UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

AHLONSOU A. Jennifer

Pour l'obtention du diplôme de

Master Professionnel en Hydrologie

OPTION : Hydrogéologie

==========

EVALUATION DE L'IMPACT DE L'OCCUPATION DES TERRES SUR LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA COMMUNE DE ZA-KPOTA (SUD BENIN) PAR LA TELEDETECTION ET L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

==========

Maître de Mémoire

Prof. ALASSANE Abdoukarim
(Maitre de Conférences)

Encadreur

Dr. ADANDEDJI Firmin
(Chercheur à l'INE)

PROMOTION : 2021-2022

Attestation de correction de mémoire

Les membres du jury nommés : Professeur Nicaise YALO (président du jury), Professeur Abdoukarim ALASSANE (rapporteur), Docteur Raoul KPEGLI (examinateur) et Docteur ADANDEDJI Firmin (rapporteur), attestent que toutes les corrections demandées par le Jury de soutenance ont été effectuées sur le mémoire présenté par l'étudiante Apolline Jennifer AHLONSOU, matricule 14106117, intitulé : « EVALUATION DE L'IMPACT DE L'OCCUPATION DES TERRES SUR LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA COMMUNE DE ZA-KPOTA (SUD BENIN) PAR LA TELEDETECTION ET L'INTELIGENCE ARTIFICIELLE », en vue de l'obtention du Master en Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau/ option Hydrogéologie, sous le à l'Institut National de l'Eau de l'Université d'Abomey Calavi (INE/UAC).

En foi de quoi la présente attestation est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Président du jury

Professeur Nicaise YALO
Professeur Titulaire des universités CAMES

Rapporteur 1

Professeur Abdoukarim ALASSANE
Maitre de Conférences

Rapporteur 2

Docteur Firmin ADANDEDJI

Examinateur

Docteur Raoul KPEGLI

Dédicace

A ma famille pour l'affection dont j'ai bénéficié

Avant-Propos

Le présent travail est le fruit d'une collaboration scientifique entre la Data Science Africa (DSA) et le Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA). Il a été réalisé grâce à l'appui financier du programme Africa AI Research Award (AAIRA) pour l'innovation des jeunes chercheurs en Afrique. L'essentiel des analyses physico-chimiques a été fait au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA).

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Le chemin qui m'a mené jusqu'à ce point n'aurait pas été le même sans leur soutien inestimable.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon maitre de mémoire, ***Dr-MC Abdoukarim ALASSANE****, pour son mentorat, son expertise et sa patience tout au long de ce projet. Vos conseils précieux ont été la clé de la réussite de ce travail de recherche.*

Je tiens également à remercier chaleureusement ***Dr. Firmin ADANDEDJI, Mr Vineil GBEWEZOUN et Mr Freddy HOUNNONDAHO****, qui ont partagé leurs connaissances et leurs temps pour me guider dans ma démarche. Vos commentaires constructifs ont grandement enrichi ce mémoire.*

Je n'oublie pas le personnel du ***Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA)*** *et les personnes qui ont participé à cette recherche en tant que participants. Votre contribution a été essentielle pour la réussite de ce travail.*

Un merci spécial à ma ***famille*** *et à mes* ***amis*** *pour leur soutien indéfectible. Vos encouragements et votre compréhension m'ont permis de me concentrer sur mes études.*

Je ne pourrai finir sans remercier le programme ***Africa AI Research Award (AAIRA)*** *de* ***Data Science Africa (DSA)*** *qui a financé ce travail.*

Ce mémoire a été un voyage exigeant, mais grâce à l'aide de chacun de vous, j'ai réussi à franchir chaque étape avec confiance. Soyez en remerciés.

Résumé

L'accès à l'eau potable constitue un des enjeux mondiaux. Cette étude vise à contribuer l'évaluation de la qualité des eaux souterraines de la commune de Za-kpota (Sud-Bénin) par l'apport de la télédétection et du Machine Learning. L'approche méthodologique utilisée, a consisté à lier les données des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines collectées de terrain et de laboratoire suivant des méthodes normalisées AFNOR 1994 à celles satellitaires (Landsat) en vue d'esquisser un modèle de prédiction de qualité des eaux souterraines. Le traitement des données a été fait grâce aux logiciels Diagramme (Détermination des faciès chimiques), QGis (Semi Automatic Plugin : SCP) et Python (Jupyter Netebook : analyse statistique). Les résultats d'analyses des eaux des puits et forages échantillonnés indiquent que la plupart des eaux présente un caractère acide (pH variant entre 5.59 et 7.83). Elles ont une moyenne minéralisation avec des valeurs de conductivités globalement inférieures à 1500 µs/cm (59 µS/cm à 1344 µS/cm) marquée par des concentrations élevées en nitrates et phosphates par endroit. La dynamique de la qualité des eaux souterraines de la commune de Za-kpota entre 2008 et 2022 est influencée aussi par une régression des unités d'occupations de sol (une régression de la végétation et formation marécageuse au profit des aires d'agglomération, sols nus, cultures et jachères) révélée par l'analyse diachronique des images satellitaires de 2008, 2013, 2019 et 2022. Les enquêtes réalisées auprès des populations riveraines ont révélées l'usage des herbicides et pesticides dans les champs agricoles, ce qui constitue des facteurs contribuant à la détérioration de la qualité des eaux souterraines observé dans la zone d'étude. Les résultats des modèles de prédiction (ANN, RF et RL) de la qualité des eaux souterraines élaborés, ont permis de conclure que les modèles basés sur les Réseau de Neurones Artificiels et Régression Linéaire permettent de mieux prédire (ANN : R^2=0.97 et RMSE=0 ; RL : R^2=1 et RMSE=0) l'évolution la qualité des eaux souterraines de la commune de Za-kpota.

Mots clés : Eaux souterraines, occupation du sol, conductivité électrique, Machine learning, Za-kpota.

Abstract

Access to drinking water is a global issue. This study aims to contribute to the assessment of groundwater quality in the municipality of Za-kpota (southern Benin) using remote sensing and Machine Learning. The methodological approach used consisted in linking groundwater physico-chemical parameter data collected in the field and in the laboratory using AFNOR 1994 standardised methods to satellite data (Landsat) in order to sketch out a groundwater quality prediction model. The data was processed using Diagramme (chemical facies determination), QGis (Semi-Automatic Plugin: SCP) and Python (Jupyter Netebook: statistical analysis) software. The results of the analyses of the water from the sampled wells and boreholes indicate that most of the water is acidic (pH varying between 5.59 and 7.83). The water was moderately mineralised, with conductivity values of less than 1,500 µs/cm overall (59 µS/cm to 1,344 µS/cm), with high concentrations of nitrates and phosphates in places. The dynamics of groundwater quality in the municipality of Za-kpota between 2008 and 2022 are also marked by a regression in land use units (a regression in vegetation and marshland formation in favour of built-up areas, bare soil, crops and fallow land) revealed by the diachronic analysis of satellite images from 2008, 2013, 2019 and 2022. Surveys of local residents revealed the use of herbicides and pesticides in agricultural fields, which are factors contributing to the deterioration in groundwater quality observed in the study area. The results of the groundwater quality prediction models (ANN, RF and RL) developed led to the conclusion that the models based on Artificial Neural Networks and Linear Regression were better able to predict (ANN : R^2=0.97 and RMSE=0 ; RL : R^2=1 and RMSE=0)changes in groundwater quality in the municipality of Za-kpota.

Key words: Groundwater, land use, electrical conductivity, Machine learning, Za-kpota.

