusqu'au laboratoire et éventuellement de quelques substances chimiques pour éviter l'altération des éléments à analyser dans l'échantillon, un appareil multi paramètre pour la mesure des paramètres in-situ comme : le pH, la température, la conductivité..., un carnet de notes pour recenser les différents changements enregistrés au cours de la campagne d'échantillonnage, marqueur pour l'étiquetage des échantillons prélevés, moyen de déplacement pour aller d'un point à un autre.

Pour le traitement des données, nous aurons besoin d'un ordinateur sur lequel sont installés les logiciels tels que : Microsoft Word pour la rédaction du mémoire, Excel pour le traitement de données, R studio pour la réalisation des graphiques, Qgis et surfer pour la réalisation des cartes thématiques.

Certaines de nos données ont été obtenue au niveau des structures compétentes comme la DGEau et des bureau d'études.

2.3. Traitement des données

Le traitement des données est l'étape cruciale du travail fait. C'est la partie dans laquelle, il est réalisé l'examen des paramètres mesurés sur le terrain et au laboratoire et par la suite l'interprétation des résultats afin de pouvoirs infirmer ou confirmer nos hypothèses en réponses provisoires à nos objectifs. Ce dit traitement a été fait grâce au logiciel R studio. L'interprétation faite de ce traitement nous a permis de voir les variations des données concernant les paramètres physico-chimiques selon la période. Le logiciel Microsoft Word nous a permis de rédiger le mémoire et le logiciel Excel pour le traitement des données d'analyse.

- Paramètres mesurés in situ

Les paramètres tels que le pH, la température, la conductivité, la salinité, la turbidité ont été mesurés sur le terrain avec un multi paramètre.

- Paramètres mesurés au laboratoire :

Les paramètres mesurés au laboratoire concernent les paramètres chimiques que sont les ions majeurs et les ions mineurs. Cette analyse reste possible grâce à une conservation préalablement faite des échantillons de terrains de manières à ne permettre aucune réaction chimique entre les éléments de l'eau. C'est-à-dire, ajouter les conservateurs nécessaires à chaque élément chimique tout en le conservant à une température basse 4°C durant le temps avant l'analyse.

- Analyse de laboratoire

Les analyses chimiques ont été réalisées au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée. Les éléments concernés par les analyses chimiques sont : les nitrates, le manganèse, le fer, le fluorure, l'ammonium, le calcium, le magnésium, le bicarbonate, le chlorure, la dureté de l'eau…en fonction des eaux échantillonnées. Ils ont été analysés à l'aide d'un colorimètre par la méthode colorimétrique.

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 colorimètre spectrophotomètre à la longueur d'onde de 425 nm.

Dosage des nitrates

Pour le dosage des nitrates, nous avons utilisé la méthode au Salicylate de Sodium indiquée par Rodier et al. (2009). 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 $\lambda = 425nm$.

Dosage des nitrites

Nous avons utilisé la méthode au Réactif de Zambelli pour le dosage des nitrites (Rodier et *al*, 2009). 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.

Dosage de l'orthophosphate

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.

Dosage des bicarbonates

Le dosage des bicarbonates s'est fait par la méthode volumétrique. Elle est basée sur la neutralisation des bicarbonates dans 100 ml d'eau par l'acide chlorhydrique en présence d'un indicateur coloré (indicateur mixte) (Rodier, 2009).

Dosage du sulfate

Pour le dosage du sulfate, la méthode utilisée est la méthode néphélométrique. Les sulfates sont précipités en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum. Ce précipité est stabilisé à l'aide d'une solution de polyvinyl-pyrrolidone. Les suspensions homogènes de sulfates sont mesurées au spectrophotomètre d'absorption moléculaire (Zogo, 2016).

Dosage du calcium

On a utilisé dans ce dosage, la méthode volumétrique. Elle est basée sur la neutralisation des calciums par la liqueur complexométrique en présence d'acide chlorhydrique, d'un indicateur et du NaOH (Zogo, 2016).

Dosage du magnésium

Pour le dosage du magnésium, on a utilisé la méthode volumétrique. Elle se base sur la neutralisation du magnésium par la liqueur complexométrique en présence d'un indicateur, de l'acide chlorhydrique et de l'ammoniac concentré (Zogo, 2016).

Dosage du chlorure

Pour ce dosage, la méthode volumétrique est celle utilisée. A cet effet, on dosera le chlore combiné à l'état chlorure par le nitrate d'argent, en présence de chromate de potassium comme indicateur coloré (Zogo, 2016).

Dosage des fluorures

Les fluorures contenus dans l'échantillon sont séparés des autres constituants par distillation en milieu acide. Le distillat est mélangé avec une solution d'alizarin et de lanthane pour former un complexe bleu dont l'absorbance à 620nm est proportionnelle à la concentration des fluorures. (CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2014)

- Analyse de la qualité et de la potabilité des eaux souterraines

Appréciation de la qualité des eaux souterraines

Les valeurs brutes des paramètres physico-chimiques obtenues ont servi au calcul de l'Indice de Qualité des Eaux (IQE). L'IQE, par définition, est une méthode qui permet de déterminer le potentiel d'utilisation d'une eau en comparant sa qualité observée avec 1es critères de qualité exigés pour différents usages (Michel Provencher, 2013). C'est une technique de classification de la qualité de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes internationales ou nationales béninoises dans le cadre de cette étude. Il résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes simples (Excellente, Bonne, Mauvaise, Très mauvaise, etc.). Dix-sept (17) utilisations de l'eau ont été considérées et 1es paramètres importants pour chaque classe d'utilisation ont été déterminés. Etant donné le très grand nombre de paramètres pouvant être considéré, i1 a fal1u faire un choix. Chaque classe d'utilisation possède ses propres besoins et chacun des groupes de paramètres que nous avons retenus, par classe, fut choisi de façon à représenter 1e mieux possible 1es exigences de celle-ci. Les paramètres ainsi définis pour une eau destinée à la consommation sont : la couleur apparente, les solides dissous, la turbidité, les coliformes fécaux, l'alcalinité totale, le chlorure, la dureté, les nitrates, l'oxygène dissous, le pH et les sulfates qui sont les paramètres de base et, les fluorures, les phénols et le mercure qui sont des paramètres complémentaires. Mais ceux utilisés dans notre étude ici sont : le pH, la température, la conductivité, les TDS, les nitrates, les nitrites, les sulfates, le phosphate, l'ammonium, calcium, magnésium, fluorure et les chlorures. Dans cette étude, l'indice IQE est appliqué pour estimer l'influence des facteurs naturels et anthropiques sur la base de plusieurs paramètres clés du chimisme des eaux. Il est calculé en suivant la méthode de l'indice arithmétique pondéré (Brown et al., 1970 ; Brown et al., 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Yidana et Yidana, 2010). Dans cette approche, une valeur numérique appelée poids relatif (Wi), spécifique à chaque paramètre physico-chimique est calculée selon la formule suivante :

$$\mathrm{Wi} = \frac{k}{Si}$$

Où : k : constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\mathrm{K} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}(1/Si)}$$