Liste des sigles, acronymes et abréviations

ACP : Analyse en Composante Principale

AFNOR : Association Française de NORmalisation

ANN : Artificial Neural Network

ARIMA : Autoregressive Integrated Moving Average

CA : Classification Automatique

DG Eau : Direction Générale de l'Eau

HGRE : Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau

IA : Intélligence Artificielle

INE : Institut National de l'Eau

IQU : Indice de Qualité de l'Eau

LST: Land Surface Temperature

LULC: Land Use and Land Cover

MAE: Mean Absolute Error

MLA: Machine Learning Algorithm

MSE: Mean Square Error

Nash: Nash Sutcliffe Efficiency

OLIO : Operational Land Imager

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONG : Organisation Non Gouvernementale

QE : Qualité de l'Eau

RF : Random Forest

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

RL: Régression Linéaire

RMSE: Root Mean Square Error)

RNN : Réseau de Neurones Récurent

SCP : Semi-automatic Classification Plugins

USGS: United States Geological Survey

XGBoost: eXtrême Gradient Boosting

Liste des figures

Figure 1: Carte administrative de la commune de Za-kpota ---------- 10
Figure 2: Carte géologique et hydrogéologique de la commune de Za-kpota ---------- 12
Figure 3: Carte hydrographique de la commune de Za-kpota ---------- 14
Figure 4: Localisation des points de prélèvement d'eaux ---------- 20
Figure 5: Schéma des réseaux de neurones ---------- 26
Figure 6: Matrice de corrélation ---------- 30
Figure 7: Faciès géochimique des eaux souterraines de Za-kpota de 2008 et 2022 (Diagramme de Piper, Juin 2023) ---------- 31
Figure 8: Carte d'occupation du sol de Za-kpota 2008- 2022 ---------- 32
Figure 9: Evolution spatio-temporelle des unités d'occupations du sol (2008-2022) ---------- 32
Figure 10: Evolution temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota : Cas des Fluorures ---------- 34
Figure 11 : Evolution temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota : Cas des Nitrates ---------- 34
Figure 12: Evolution temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota : Cas des Phosphores ---------- 35
Figure 13: Evolution temporelle de l'Indice de Qualité de l'Eau des eaux souterraines de la commune de Za-kpota ---------- 35
Figure 14: Valeurs IQE observées et prédites (ANN, RF et RL) ---------- 37

Liste des tableaux

Tableau 1: Poids des paramètres physico-chimiques ---------- 23
Tableau 2: Classification de l'eau selon l'IQE (Dawood et al., 2022) ---------- 24
Tableau 3: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de commune de Za-kpota ---------- 28
Tableau 4: Analyse statistique des superficies d'unités d'occupation du sol (2008-2022) ----- 33
Tableau 5: Evaluation des performances des modèles ---------- 37

Liste des photos

Photo 1 : Champs d'arachides (Ahlonsou, Décembre 2022) ---------- 16
Photo 2: Flacon en polyéthylène de 1.5l, (Ahlonsou, Décembre 2022) ---------- 49
Photo 3: GPS Gamin, (Ahlonsou, Décembre 2022) ---------- 49
Photo 4: Multiparamètre AQUAREAD AP700 (Ahlonsou, December 2022)---------- 49
Photo 5: Spectrophotomètre HACH LANGE DR 2800 (Ahlonsou, December 2022) -------- 49
Photo 6: Colorimètre (DR890)---------- 50
Photo 7: Verrerie de laboratoire ---------- 50
Photo 8: Interface du logiciel DIAGRAMME---------- 50
Photo 9: Classification d'image avec SCP(Qgis) ---------- 50
Photo 10: Interface du logiciel Python (Jupyter Notebook)---------- 50
Photo 11: Echantillonnage d'eau dans un puits, (Ahlonsou, Décembre 2022) ---------- 51
Photo 12: Echantillonnage d'eau dans un forage, (Ahlonsou, Décembre 2022) ---------- 51
Photo 13: Champs de maïs (Ahlonsou, Décembre 2022)---------- 51
Photo 14: Pesticide et herbicide (Ahlonsou, Décembre 2022) ---------- 51

Table des matières

Dédicace ii
Avant-Propos iii
Remerciements iv
Résumé v
Abstract vi
Liste des sigles, acronymes et abréviations vii
Liste des figures viii
Liste des tableaux ix
Liste des photos x
Table des matières xi
Introduction Générale 1
1. Contexte et justification de l'étude 2
2. Synthèse bibliographique 2
3. Objectifs de l'étude 8
3.1. Objectif général 8
3.2. Objectifs spécifiques 8
4. Hypothèses 8
CHAPITRE 1 : ZONE D'ETUDE 9
1.1. Présentation du milieu d'étude 10
1.1.1. Organisation administrative et territoriale 10
1.1.2. Géologie et Hydrogéologie 10
1.1.3. Relief, Climat et Hydrographie 12
1.1.3.1. Relief et Climat 12
1.1.3.2. Hydrographie 13
1.1.4. Sol et Végétation 14
1.1.5. Activités socio-économiques 15
CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIEL ET METHODES 17
2.2. Données utilisées/collectées 18
2.1. Différentes données collectées 18
2.2. Matériels 18
2.3. Méthodologie 19

2.3.1. Recherche documentaire 19
2.3.2. Echantillonnage d'eau dans les puits et forages 19
2.3.3. Analyses physico-chimiques 20
2.3.4. Traitement des images satellitaires 21
2.3.5. Détermination des faciès géochimiques des eaux 22
2.3.6. Calcul de l'indice de qualité de l'eau (IQE) 22
2.3.7. Traitement des données d'analyses et élaboration des modèles de prédiction de la qualité des eaux souterraines 24
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION 27
3.1. Résultats 28
3.1.1. Statistique descriptive des données physico-chimiques 28
3.1.1.1. Analyse statistique des données 28
3.1.1.2. Corrélation entre les variables 29
3.1.1.3. Faciès géochimiques des eaux 30
3.1.2. Analyse de l'évolution de l'occupation des terres de la commune de Za-kpota 31
3.1.2.1. Analyse des cartes d'occupation du sol 31
3.1.2.2. Evaluation des superficies des unités d'occupations du sol 32
3.1.3. Evolution temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota (Cas des Fluorures, Nitrates, Phosphore et de IQE) 33
3.1.4. Modèle de prédiction de la qualité des eaux de la commune 36
3.2. Discussion 38
Conclusion et suggestions 42
Références bibliographiques 43
Annexes 49
Annexe 1 : Matériels de terrain et de laboratoire 49
Annexe 2 : Quelques photos de terrains 51
Annexe 3 : Indice de Qualité de l'Eau souterraine des forages et puits échantillonnées. 52
Annexe 4 : Valeurs observées et valeurs prédites 53

Introduction Générale

La pression sur les ressources en eau souterraines est à la hausse principalement à cause de sa meilleure qualité (Ayad et Kahoul, 2016). La qualité de l'eau est un enjeu environnemental important dans le monde et dépend d'un grand nombre de paramètres. Ces dernières années, la pression démographique, l'utilisation accrue d'engrais chimiques pour l'agriculture, l'urbanisation rapide et l'industrialisation ont détérioré la qualité de la plupart des ressources en eau douce (Chandra et al., 2015).

Au Bénin, les eaux souterraines compte tenu de leur meilleure qualité sont plus utilisées pour l'approvisionnement en eau potable. Mais, en milieu urbain celles-ci subissent de multiples contraintes dues à une forte croissance démographique et à l'inadaptation ou même l'absence d'assainissement. L'installation des populations n'est souvent pas accompagnée de l'édification d'un système d'assainissement de base adéquat si bien que les activités anthropiques menacent la qualité des ressources en eau en général et des ressources en eau souterraine en particulier (Alassane, 2004). Toute modification des états et de la structure de la couverture végétale a des répercussions sur les ressources en eau.

Za-kpota est l'une des communes du Bénin où la population constitue une des sources potentielles de la détérioration de la qualité physico-chimique des eaux souterraines. Les différentes activités menées telles que l'agriculture, la pêche, l'élevage, pourraient avoir un impact considérable sur la qualité de l'eau car diverses activités menées par les populations urbaine et rurale ne respectent pas les normes environnementales requises (Sambienou et *al*.. 2020). La surveillance régulière des paramètres de qualité de l'eau et l'identification des sources de contaminants sont essentielles pour fournir de l'eau potable (Reddi et al., 1993). Plusieurs algorithmes d'apprentissage automatique sont actuellement mis en œuvre dans la cartographie et bien d'autres effectuent la transition du domaine informatique/science des données vers la télédétection (Benyamin et *al.*, 2022). Afin d'apporter des solutions à la pollution à laquelle sont vulnérables les eaux souterraines de la commune de Za-kpota, nous avons choisi d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de ladite commune par l'apport de la télédétection et de l'Intelligence Artificielle afin de mettre en place un modèle de prédiction qui sera un outil important dans la prise de décision pour le suivi de la qualité et la gestion des eaux souterraines.