Où : n : nombre de paramètres ; Si : valeur maximale de la norme standard béninoise des eaux de consommation (Normes de qualité des eaux destinées à la consommation, de l'eau potable en République du Bénin, 2001) de chaque paramètre en mg/l sauf pour le pH, la T°C et la conductivité électrique. Ensuite, une échelle d'évaluation de la qualité (Qi) est calculée pour chaque paramètre en divisant la concentration par la norme dudit paramètre et en multipliant l'ensemble par 100 comme dans la formule suivante :

$$Q_i = \left(\frac{Ci}{Si}\right) \times 100$$

Avec Qi = échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre ; Ci : la concentration de chaque paramètre en mg/l. Finalement l'indice global de la qualité de l'eau est calculé par l'équation suivante :

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^{n} Qi \times Wi}{\sum_{i=1}^{n} Wi}$$

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau IQE (Tableau 3).

Tableau 3 : Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE (Brown et al., 1972 **;** Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Aher et al., 2016).

Classe de IQE	Type d'eau	Usage possible
0-25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
>25-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
>50-75	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
>75-100	Très mauvaise qualité	Irrigation
>100	Eau non potable	Traitement approprié requis avant utilisation

Aussi, la qualité des eaux souterraines du BSK dans la commune de Kandi a été appréciée suivant l'étude des paramètres de pollution et l'interprétation d'une grille simplifiée (tableau 4) à savoir la conductivité électrique et les ions chlorures qui renseignent sur la qualité minéralogique des eaux puis les nitrates qui constituent des indicateurs d'une pollution d'eau souterraine (*Nordine Nouayi and al, 2015*).

Tableau 4 : Grille simplifiée pour l'évaluation de la qualité globale des eaux souterraines.

	Paramètres		
	Conductivité Électrique µS/cm	Chlorures mg/l	Nitrates mg/l
Excellente	Inférieure à 400	Inférieure à 200	< 5
Bonne	400-1300	200-300	5-25
Moyenne	1300-2700	300-750	25-50
Mauvaise	2700-3000	750-1000	50-100
Très mauvaise	Supérieure à 3000	Supérieure à 1000	>100

L'indice de Pollution Organique a été également appliqué à ces valeurs. L'indice de pollution organique (IPO) de Leclercq (2001) a été utilisé pour évaluer la charge organique des eaux analysées. Son principe est de répartir les valeurs des éléments polluants en 05 classes (Tableau n°5). Cet indice s'obtient au moyen des valeurs des ammoniums, Nitrites et des phosphates. Le principe du calcul est de répartir les valeurs des trois éléments polluants en cinq classes et de déterminer, à partir des valeurs obtenues dans l'étude, le numéro de classe correspondant pour chaque paramètre en se servant des données moyennes du tableau. L'indice de pollution organique final est la moyenne des classes de pollution pour l'ensemble des paramètres.

Tableau 5 : Grille des classes de l'indice de pollution organique (Leclercq, 2001)

Paramètres Classes	Ammonium (mg/L)	Nitrites (µg/L)	Phosphates (µg/L)
5	< 0,1	5	15
4	0,1 – 0,9	6 – 10	16 – 75
3	1 – 2,4	11 – 50	76 – 250
2	2,5 – 6	51 – 150	251 – 900
1	>6	>150	>900

Tableau 6 : Grille des classes de l'indice de pollution organique (Leclercq, 2001)

Moyenne des classes	Caractérisation de la pollution organique
5 – 4,6	Nulle
4,5 – 4	Faible
3,9 – 3	Modérée
2,9 – 2	Forte
1,9 – 1	Très forte

La démarche méthodologique ci-contre nous permet de faire l'étude des caractéristiques des eaux souterraines de la commune de Kandi. Ainsi, la commune a-t-elle une eau de bonne qualité ?

Chapitre III : Résultats et discussion

L'analyse des paramètres de ces eaux a été concluante.

3.1. Résultats

Au terme des différents travaux effectués sur le terrain et au laboratoire conformément aux méthodes décrites dans le chapitre précédent, la qualité physico-chimique des eaux de forage utilisé pour l'approvisionnement en eau potable dans la commune de Kandi est connue. A partir des histogrammes présentant les niveaux de variation des paramètres physico-chimiques, les teneurs en éléments chimiques ont été appréciées puis comparées à la norme relative à la qualité des eaux souterraines destinées à la consommation en République du Bénin ; par la suite, en s'appuyant sur le tableau N°1 présentant les normes de qualité des eaux souterraines destinées à la consommation au Bénin et les directives de l'OMS pour une eau de consommation. En suite grâce à cette interprétation, on a eu à analyser la qualité de cette dernière.

3.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux utilisées pour l'approvisionnement des populations en eau dans la commune de Kandi.