1. Contexte et justification de l'étude

Les eaux souterraines représentent une petite partie des ressources globales en eau. Elles sont principalement utilisées comme eau potable au Bénin. C'est le cas dans la commune de Za-kpota (sud du Bénin) où la qualité des eaux souterraines est constamment mise à l'épreuve en raison de la croissance de la pollution de sources ponctuelles et diffuses. Par ailleurs, les principales activités économiques exercées à Za-kpota sont : l'agriculture, la pêche, la production animale limitée au petit bétail, la production d'huile de palme, la transformation des produits vivriers, le commerce et l'artisanat. A Za-kpota, une analyse chronique de l'occupation des sols entre 2006 et 2019 basée sur des images satellites Landsat, des données démographiques, des données physico - chimiques des eaux des puits et forages a mis en évidence (Ahlonsou, 2020 ; INSAE, 2015) :

- une augmentation de la densité de population de 2006 à 2019 ;
- une régression des formations naturelles au profit des formations anthropiques (champs et jachères) ;
- une augmentation des concentrations de nitrates et de nitrites dans les eaux souterraines (puits creusés à la main et forages).

De tous ces constats, il est alors indispensable de trouver un moyen pour évaluer l'impact de l'occupation des terres sur les ressources en eaux souterraines de ladite commune afin d'améliorer la qualité de ces eaux. Alors, l'apport combiné de la télédétection et de l'Intelligence Artificielle, contribuera-t-il à l'amélioration de la qualité des eaux souterraines à Za-kpota (sud du Bénin)?

2. Synthèse bibliographique

Dans le cadre de l'apport de la télédétection et de l'Intelligence Artificielle à l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines, nombreux ont faits de recherches approfondies. Plusieurs études ont fait état de la contamination étonnante des nappes phréatiques, en principes moins vulnérables que les eaux de surface. On pense que la pollution est fréquente dans les sources d'eaux souterraines peu profondes, dérivées des déchets domestiques ainsi que des sources agricoles, souvent les plus élevées dans les zones à forte densité de logement (BGS, 2002). Saidou Bani Samari étudiant, à travers ses études en 2007 sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Djidja découvre que les eaux souterraines de cette région sont riches en nitrates, nitrites et fluorures. Il lie ainsi la

présence de ces substances toxiques dans les eaux souterraines de cette commune à un manque d'assainissement, à l'utilisation abusive des produits sanitaires riches en azote et à l'utilisation abusive des intrants dans la production cotonnière et des produits vivriers par les populations (Samari, 2007 in Adandedji, 2010). Fandohan abordant également le même thème mais dans la commune d'Abomey, a conclu que les eaux souterraines de cette commune sont caractérisées par une teneur élevée en éléments azotes (ammonium et nitrate) et en fluorure qui proviendraient des minéraux fluores présents dans les roches traversées par l'eau au cours de son infiltration (Fandohan, 2009 in Adandedji, 2010). La pollution élevée en nitrates est observée dans les puits et forages, pourrait être liée à l'utilisation excessive d'engrais azotée (Kristin et *al.*, 2014). D'après les études de Dougnon, l'urbanisation, l'essor de l'industrie et de l'agriculture intensive ont accru, de manière chronique ou accidentelle, la pollution des masses d'eau (Dougnon, 2017). Des nitrates peuvent également être rejetés par les stations d'épuration d'eaux résiduaires urbaines. Les causes intrinsèques de cet état de chose sont les engrais de synthèses, les pesticides utilisés par l'agriculture et les rejets toxiques des activités industrielles et minières. Boubakar et Tanignon, à travers leurs recherches montrent respectivement en 2010 et 2011, que l'urbanisation a un effet négatif sur la qualité des eaux souterraines. Les travaux de Tanignon sur la qualité physico-chimique et bactériologique des puits et forages situés dans quatorze différentes localités de la Commune d'Abomey-Calavi afin d'évaluer l'état de la nappe souterraine révèle que tous l'eaux des puits analysés sont toutes polluées par les coliformes totaux, fécaux et les streptocoques fécaux et 50% des eaux de ces puits ont une teneur en nitrate supérieure aux directives de l'OMS avec une augmentation perceptible des chlorures. Il a conclu que plusieurs facteurs liés à l'urbanisation et la conurbation sont en cause. Boubakar quant à lui a remarqué après son étude que certains forages de sa zone d'étude sont sujets à une pollution nitratée, liée à l'urbanisation incontrôlée et à la déforestation. En fait, le développement des infrastructures urbaines (extension des réseaux d'assainissement et d'alimentation en eau) n'a pas pu suivre la croissance démographique, ce qui laisse craindre une accentuation de la pollution des eaux souterraines alors que la demande en eau de la ville est croissante. Les recherches de Aziz A. en 2014 sur la « Pollution anthropique de cours d'eau : caractérisation spatio-temporelle et estimation des flux » ont confirmé les résultats des deux précédents auteurs. Ainsi la pollution azotée et phosphatée qui est responsable de fréquents dépassements de normes en Europe, provient des eaux usées domestiques, des effluents industriels (agro- alimentaires, papeteries...) et principalement du lessivage des engrais et effluents d'élevage dans les zones agricoles. L'azote présent sous forme organique ou ammoniacale ($NH4^+$) dans les effluents se transforme

en nitrate (NO_3^-) dans le milieu naturel. Alidou, dans le but d'apprécier l'impact de l'urbanisation sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans la Commune de Djougou en 2017, arrive à la conclusion que cette commune a connu une extension de 2,78 % de la superficie occupée par les habitats au détriment des forêts entre 2005 et 2015 et que les arrondissements les plus denses de la Commune de Djougou ont connu une dégradation de leurs eaux souterraines par une augmentation des valeurs de leur conductivité électrique et de leur concentration en chlorure et en nitrate. Les travaux réalisés par Arsène et *al*. sur le bassin de l'Ouémé en 2014, les résultats de la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin en 1978, 1998 et 2010 ont permis de constater une régression de la savane arborée et arbustive ; de la forêt claire et de la savane boisée arborée ; de la forêt galerie et de la forêt dense d'une part et une progression des zones de cultures et jachères, des plantations et agglomérations et des sols dénudés. La régression significative des quatre formations est due à l'extension des aires de cultures et des jachères dans le bassin. Par ailleurs, le développement accru des aires de cultures et des agglomérations engendre une réduction progressive de l'étendue des surfaces boisées et la déstabilisation de la structure des sols. Cette dégradation du milieu physique impact sur le ruissèlement et l'infiltration des eaux. Il importe donc d'analyser les diverses formes de l'exploitation du milieu pour dégager les contraintes qu'elles font peser sur l'environnement en générale et sur la ressource en eau en particulier (Arsène et *al.*, 2014).

La télédétection et l'Intelligence Artificielle sont deux outils essentiels pour mieux appréhender l'impact des activités anthropiques sur la qualité physico-chimique des ressources en eaux souterraines. La classification de l'utilisation des terres et de l'occupation des sols (LULC) des images satellite dans des cartes thématiques existe depuis le lancement du programme Landsat en 1972. Les classificateurs statistiques, tels que le maximum de vraisemblance (Edgeworth, 1908), distance de Mahalanobis (Mahalanobis, 1936), ou parallélépipède (Shlien et Goodenough, 1974) ont été parmi les premiers à être utilisés pour classer les données de télédétection. Ces premiers classificateurs étaient souvent paramétriques et basés sur la théorie statistique selon laquelle la réflectance de la surface terrestre devrait être normalement distribuée. Ainsi, Mahadi et *al.*, à l'aide de la télédétection et de l'approche SIG ont identifié les changements d'occupation des sols (LULC) qu'on peut observer à Bhaluka à Mymensingh, au Bangladesh (Mahadi et *al.*, 2022). Benyamin et *al.* dans la municipalité de Malmö, en utilisant les données de Sentinel-2 et des données auxiliaires, ont fait une classification de l'occupation des sols avec apprentissage automatique interprétable (Benyamin et *al.*,2022). Les modèles

numériques ont été largement adoptés pour soutenir les processus décisionnels en simulant l'impact de scénarios alternatifs de gestion de la qualité de l'eau. Les modèles permettent également de vérifier l'efficacité des mesures de contrôle conçues. À cette fin, plusieurs types de modèles ont été développés, notamment des modèles basés sur des données (également connus sous le nom de modèles statistiques) et des modèles basés sur des processus. Les méthodes habituelles d'évaluation des concentrations de nitrates consistent en une modélisation numérique du transport des polluants, qui constitue un outil efficace pour comprendre les processus physiques, chimiques et biologiques du transport des nitrates (Singh et Craswell, 2021). Les méthodes statistiques multivariées, y compris l'analyse en composante principale (ACP), l'analyse factorielle et l'analyse par grappes contribuent à la modélisation fiable et précise des paramètres de qualité de l'eau et des distributions spatiales grâces à la combinaison d'analyses en laboratoire et de données géographiques (Vega et *al.*, 1998). Les modèles déterministes basés sur les processus, par exemple le simulateur RWQM1 (Reichert et *al.*, 2001), utilisent des équations d'équilibre de masse pour stimuler la dynamique de différentes variables de la qualité de l'eau (Trolle et *al.*, 2011). Outre le grand nombre de paramètres, les modèles basés sur les processus nécessitent une quantité importante de données (données météorologiques, topographiques, hydrologiques) et des calculs intensifs. En revanche, les modèles non axés sur les données utilisent des régressions linéaires ou non linéaires simples pour estimer les variables de QE à l'aide de différentes données d'entrée (par exemple, d'autres variables physiques/chimiques). Ces modèles sont simples à mettre en œuvre mais conduisent souvent à des erreurs de prévision significatives en raison d'une stabilité et d'une précision statistiques médiocres (Luo et *al.*, 2019). Ces dernières années, l'augmentation de la puissance de calcul et des données disponibles a créé des opportunités pour de nouvelles techniques d'intelligence artificielle (IA) dans l'analyse des données. Bien qu'intrinsèquement empiriques, les techniques d'IA se distinguent par leur capacité à produire des modèles généralisables dans un espace multidimensionnel avec des relations non linéaires complexes (Topp et *al.*, 2020). Comme pour les modèles statistiques traditionnels, les approches d'IA ne sont applicables qu'à l'intérieur de la gamme et du cadre des données utilisées pour former un modèle donné. Toutefois, contrairement aux modèles empiriques traditionnels, elles utilisent l'apprentissage itératif pour réduire l'erreur globale et maximiser l'adéquation du modèle (Hastie et *al.*, 2009). Compte tenu de cette capacité, les modèles basés sur l'IA, en particulier les réseaux neuronaux artificiels (RNA), ont été largement appliqués pour simuler/prédire la qualité des masses d'eau de surface, telles que les rivières, les lacs, les fleuves, etc. Des examens complets des modèles

utilisés dans l'estimation de la pollution ont été menés par Bouraoui et Grizzetti 2014 et Yuan et *al.*, 2020 . Cependant, la plupart des modèles simulent des scénarios plutôt simplifiés, comme un type de sol unique et des types de sol en couches dans un domaine vertical bidimensionnel, ou les interactions rivière-aquifère ne sont pas représentées. Récemment, des algorithmes d'intelligence artificielle ont été appliqués avec de bons résultats à des études hydrologiques sur la pollution par les nitrates. Ces algorithmes peuvent résoudre efficacement des problèmes non linéaires complexes, car ils apprennent de l'ensemble de données et ne nécessitent donc pas de règles prédéfinies basées sur des critères d'experts (Zhu et *al.*, 2022). En outre, il a été constaté que les algorithmes d'intelligence artificielle augmentent les performances prédictives dans un large éventail de processus environnementaux. Actuellement, l'apprentissage d'ensemble tel que la forêt aléatoire (RF) et l'eXtrême Gradient Boosting (XGBoost) est largement adopté dans les sciences de l'eau ; cependant, des études antérieures ont indiqué une application limitée des algorithmes RF et XGBoost pour prédire les concentrations de nitrates dans les eaux souterraines (Zhu et *al.*, 2022). Les avantages de la RF comprennent la capacité à saisir les dépendances non linéaires et les interactions des variables, la vitesse de calcul, la paramétrisation parcimonieuse et l'utilisation de métriques d'importance des variables (Tyralis et *al.*, 2019). Diverses études ont été menées pour prédire les schémas de distribution des nitrates dans l'eau souterraine à l'aide de l'algorithme RF (Bao et *al.*, 2022). Selon Castrillo et López en 2020, RF est adapté pour représenter la concentration de nutriments dans un bassin versant rural ou urbain. D'autre part, XGBoost peut améliorer la robustesse et la vitesse d'exécution du modèle en introduisant des termes pour la régularisation, l'échantillonnage des colonnes et la capacité de l'arbre de décision à choisir le point de séparation (Ma et *al.*, 2021). Dans les études appliquées sur la qualité de l'eau, XGBoost a obtenu de meilleurs résultats que d'autres algorithmes tels que LogiBoost, RF, AdaBoost et les machines à vecteur de support (Li et *al.*, 2022). Au Kenya, Omeiza (2019) a développé une technique d'apprentissage automatique efficace pour la classification de l'utilisation des terres urbaines à grande échelle basée sur des images aériennes du logiciel Google Earth. L'auteur a ensuite utilisé le modèle ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) pour prévoir l'utilisation des terres à une date future donnée. Talukdar et *al.*, (2020) ont constaté en Inde que parmi les forêts aléatoires convient mieux à la classification de l'image Landsat 8 Operational Land Imager (OLI). En Europe, Campos- Taberner et *al.*, (2020) ont souligné que les techniques d'apprentissage en profondeur ont fourni d'excellents résultats dans la classification de l'utilisation des terres sur la base des séries temporelles Sentinel-2. Au Canada, sur la base des données existantes sur

l'utilisation des terres, Cao et *al*., (2019) ont effectué des prévisions à court terme du changement d'utilisation des terres à l'aide de modèles RNN de réseaux neuronaux récurrents. Récemment, de nombreux chercheurs ont simulé et prédire des changements dans LULC et LST de villes autour d'algorithmes d'apprentissage automatique tels que le réseau de neurones artificiels (ANN) : Wuhan en Chine (Zhang et *al.*, 2022c), Ikom au Nigeria (Mohammad et *al.*, 2022), et Faisalabad au Pakistan (Tariq et Shu, 2020). Yatoo et al. ont utilisé la simulation d'automates cellulaires (CA) et l'ANN pour surveiller le changement d'utilisation des terres et ses perspectives d'avenir à Ahmedabad, en Inde (Yatoo et *al.*, 2022). Sekertekin et *al.* ont utilisé la technologie des réseaux de neurones artificiels pour simuler le LST diurne et nocturne dans les régions à climat aride à l'aide de données de séries chronologiques Landsat (Tan et *al.*, 2021). Deo et S¸ahin ont utilisé l'algorithme ANN combiné à la température de surface dérivée du satellite (LST) pour prédire le rayonnement solaire global à long terme dans le Queensland (Deo et S, ahin, 2017). En Irak, Dawood et *al.*, (2022) sur la base de l'indice de qualité de l'eau et des techniques statistiques multivariées, ont évalué et prédit la qualité des eaux souterraines avec l'aide du système d'information géographique. Ils ont appliqué des modèles de perception multicouche (MLP) pour modéliser l'indice de qualité de l'eau. Ils ont découvert que le réseau MLP prédisait avec précision la sortie (indice de qualité de l'eau).

3. Objectifs de l'étude

3.1. Objectif général

L'objectif général de ce travail est d'évaluer l'impact de l'occupation des terres sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota.