- Paramètres physiques
  - Ph et TDS

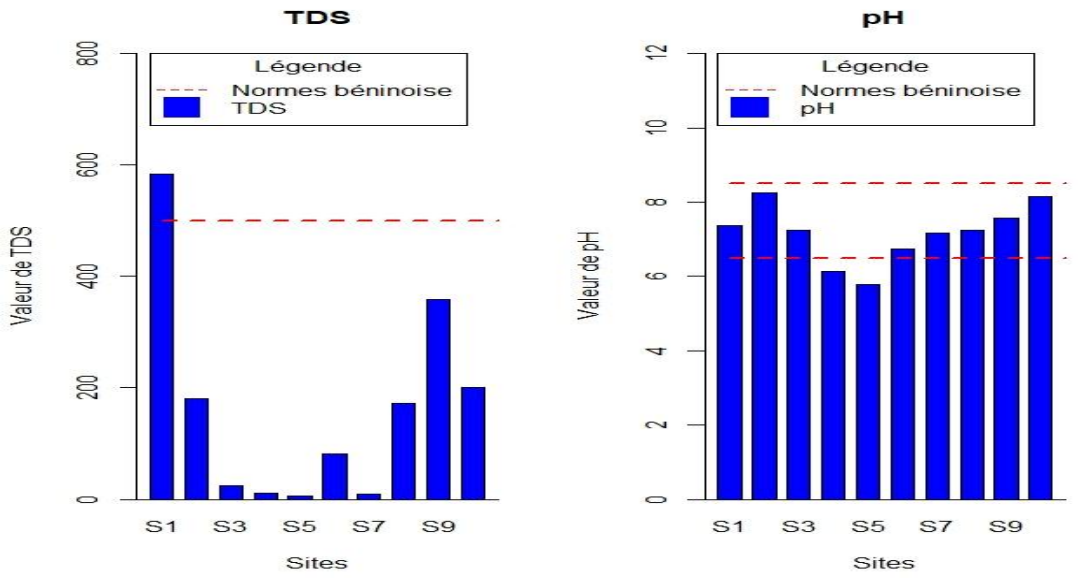


Figure 9 : Variation des TDS et du Ph selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)

De l'analyse de cette figure, il ressort que les teneurs en ph des eaux échantillonnées sont dans les normes de qualité à l'exception des échantillons de EPP LOLO et de Drogine. Avec

des valeurs de potabilité de ph entre 6.5 et 8.5 (norme béninoise), les eaux de la commune de Kandi ont des valeurs conformes à l'exception des eaux des échantillon 5 et 6. Avec la valeur plus faible (06 ppm) et plus forte (584 ppm), les valeurs de TDS relevées sur le terrain quant à elles présentent une seule valeur supérieure à la norme béninoise. En effet, la norme béninoise de potabilité de l'eau fixe la teneur acceptable à 500ppm ce qui est dépassée par l'eau de l'arrondissement de Idokofo qui ainsi ne respecte pas la norme de potabilité.

- Conductivité et Température

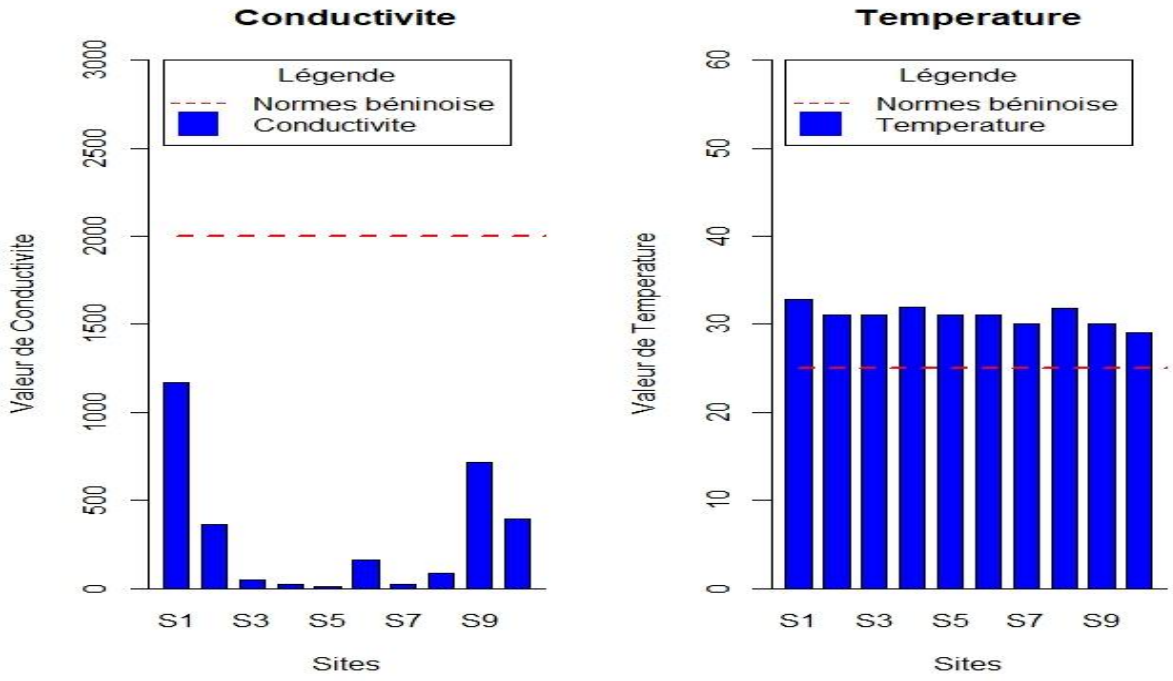


Figure 10 : Variation de la conductivité et de la température selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)

De l'observation de la figure ci-dessus, on remarque que toute les eaux prélevées ont une valeur de conductivité dans les normes. Avec pour valeurs la plus élevée 1168 µm/cm à Idokofo et plus faible 12 µm/cm à Lolo, les conductivités relevées sur le terrain sont dans les normes de potabilité de l'eau de consommation. On observe également que les températures relevées sont plus élevées que celles de la norme de potabilité recommandée par les textes béninois. En effet, avec plus forte valeur de température 32.8 relevée à Idokofo et plus faible 29 °C relevée à Soukoussou Béri, les températures mesurées sur le terrain sont bien supérieures au 25 °C requis dans les normes béninoises.

- Paramètres chimiques :
    - Nitrate et Nitrite

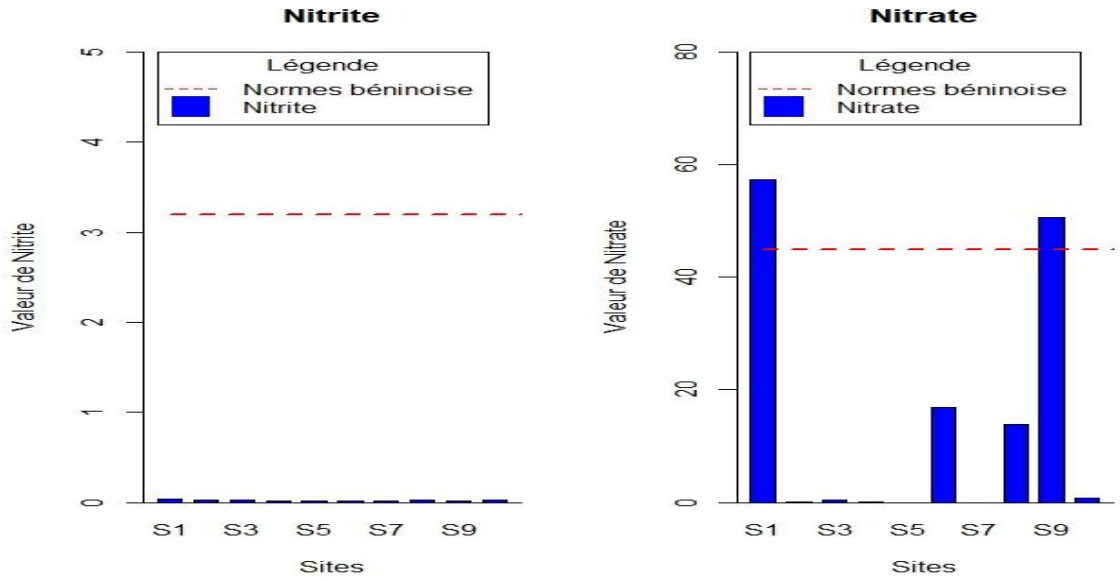


Figure 11 : Variations de la concentration en nitrate et en nitrite selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)

De cette figure, il est a remarqué que les valeurs en nitrite dans la commune se valent, c'est-à dire elles sont plus ou moins égales. De plus, il est très important de notifier que ces dites valeurs sont très inférieures à celles de la norme sur la potabilité de l'eau en République du Bénin. Par contre, sur cette même figure, on remarque que seuls deux sites à raison de 57,29 et de 50,60 mg/l sont au-dessus du seuil recommandé de 45 mg/l. Il est donc à remarquer que seuls deux sites, Idokofo et sota peulh, ont une concentration en nitrate supérieure à la norme de potabilité de l'eau au Bénin.

- Ammonium et Alcalinité

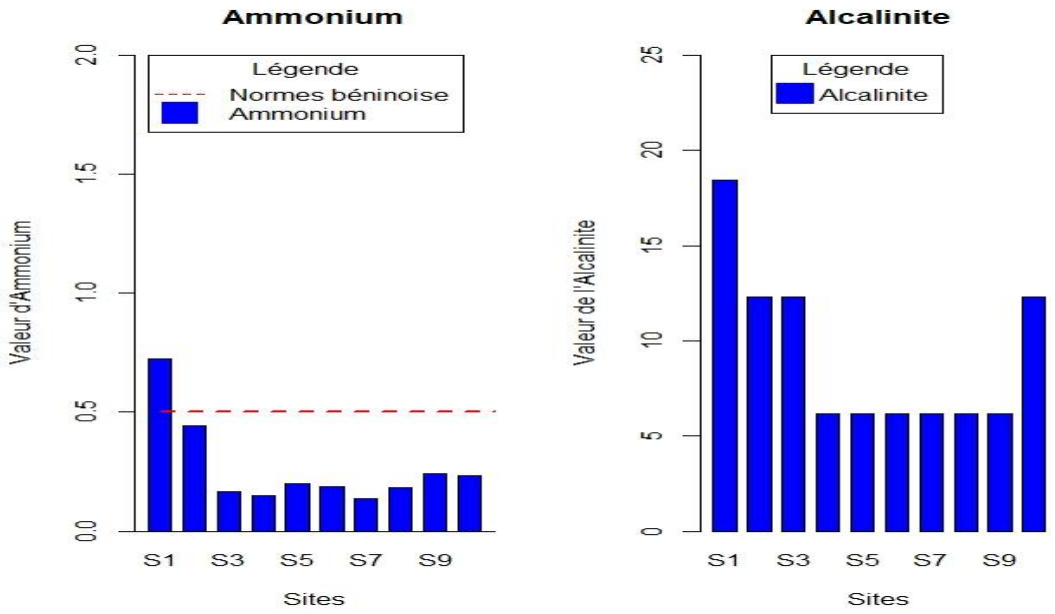


Figure 12 : Variations de la concentration de l'ammonium et d'alcalinité selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)

De cette figure, il est à remarquer que les concentrations en ion ammonium des eaux de consommation dans cette commune sont non négligeables avec des seuils allant de 0.13 mg/l, valeur la plus faible, à 0.72 mg/l, valeur la plus forte et supérieurs au seuil de potabilité considérée par les normes béninoises qui la fixe à 0.5 mg/l. Il est donc à retenir que seules les eaux de Idokofo sont polluées en ion ammonium. De plus, on observe aussi les teneurs d'alcalinité sur cette même figure. On peut en dire que ces teneurs varient de 6.15 mg/l dans les arrondissements de Bensékou et Angaradébou et dans les localités de Drogine et Louci, à 18.45 mg/l à Idokofo.