3.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- actualiser les connaissances sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota ;
- évaluer l'évolution spatio-temporelle (2008-2022) de l'occupation des sols de ladite commune et
- mettre en place un modèle de prédiction de la qualité des eaux souterraines de Za-kpota.

4. Hypothèses

Les hypothèses émises au vu des objectifs précités sont les suivantes :

- la Commune de Za-kpota a connu une occupation anarchique du sol au fil des années ;
- les eaux souterraines de la commune ont connu une détérioration de leur qualité physico-chimique et cette détérioration de la qualité des eaux est due à une occupation du sol (activités anthropiques).
- les modèles de l'Intelligence Artificielle constituent des outils adéquats pour la prédiction de la qualité des eaux souterraines de Za-kpota

CHAPITRE 1 : ZONE D'ETUDE

1.1. Présentation du milieu d'étude

1.1.1. Organisation administrative et territoriale

L'une des neuf (9) communes du département du Zou la commune de Za-kpota est située entre 7° 08' et 7° 20' de latitude Nord et 2° 05' et 2° 20' de longitude Est et est limitée au Nord par la Commune de Djidja, à l'Ouest par la Commune de Bohicon l'Est par la Commune de Covè et au Sud par la Commune de Zogbodomey. Comptant une population de 132 818 habitants elle couvre une superficie de 409 km^2 répartie en soixante-neuf (69) villages et huit (08) arrondissements (RGPH4, 2013) que sont : Allahe, Assalin, Houngomey, Kpakpame. Kpozoun, Za-kpota, Za-Tanta, Zeko. La figure 1 présente la carte admistrative de la commune de Za-kpota.

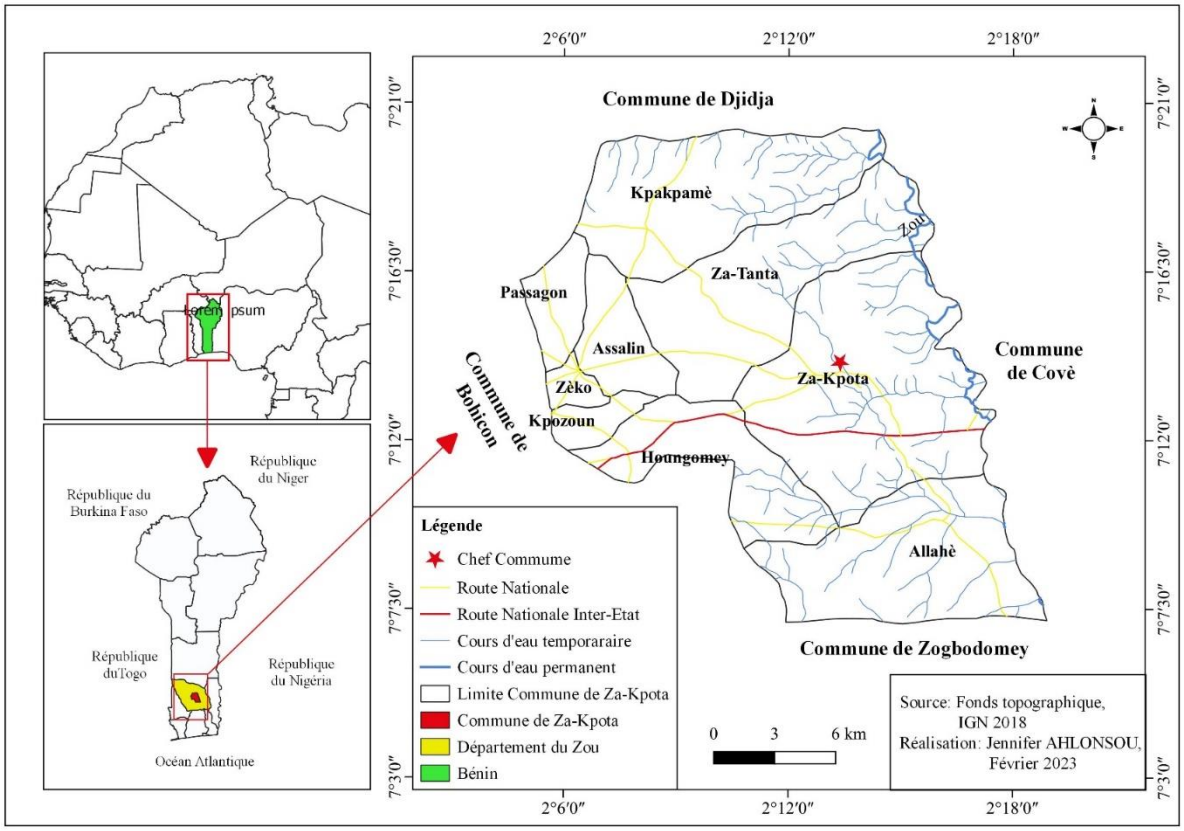


Figure 1: Carte administrative de la commune de Za-kpota

1.1.2. Géologie et Hydrogéologie

La géologie des matériaux de surface est principalement caractérisée par des formations de la limite Turonien-Coniacien (91-89 Ma) qui sont constituées de sables quartzeux avec gravier et argile kaoliniques subordonnés et/ou de grès ferrugineux. Les formations de l'époque Maestrichtien (environ de 70,6 à 65,5 Ma) couvrent le tiers de la commune et sont composées de

sable, argile, marne et calcaire avec des niveaux charbonneux à la base. De plus, environ 18% de la commune est recouverte de gneiss. Finalement, les dépôts alluviaux récents constitués de sable, argile avec gravier subordonné et de niveaux charbonneux sont observés le long de la rivière Zou. La Commune de Za-kpota se retrouve dans quatre unités géomorphologiques du pays. Près de 40% de la commune est située dans les plateaux du Nord et ce principalement sur des pentes et la plaine. Les plateaux du Sud occupent également plus du tiers de la commune. La pénéplaine inférieure couvre le Nord de la commune et les vallées de l'arrière-pays la limite Est. Za-kpota se trouve dans le plateau d'Abomey. Dans cette zone, on retrouve quatre formations géologiques.

- Au Nord-Est du Za-kpota, on a le socle cristallin recouvert de gneiss et affleure généralement le long de la bordure des plateaux septentrionaux. Son épaisseur dans les zones d'affleurement est en moyenne de 50 m. On y retrouve des fissures donnant une possibilité de pollution locale rapide par infiltration dans les fissures. L'obtention de l'eau est difficile dans ces zones car sa mobilisation nécessite toujours la faisabilité des travaux géophysiques.
- Au Nord-Ouest, se retrouve le biseau sec du Crétacé caractérisé par une très faible épaisseur des dépôts sédimentaires et une tranche saturée très faible ou inexistante. Les débits y sont relativement faibles, les niveaux statiques très bas car les formations susceptibles d'être aquifères existent dans cette zone mais sont stériles.
- Au sud de Za-kpota, on a le Turonien-Coniacien et le Maestrichtien-Paléocène inférieur qui occupent la plupart des plateaux septentrionaux (sauf celui de Zagnanado).
- Les sables (grès) quartzeux fins à très fins et les argiles grises verdâtres constituent les lithologies dominantes de cette unité. De minces niveaux charbonneux sont présents à la base de la sous unité IIa. Assez fréquemment, les calcaires (grain stones oolithiques bioclastiques) prennent un développement considérable (plus d'une dizaine de mètres à Onigbolo). C'est le domaine des aquifères dits discontinus, peu perméables et très poreux. La présence des pores permet une propagation lente des contaminants.
- Finalement, les dépôts alluviaux récents constitués de sable, argile avec gravier subordonné et de niveaux charbonneux sont observés le long de la rivière Zou.

La figure 2 présente la carte hydrogéologique de la commune de Za-kpota.