- Sulfate et orthophosphate

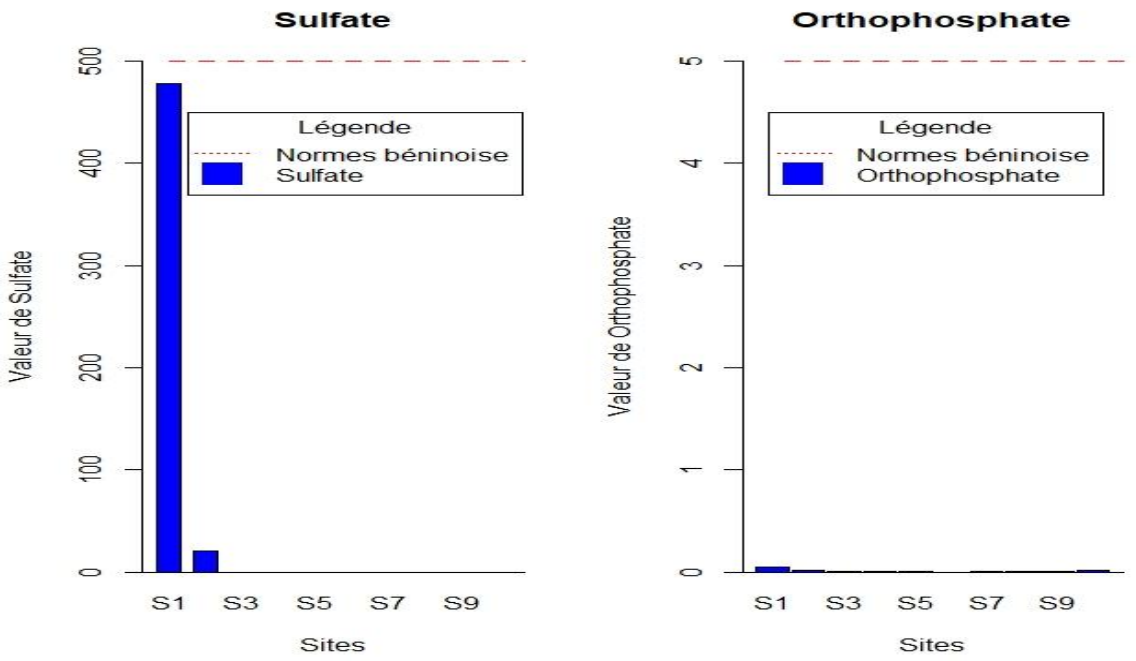


Figure 13 : Variations de la concentration de sulfate et d'orthophosphate selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)

De l'analyse de cette figure, on remarque que seuls trois (03) sites ont des concentrations en sulfates sur les dix (10) avec plus faibles, 3,14 mg/l à Louci et plus fortes, 478,59 mg/l à Idokofo qui, bien qu'élevées n'atteignent pas le seuil de non potabilité de l'eau fixé par la norme béninoise à 500 mg/l. De cette même analyse, il ressort que la plus forte valeur de concentration à 0,04 mg/l à Idokofo est très inférieure à 5 mg/l pour le seuil de potabilité. On retient donc que les concentrations en phosphate de ces eaux sont très faibles, donc très inférieures à la norme de potabilité considérée.

- Calcium et Magnésium

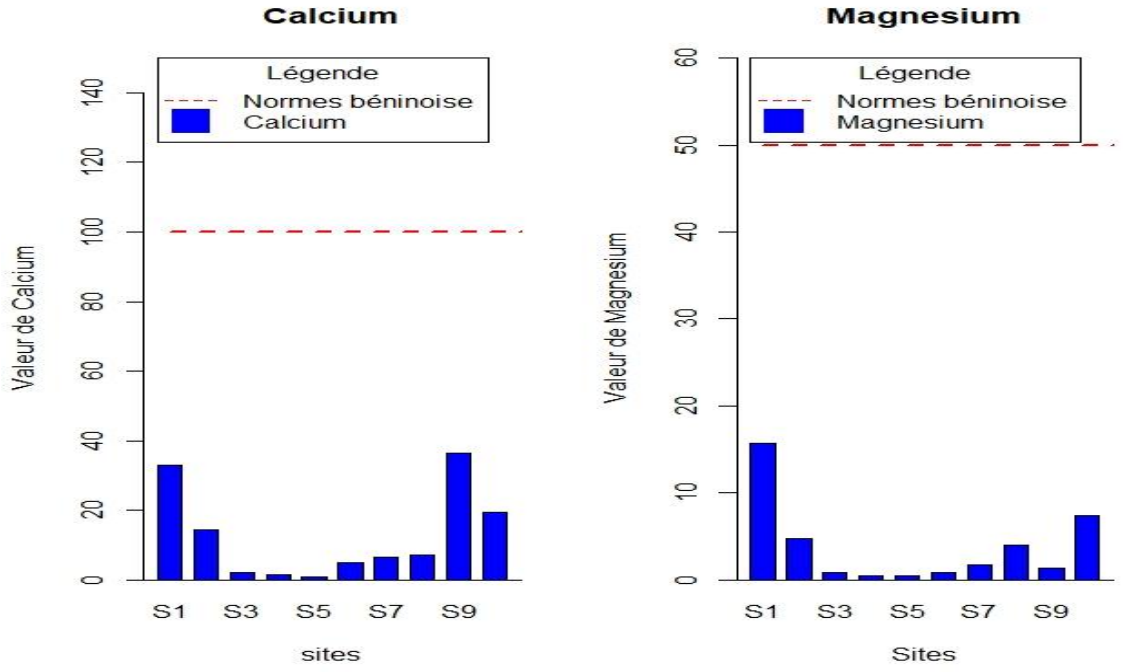


Figure 14 : Variations de la concentration de calcium et magnésium selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)

D'après l'analyse de cette figure, nous remarquons que les concentrations en calcium dans les différentes eaux sont très fables. En effet, ayant pour faible valeur de concentration 0.77 mg/l relevée à Drogine et pour forte concentration 36.44 mg/l relevée dans l'eau de Louci, la concentration de ces différentes eaux prélevées sont dans les normes de potabilité de l'eau. Avec des valeurs de concentration bien inférieures à la moitié de la valeur de la norme qui est de 100 mg/l pour les eaux potables, toutes les eaux prélevées pour analyse sont de concentration conforme. Sur cette même figure, il est à observer que la valeur plus forte de concentration est de 15.68 mg/l à Idokofo et plus faible 0.43 mg/l à Lolo et Drogine. En effet, avec des valeurs de concentration bien inférieures à la moitié de la valeur de la norme qui est de 50 mg/l pour les eaux potables, toutes les eaux prélevées pour analyse sont de concentration conforme.