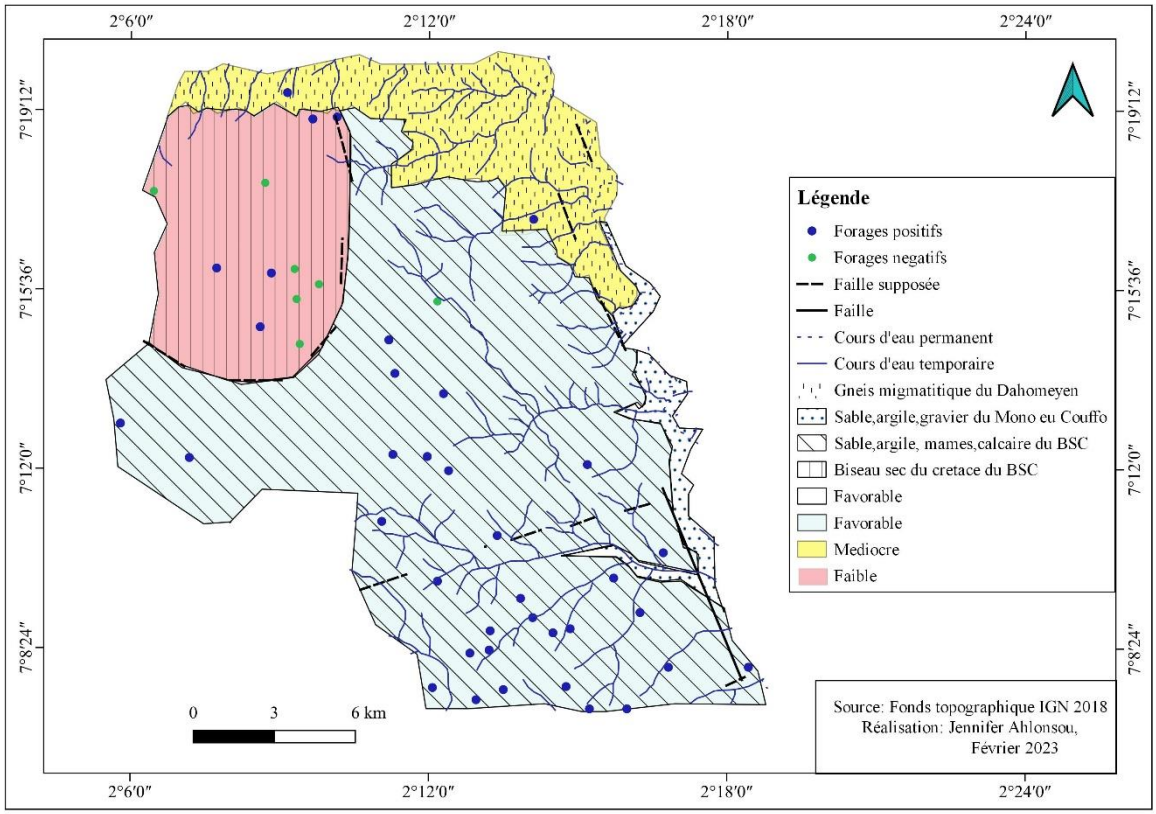


Figure 2: Carte géologique et hydrogéologique de la commune de Za-kpota

1.1.3. Relief, Climat et Hydrographie

1.1.3.1. Relief et Climat

Le relief de la commune est en général peu accidenté. Il est dominé par un plateau uniforme bordé par une légère pente en direction du lit de la rivière Zou. Le dénivelé est d'environ 237 m entre le point le plus haut situé dans la portion Nord-Ouest de la commune et le point le plus bas dans la partie Sud-Est.

Du point de vue climatique, la commune de Za-kpota reçoit l'influence du climat subéquatorial caractérisé par :

- deux saisons de pluies, une grande de mi-mars à mi-Juillet et une petite de Septembre à Novembre
- deux saisons sèches dont la grande s'étale sur Décembre à Mars et la petite couvre la deuxième moitié de Juillet et le mois d'Août.

La moyenne pluviométrique annuelle est de 980 mm avec de fortes fluctuations inter- annelles au cours des 40 dernières années, source d'incertitudes et d'aléas climatiques pour la localité. La température varie entre 24°C et 34°C avec de moyennes amplitudes thermiques. Les mois de janvier et février constituent les mois les plus chauds tandis qu'entre juin et juillet, il fait plus froid.

1.1.3.2. Hydrographie

Sur le plan hydrographique, la commune de Za-kpota est arrosée par plusieurs cours d'eau dominés par le fleuve Zou. Celui sert de limite de la commune avec les communes de Covè et de Zagnanado. Il reçoit, directement ou indirectement, les eaux de plusieurs rivières comme Toga, Dètè, Hla, Gbadaya, Za-gbo, Vlô. Elle bénéficie d'un réseau hydrographique très dense (avec au moins 4 arrondissements bien arrosés sur les 8 que compte la commune. Vlo prend sa source à YOHOUE (TANTA), se communique avec Toga qui se jette dans le Zou. Dètè prend sa source à TANTA, passe par DETEKPA (Za-kpota) avant de se jeter dans le Zou. La rivière Toga prend sa source à Dan-Tota (ZEKO), traverse Kpakpamè et Tanta avant de se jeter dans le fleuve Zou. Du fait de la présence de nombreux cours d'eau comme ci-dessus mentionné, il existe également une multitude de bas-fonds dont la plupart restent insuffisamment inexploités. Ces bas-fonds situés aux abords des fleuves Zou (sur 7 km environ) dans la localité de Za-kékéré, Gnavè et Kiti (sur 5 km environ) dans la localité de Gnanvèdji, Toga (sur 5 km environ) dans les localités de Togadji, Assoukahoun et Agblohomon dans Za-Kékéré, de Zagbo dans la localité de Za-hla, ainsi que Batè et Avounkousoussé dans la localité de Hèhounli servent essentiellement pour des pépinières et quelques cultures de décrue (surtout le maïs). Non aménagés, ils sont périodiquement soumis aux dégâts des crues qui détruisent les cultures dans la plupart des cas, à quelques jours de leur maturité. Ce qui décourage les producteurs qui s'y adonnent. La figure 3 présente la carte hydrographique de la commune de Za-kpota.

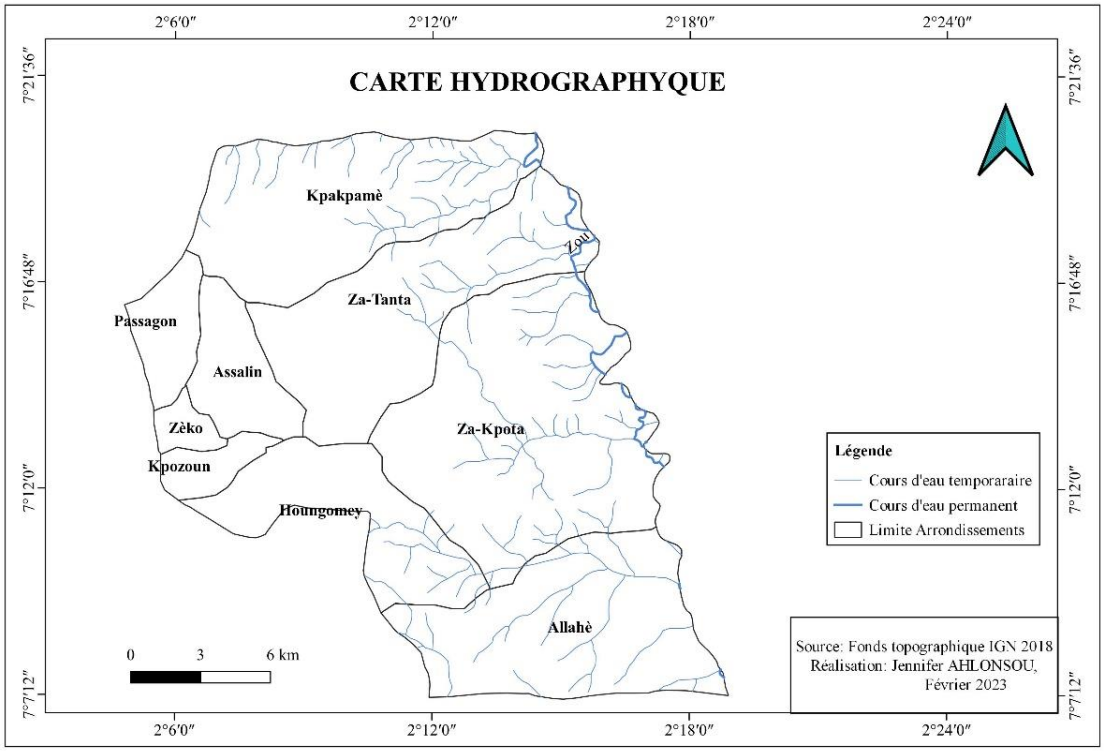


Figure 3: Carte hydrographique de la commune de Za-kpota

1.1.4. Sol et Végétation

Trois types de sols sont rencontrés dans la commune de Za-kpota.