- Chlorure et Fluorure

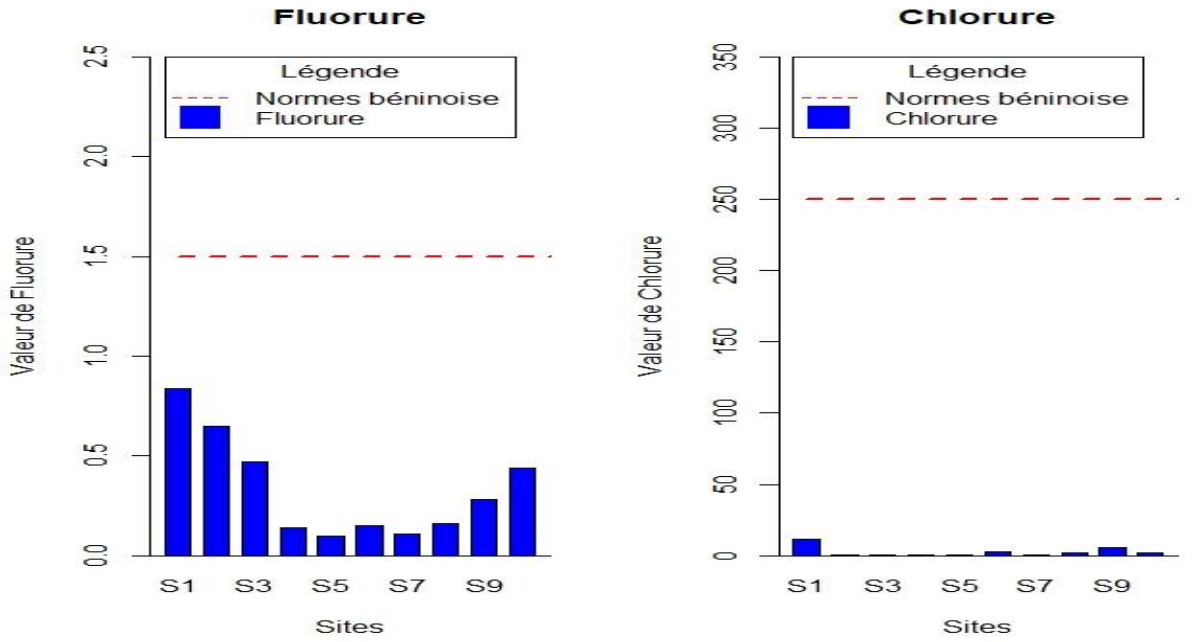


Figure 15 : Variations de la concentration en chlorure et en fluorure selon les différents échantillons. (SIDI, 2022)

De cette figure, il est à retenir qu'ayant pour valeur plus faible 0.1mg/l et plus élevée 11.7mg/l, les concentrations de chlorure sont dans les normes de potabilité de l'eau. Ayant pour valeur plus élevée 11.7mg/l à Idokofo, les concentrations en chlorure sont très inférieures à la norme de valeur 250mg/l, ce qui indique de ce fait que les eaux de la commune ont des valeurs en chlorure conforme à la norme de potabilité de l'eau. Observons également que pour valeurs élevées 0.84mg/l également à Idokofo, les concentrations des eaux en fluorure sont inférieures à la norme de potabilité des eaux échantillonnées. En effet, les concentrations en fluorure des eaux prélevées dans la commune de Kandi ne sont pas négligeables mais restent inférieures à la norme de qualité estimée à 1.5mg/l. Ainsi, les eaux ici analysées sont de concentrations acceptables par rapport à la norme de potabilité.

3.1.2. Appréciation de la qualité des eaux souterraines des eaux utilisées pour l'approvisionnement des populations en eau dans la commune de Kandi.

Il est ici question de la détermination par l'IQE du type d'eau et de son usage possible, de la détermination de l'IPO et de la jauge des paramètres de la pollution de l'eau, d'apprécier la qualité et la potabilité des eaux ici étudiées.

- ✓ Indice de Qualité de l'Eau (IQE)

L'IQE, par définition, est une méthode qui permet de déterminer le potentiel d'utilisation d'une eau en comparant sa qualité observée avec les critères de qualité exigés pour différents usages. C'est une technique de classification de la qualité de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes nationales béninoises. En utilisant les résultats des analyses physico-chimiques, il a été calculé les Indices de Qualité de l'Eau pour chaque échantillon dont le tout est résumé dans le tableau ci-dessous.

Echantillons	IQE
E1	102,164
E2	65,883
E3	30,153
E4	23,733
E5	28,653
E6	28,308
E7	22,047
E8	28,380
E9	37,582
E10	38,165

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des Indices de Qualité de l'Eau pour chaque échantillon. (SIDI, 2022).

En se basant sur les tableau 3 et 7, on obtient le tableau 8 ci-dessous

Echantillons	IQE	Classes	Types d'eau	Usages possible
E1	102,164	>100	Eau non potable	Traitement approprié requis avant utilisation
E2	65,883	>50-75	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
E3	30,153	>25-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
E4	23,733	0-25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
E5	28,653	>25-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
E6	28,308	>25-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
E7	22,047	0-25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
E8	28,380	>25-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
E9	37,582	>25-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie
E10	38,165	>25-50	Bonne qualité	Eau potable, irrigation et industrie

Tableau 8 : Tableau récapitulatif de la qualité et des usages de l'eau pour chaque échantillon. (SIDI, 2022)

L'observation du tableau 8 nous révèle que l'IQE calculé varie de 22.047 (plus faible valeur) à 102.167 (plus forte valeur), ce qui implique des classes dont seules deux d'entre elles sont défaillantes du point de vue potabilité. En effet, nous remarquons que la variation des Indices de l'IQE nous conduit à des classes dont les eaux sont de mauvaise qualité destinées seulement à l'industrie et à l'irrigation et même non potable devant recevoir un traitement approprié requis avant utilisation. La majorité donc de ces eaux sont de bonne qualité pouvant ainsi être utilisées comme eaux potables, eaux pour l'irrigation et pour l'industrie.

- ✓ Indice de Pollution Organique (IPO)

L'évaluation de la pollution organique a été effectuée à partir de l'indice de pollution organique (Leclercq et Vandevenne, 1987). Celui-ci caractérise la pollution organique à partir de la teneur en ammonium, nitrites et orthophosphates qui sont réparties en cinq classes

(tableau 4) dont la moyenne des numéros de classes des trois (03) paramètres est l'indice de pollution organique de l'échantillon constitué. En s'appuyant sur le tableau 4 on n'a :

Echantillons	Ammonium	classes	Nitrite	classes	Orthophosphate	classes	classes éch
E1	0,724	4	0,037	5	0,049	5	4,667
E2	0,445	4	0,024	5	0,020	5	4,667
E3	0,165	4	0,028	5	0,001	5	4,667
E4	0,151	4	0,020	5	0,001	5	4,667
E5	0,199	4	0,020	5	0,001	5	4,667
E6	0,185	4	0,020	5	0,000	5	4,667
E7	0,137	4	0,022	5	0,009	5	4,667
E8	0,182	4	0,024	5	0,005	5	4,667
E9	0,242	4	0,022	5	0,005	5	4,667
E10	0,233	4	0,024	5	0,020	5	4,667

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des Indices de Pollution Organique de chaque échantillon. (SIDI, 2022)

En se basant sur la grille des classes de l'indice de pollution organique (Leclercq, 2001) et le tableau 9, les eaux analysées ont une pollution organique nulle. En effet, de l'étude des paramètres conditionnant la pollution organique il ressort que les paramètres ainsi considéré reflète une inexistence de pollution organique du fait des teneurs en éléments chimique ici considéré dans ces dites eaux.

- ✓ La qualité de l'eau souterraine

La détermination de la qualité de l'eau souterraine ici faite est conditionnée par les résultats d'analyses de la conductivité, des chlorures et des nitrates qui seront utilisés pour la détermination de la qualité globale de l'eau par celle de chaque paramètre considéré.

Echantillons	Conductivité en µm/cm	Qualité	Chlorure	Qualité	Nitrate	Qualité	Qualité éch
E1	1168	Bonne	11,7	Excellente	57,295	Mauvaise	Moyenne
E2	362	Excellente	0,4	Excellente	0,094	Excellente	Excellente
E3	48	Excellente	0,2	Excellente	0,384	Excellente	Excellente
E4	20	Excellente	0,1	Excellente	0,094	Excellente	Excellente
E5	12	Excellente	0,6	Excellente	-0,108	Excellente	Excellente
E6	162	Excellente	2,7	Excellente	16,814	Bonne	Très bonne
E7	20	Excellente	0,1	Excellente	-0,195	Excellente	Excellente
E8	86	Excellente	2,2	Excellente	13,858	Bonne	Très bonne
E9	718	Bonne	5,6	Excellente	50,601	Mauvaise	Moyenne
E10	396	Excellente	1,9	Excellente	0,732	Excellente	Excellente

Tableau 10 : Tableau récapitulatif de la qualité de l'eau souterraine (SIDI, 2022)

En considérant les résultats des analyses faites au laboratoire, il a été déterminé la qualité de chaque paramètre à l'aide d'un tableau de la grille simplifiée pour l'évaluation de la qualité globale des eaux souterraines qui, assemblée, donne celle de l'eau. En effet, en utilisant ce tableau, il est déterminé en premier lieu la qualité par rapport à chaque paramètre des échantillons en occurrence, la conductivité, le chlorure et le nitrate. Par la suite, on considère les différents résultats trouvés à partir des paramètres considérés puis on trouve le juste équilibre entre elles pour trouver la qualité que présente chaque échantillon en général.

3.2. Discussion

Les résultats de l'analyse physico-chimique des eaux échantillonnées dans les arrondissements de Angaradébou, Bensékou, Saah, Kandi II et Kandi III de la commune de Kandi ont montré que les paramètres comme la conductivité, le nitrite, le sulfate, l'ortophosphate, le calcium, le chlorure, le fluorure et le magnésium sont acceptables du point de vue de leur concentration par rapport à la norme Béninoise de potabilité de l'eau et ainsi ne présente pas de risque pour la santé des consommateurs de cette dernière.

Cependant, en ce qui concerne cette même norme, deux forages de la commune ont des concentrations en nitrates qui dépassent le seuil de potabilité. En effet, les AEP de Idokofo et de Louci échantillonnés présentent des taux en nitrates d'une part et en ammonium d'autre part à Idokofo supérieurs à la norme en République du Bénin. Conformément aux résultats de (HOUEFONDE, 2014), les deux AEP considérés ici sont dans des zones de forte activité de culture et d'élevage de bétail facilitant ainsi l'obtention des composés azotés (nitrate et ammonium pour ce qui nous concerne ici). Par ailleurs, le fait que l'on soit dans une zone de socle faciliterait l'infiltration des substances issues de la dégradation des déchets et des excrétas. De plus, DJAFAROU et al, 2016, ont prouvé après analyse des eaux de boisson de la commune de Kandi, qu'elles sont de faible minéralisation et polluées par les composés azotés. DJAHADI et al, 2021, ayant étudié les eaux souterraines ont eux aussi trouvé des taux en nitrates élevés et de faibles minéralisation des eaux qu'ils ont eu à analyser. Ainsi, ils s'inscrivent dans le même sens que nous. HOUNSOUNOU et al, 2016, dans leurs documents de synthèse ont aussi trouvé des éléments montrant que les taux en éléments azotés (nitrate et ammonium surtout) sont élevés conformément à nos résultats. En adéquation avec les résultats d'analyse, l'Indice de Pollution Organique montre que les eaux analysées polluées par les polluants organiques ont dégradé la qualité de l'eau où elles sont présentes en quantité ; par contre pour le reste, l'Indice de Qualité de l'Eau a montré que les eaux sont de bonne qualité que l'analyse de la qualité de l'eau souterraine est venue confirmer.

En ce qui concerne la température, la valeur élevée de cette dernière serait due aux heures d'échantillonnages des ouvrages. Par contre pour la valeur des TDS, elle serait probablement due à la nature de la roche dans laquelle séjourne cette eau prélevée.

Conclusion Générale :

La présente étude qui a été menée sur les eaux souterraines du système aquifère du BSK de la portion de la commune de Kandi, nous a permis de connaitre la qualité de l'eau de la commune à travers les teneurs en certains éléments majeurs, éléments mineurs et les paramètre de terrain.

Une comparaison des valeurs de ces paramètres et de ces teneurs en éléments majeurs et en éléments mineurs par rapport aux normes admises pour les différents points d'échantillonnage a mis en évidence certaines valeurs supérieures aux normes admises par la République du Bénin.

Les résultats de cette étude nous ont permis de confirmer certaines de nos hypothèses, selon lesquelles les eaux de forage du système aquifère du BSK sont les sources d'approvisionnement en eau dans les communes de l'Alibori, Les teneurs des différents paramètres physico-chimiques des eaux de forage déterminent la qualité des eaux de consommation dans les communes de l'Alibori, les eaux de forages du système aquifère du BSK sont en partie polluées. En effet, les résultats ont montré que l'eau des forages sont d'une grande utilité pour les populations de Kandi. L'évaluation des paramètres physico-chimiques dans les cinq arrondissements de la commune a montré qu'à l'exception des Nitrates et de l'ammonium, la concentration de tous les autres paramètres sont conformes aux directives de qualité pour l'eau de boisson en République du Bénin. Cette présence entraine ainsi la dégradation de la qualité de l'eau dans les eaux concernées par cette dernière confirmée par les différents indices calculés et l'analyse de la qualité réalisée à partir des paramètres analysés. Etant donné que les populations ne sont pas au courant de la pollution de leurs eaux, elles ne sont pas en mesure de prendre des dispositions idoines pour corriger cette dernière afin de préserver leur santé. Ainsi, pour remédier à ce fait, nous suggérons de :

- Assurer un suivi des paramètres problématiques ;
- Construire beaucoup plus d'ouvrages hydrauliques pour permettre à toute la population d'accéder à l'eau potable dont la qualité doit être suivie ;
- Recenser les AEP hors service et les remettre en fonction ou drastiquement en faire d'autres pour ces populations.