Il s'agit des :

- sols ferralitiques communément appelés terres de barre, pauvres en matières organiques et en minéraux à cause de leur longue utilisation ;
- sols ferrugineux tropicaux, mais moins pauvres, très peu profonds du fait des affleurements concrétionnés ;
- sols hydro-morphes encore riches et propices à la production agricole qui sont rencontrés dans les dépressions et les bas-fonds.

La végétation quant à elle, est une forêt claire, qui a été fortement détruite du fait de la forte poussée démographique. Cette végétation est quasiment remplacée aujourd'hui par des habitations et des champs de cultures et des agrumes sur les terres de plateau alors que les terres de bas-fonds et autour des cours d'eau gardent encore quelques reliques. Le couvert végétal se trouve présentement dominé une palmeraie artificielle. La végétation naturelle ou spontanée est dominée par l'espèce appelée en Fon « Zaman », suivie de Azadiracta indica. On note la

présence, tant dans la strate arbustive que dans la strate herbacée, de quelques espèces médicinales telles que « Agatoun » dont les feuilles sont utilisées contre les brûlures et les plaies, « ganganlissè » dont les feuilles sont utilisées contre les maux de dents et pour la régénération du sang, appelée en fon « Kosso » dont les écorces contribuent à la régénération du sang.

1.1.5. Activités socio-économiques

Les principales activités économiques menées dans la commune sont : l'agriculture pratiquée dans tous les arrondissements aussi bien par les hommes que par les femmes, la pêche avec la production de poissons continentaux sur la rivière Zou, la production animale limitée au petit bétail. En plus de ces activités principales, la production d'huile de palme, la transformation des produits vivriers, le commerce et l'artisanat sont également pratiqués.

L'agriculture est la base du développement de l'économie de Za-kpota. Elle mobilise aujourd'hui près de 75% de la population active. En 2015, le potentiel en terre cultivable de la commune a été estimé à 28 893 ha, soit 70,64% de la surface communale. L'arachide, le niébé, le maïs et le manioc occupent respectivement 35,9%, 28,1%, 12,9% et 12,8% des ménages agricoles (RGPH4, 2013). Les cultures pérennes sont également pratiquées. Elles concernent essentiellement le palmier à huile (*Elaeis guineensis*), les plantations d'orange (*Citrus sinensis*.), les plantations de tecks (*Tectona grandis*), d'anacardes (*Anacardium occidentale*) et d'Acacia (*Acacia auriculiformis*). L'agriculture est de type extensif pratiquée sur de petites superficies. Ces dernières années, les actifs agricoles ont bénéficié de l'appui des projets et des ONGs en termes de renforcement des capacités et d'organisation en filières. La pêche quant à elle est une activité pratiquée dans la commune grâce à la présence de quelques cours d'eau (le Zou et quelques rivières) poissonneux. Pour ce qui est de l'exploitation des cours d'eau, la plupart des rivières servent à l'eau de boisson pour l'homme ou sont utilisées pour les pépinières, l'abreuvage des animaux et pour les cultures de décrue. Quelques rivières poissonneuses servent à la pêche, surtout dans l'arrondissement d'Allahé, de Za-kpota (Za-Kékéré) et de Kpakpamè. La pisciculture est également pratiquée dans quelques fermes piscicoles privées grâce aux sols hydromorphes qui facilitent la mise en place de trous à poissons.

L'élevage est pratiqué dans la Commune de Za-kpota mais il s'agit beaucoup plus de l'élevage domestique. Il est pratiqué par environ 50% des actifs de la commune. Les espèces concernées

sont les bovins, les ovins, les caprins, les porcins et la volaille (essentiellement poulets et pintades). Les activités concernées par l'artisanat sont la couture, la vannerie, la coiffure, la maçonnerie, la menuiserie, la forge, la réparation de vélomoteur, la mécanique, la soudure et le tissage. Ces activités sont pratiquées un peu partout dans la commune, mais plus particulièrement dans l'arrondissement de Zèko et ses périphéries. Plusieurs produits agricoles font l'objet de transformation à Za-kpota. Il s'agit du palmier à huile, de l'arachide, du manioc, du maïs et du niébé. Dans le cas du palmier à huile, les noix de palme sont transformées en huile de palme communément appelée huile rouge et les noix de palmistes sont transformées en huile de palmiste. C'est une activité qui occupe principalement les femmes. La transformation du vin de palme en boisson locale " *Sodabi "* se fait principalement par les hommes représentant 93% des acteurs contre 7% pour les femmes. L'arachide est transformée en galettes "*Kluiklui*'' et en huile d'arachide. C'est également une activité menée exclusivement par les femmes (surtout celles de Kpozoun et Tindji) à l'échelle de la commune. Le maïs est transformé en « akassa » exclusivement par les femmes dans les arrondissements voisins du marché de Tindji. Malgré l'importance de la production agricole, la Commune de Za-kpota ne dispose pas d'unité adéquate de transformation agro-alimentaire à l'exception de la seule usine d'agrume d'Adjido qui ne fonctionne pas jusqu'à ce jour. La photo 1 présente un champs d'arachides de la commune.



Photo 1 : Champs d'arachides (Ahlonsou, Décembre 2022)

CHAPITRE 2 : DONNEES, MATERIEL ET METHODES

2.2. Données utilisées/collectées

2.1. Différentes données collectées

- **Images satellitaires**

Les images satellitaires sont des images prises par des satellites en orbite. Elles montrent une zone éclairée par le soleil. La principale source à partir de laquelle les images LANDSAT sont disponibles est le site web «EARTHEXPLORER» de l'USGS (United States Geological Survey): http://earthexplorer.usgs.gov/. Les images sont consultables en ligne et en version compressée (dégradée) sans inscriptions au site web. Cependant, afin de pouvoir obtenir les images et donc de réaliser des traitements particuliers, les images Landsat de Décembre 2008, 2013, 2018 et 2022 ont été téléchargées. Ce mois a été choisi car c'est le mois ou les travaux de terrain ont été faits.

- **Données sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines de Za-kpota**

Les données sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la Commune de Za-kpota nous ont été fournies par le Service Qualité des Eaux de la DG Eau. Il s'agit d'un fichier Excel comprenant les résultats des différentes analyses des paramètres physico-chimiques effectuées sur les eaux souterraines des différents arrondissements de la Commune. Notons aussi que nous avons les données issues de nos travaux de 2019 qui ont été complétées et actualisées par une campagne de mesures sur le terrain et au laboratoire en décembre 2022 et février 2023.

2.2. Matériels

Pour la réussite de ce travail, nous avons utilisé un bon nombre de matériels que sont :

- des flacons de prélèvement en polyéthylène de 1,5 l pour les échantillons destinés aux analyses physico-chimiques,
- une grande glacière pour la conservation des échantillons,
- un GPS de marque GARMIN pour prendre les coordonnées géographiques des points de prélèvements,
- un ruban adhésif et un marqueur pour l'étiquetage des flacons,
- un carnet pour relever les données physiques sur le terrain,
- un miltiparamètre Aquaread AP700,
- la verrerie de laboratoire (tubes, erlenmeyer,…),
- un spectrophotomètre HACH LANGE DR 2800 pour le dosage des éléments

chimiques de l'eau,

- des réactifs de laboratoire pour le dosage,
- une balance de précision,
- un agitateur magnétique.