Références bibliographique :

Aher, D. N., Kele, V. D., Malwade, K. D., & Shelke, M. D. (2016). Lake Water Quality Indexing To Identify Suitable Sites For Household Utility: A Case Study Jambhulwadi Lake; Pune (MS). Journal of Engineering Research and Applications, 6, 16–21.

Ahoudi, H., Gnandi, K., Tanouayi, G., & Ouro-Sama, K. (2015). caracterisation physico-chimique et état de pollution par les éléments traces métalliques des eaux souterraines de Lomé (sud togo) : cas du quartier agoe zongo. 41–56.

Amenagement, E. T. D. E. L., & Territoire, D. U. (2015). Plan de Développement.

AVOCANH G., 2014. Evaluation de la potabilité des eaux des Postes d'Eau Autonomes (PEA) et des impacts socio-sanitaires liés à leur utilisation dans la commune de Bohicon. Mémoire de Master. AGRHYMET. 70p

Bénin, G. (2001). Fixant les normes de qualité de l'eau potable en République du Bénin.

Boukari, M., CB, G., A, F., & S, F. (1996). The impact of urban development on coastal aquifers near Cotonou, Bénin. Journal of African Earth Sciences, 22(4), 403–408.

Brown, J. J., Davies, D. L., Ferriss, J. B., Fraser, R., Haywood, E., Lever, A. F., & Robertson, J. I. S. (1972). Comparison of Surgery and Prolonged Spironolactone Therapy in Patients with Hypertension , Aldosterone Excess , and Low Plasma Renin. June, 729–734.

Chatterji, C., & Raziuddin, M. (2002). Determination of water quality index (WQI) of a degraded river in Asanil industrial area, Ranigunj, Burdwan, west Bengal. Nature: Environment and Pollution Technology,. 1(2), 181–189.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, Détermination des fluorures : méthode colorimétrique après distillation, MA. 300 – F 1.2, Rév. 3, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2014, 20 p.

Djafarou, A. (2004). La contribution à l'évaluation des risques liés aux usages domestiques de l'eau dans la Commune de Kandi.

Djafarou, & Houssou, C. (2016). «Qualité physico-chimique de l'eau de boisson à Kandi au nord du Bénin». Afrique Science, 12.

Djahadi, S. D., Sandao, I., Ahmed, Y., & Harouna, M. (2021). Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du socle du bassin versant de Goroubi dans la commune de Torodi / Liptako nigérien Physico-chemicals characteristics of the watershed Goroubi ' s groundwater in Commune of Torodi / Liptako of Niger. 15(December), 2715–2729.

Houefonde, F. G. (2014). Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines dans la

commune de Dassa-Zoumè : cas des arrondissements de « Dassa i et ii ».

Houéménou, A. H., Tweed, S., Dobigny, G., & Mama, D. (2019). Degradation of groundwater quality in expanding cities in West Africa . A case study of the unregulated shallow aquifer in Cotonou .

Hounsounou, E. O., Agassounon, M., Tchibozo, D., Kelome, N. C., Vissin, E. W., & Mensah, G. A. (2016). Pollution des eaux à usages domestiques dans les milieux urbains défavorisés des pays en développement : Synthèse bibliographique Pollution of waters for domestic uses in the disfavored urban environments of the developing countries : Bibliographical synthesis. 10(October), 2392–2412.

Hountondji, B., Codo.P., & K., A. (2020). Approvisionnement en eau potable à partir d´un système de pompage photovoltaïque dans la commune de Kandi au Bénin. 71–89.

LOI N° 2 010-44 DU 24 NOVEMBRE 2010 Portant gestion de l'eau en République du Benin, 21p.

M.D.E. (2014). Détermination des fluorures : méthode colorimétrique après distillation, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec MA. 12(révision 3), 1–20.

M.D.G.L.A.A.T. (2019). Plan Communal de Conservation de la Biodiversité du Système des Aires Protégées : Commune de Kandi Ministère de la Décentralisation, de la Gouvernance Locale, de l'Administration et de l'Aménagement du Territoire.

M.P.D., & INSAE. (2015). Cahier des villages et quartiers de ville du département de l 'Alibori.

M.P.D. (2019). Spatialisation des cibles prioritaires des ODD au Bénin : Monographie des communes des départements du Borgou et de l ' Alibori Note synthèse sur l ' actualisation du diagnostic et la priorisation des cibles des communes.

Mahamane, A., & Guel, B. (2015). Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). 9(February), 517–533.

Maliki. (1993). Etude hydrogéologique du littoral Béninois dans la région de Cotonou et ses environs.

Nordine, Khattach, D., & Hilali, M. (2015). Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central , Maroc) Assessment ofphysico-chemical quality of groundwaterof the Jurassic aquifers inhigh basin of Ziz (Central High A. 6(4), 1068–1081.

OMS (2004). Directive de la qualité pour l'eau de boisson, troisième édition, volume1. Recommandations, Genève, 110 p.

Provencher, M. (1979). Indice de qualité des eaux. Canadian Water Resources Journal, 4(2), 1979.

Rabilou, S. M., Moumouni, U. A., & Ibrahim, N. (2018). Caractérisation Physico-Chimique Des Eaux Souterraines Du Socle De La Région de Zinder (Niger) Pendant la Saison des Pluies et la Saison Sèche Malam Alma Maman Mousbahou Issa Habou. 14(27), 317–345. https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n27p317

Rodier, Legube, & Marlet. (2009). L'Analyse de l'Eau.

Yidana, S. M., & Yidana, A. (2010). Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. Environmental Earth Sciences. 59, 2010.

Youssouf, I., & Lawani, M. (1981). Les sols béninois: classification dans la Base de référence mondiale. Quatorzième réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols CENAP Bénin. 29–50.

Zogo D. (2016). Analyse des eaux de consommation,50 pages

https://www.aquaportail.com/definition-12555-qualite-de-l-eau.html