2.3. Méthodologie

La rédaction de ce mémoire a été faite suivant une méthodologie scindée en plusieurs étapes dont :

- la recherche documentaire,
- l'échantillonnage d'eau dans les puits et forages,
- les analyses physico-chimiques,
- le traitement des images satellitaires,
- détermination des faciès géochimiques des eaux,
- calcul de l'indice de qualité de l'eau (IQE),
- le traitement des données d'analyses et l'élaboration des modèles de prédiction de la qualité des eaux souterraines.

2.3.1. Recherche documentaire

La recherche documentaire s'est basée sur les travaux antérieurs réalisés dans la Commune de Za-kpota et des travaux ayant abordés des thèmes similaires dans d'autres régions. Pour se faire un bon nombre d'ouvrages généraux, de mémoires, de thèses et surtout des rapports des projets d'hydraulique villageoise ont été consultés. Cette étape nous a permis de parcourir de long en large le sujet, de collecter les informations existantes, de les traiter et de les analyser afin de mieux aborder le sujet.

2.3.2. Echantillonnage d'eau dans les puits et forages

Le choix de ces différents sites de prélèvement a été fait sur la base des anciennes données physico-chimiques de 2008. Seuls les forages et puits qui ont de fortes concentrations ont été choisis. Au total 30 sites dont 5 forages et 25 puits ont été échantillonnés. La figure 4 présente la carte d'échantillonnage.

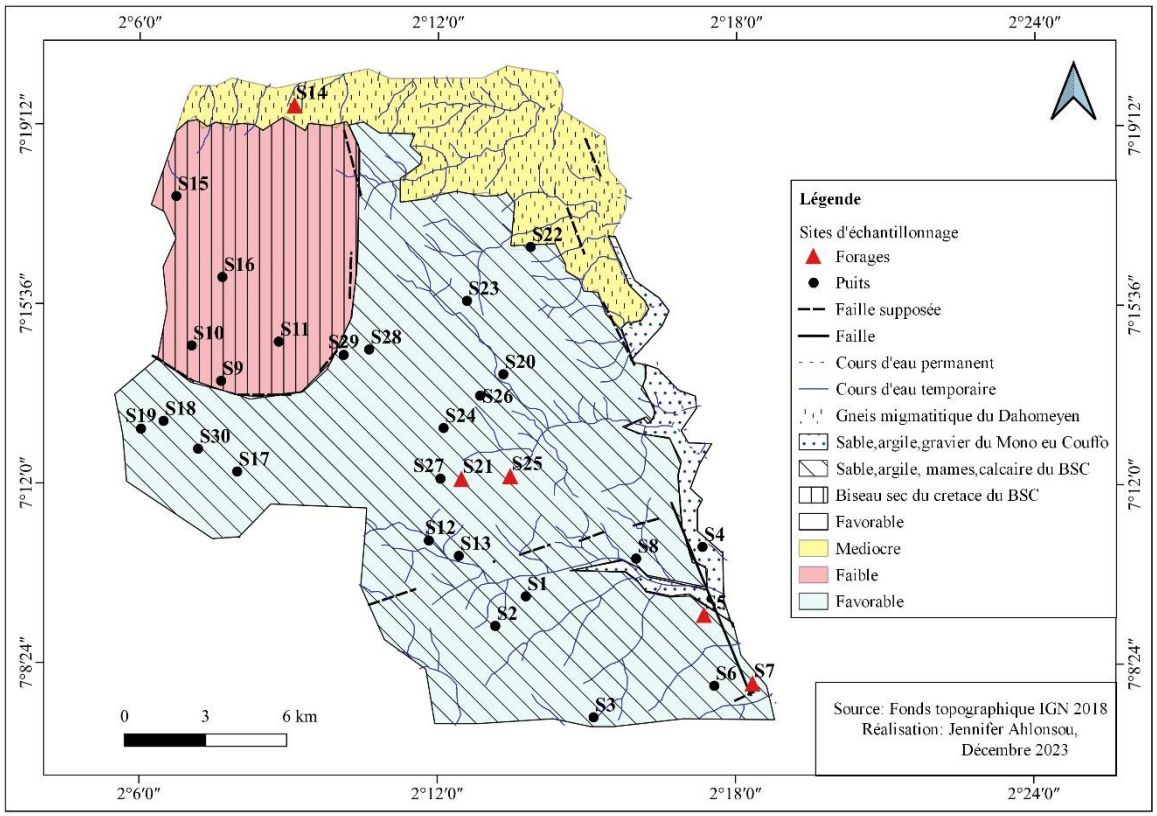


Figure 4: Localisation des points de prélèvement d'eaux

Les échantillons d'eau prélevés ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de capacité 1.5 litre, préalablement lavés à l'eau distillée. Ces flacons ont été rincés trois fois avec l'eau à prélever avant de passer au prélèvement proprement dite. Au niveau des puits l'eau est prélevée à l'aide d'une puisette puis embouteillée de façon à éviter l'emprisonnement des bulles d'air. Par contre au niveau des forages le prélèvement des échantillons d'eau a été direct à la pompe manuelle. La conservation des échantillons du terrain au laboratoire a été faite à l'aide d'une glacière à 4 °C. Sur le terrain les paramètres physico-chimiques *in-situ* que sont la température le pH la conductivité et l'oxygène dissous ont été mesurés avec le Multi-paramètre (AQUAREAD AP700).

2.3.3. Analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques ont été faites au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) de l'Institut National de l'Eau (INE), et ceci dans de meilleures conditions. Les paramètres physico-chimiques ont été déterminés à l'aide de deux appareils à savoir : le Colorimètre (DR890) pour la mesure de Matières En Suspension (MES) et des Solides Totaux Dissous (TDS) et enfin le Spectrophotomètre HACH LANGE DR 2800 pour la lecture des absorbances des nutriments (chlorure, sulfate, calcium, magnésium, carbonates, bicarbonates, fluorure,

sodium, nitrates, Nitrites, manganèse, ammonium, ortho-phosphates, potassium. fer total et le CO_2 libre) au laboratoire. L'analyse des ions est faite en suivant des méthodes bien définies telle que la méthode au Salicylate de sodium pour le dosage des nitrates et la méthode au Réactif de Zambelli pour le dosage des nitrites indiquées par Rodier et al. (2009).

2.3.4. Traitement des images satellitaires

Les traitements thématiques sont les traitements qui permettent de produire de nouvelles informations à partir des images téléchargées. Le logiciel utilisé ici pour ces traitements est le logiciel **Qgis 3.16** et plus précisément l'extension **Semi-automatic Classification Plugins (SCP)**. Ce traitement se fait de la manière suivante :

❖ **Prétraitement**

Cette étape a consisté l'importation des images, au paramétrage du logiciel et à la composition colorée des bandes ; cette étape est indispensable au traitement. La composition colorée est une combinaison des bandes spectrales reposant sur le principe d'affectation des bandes d'image à trois plans d'affichage basé sur trois couleurs primaires : rouge, vert et bleue. Des sept bandes que comportent nos images Landsat, seules les bandes 4, 3 et 2 ont été respectivement affectées aux canaux Rouge, Vert et Bleu donnant une composition colorée en fausses couleurs standards. Cette combinaison a été choisie, car elle présente la meilleure discrimination des types d'occupation du sol.

❖ **Traitement**

Le traitement des images consiste à l'identification des différentes unités d'occupation du sol et à la classification de l'image. La classification supervisée a été choisie dans le cadre de notre étude. Au cours de cette classification, l'analyste identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information). Ces échantillons forment un ensemble de données-tests. La sélection de ces données-tests est basée sur les connaissances de l'analyste, sa familiarité avec les régions géographiques et les types de surfaces présents dans l'image. La classification supervisée commence donc par l'identification des classes d'information qui sont ensuite utilisées pour définir les classes spectrales qui les représentent.

❖ **Post-traitement**

Cette étape consiste à l'évaluation, la validation de la classification et la mise en page de la carte

réalisée. Pour évaluer la fiabilité de notre classification, nous avons choisi la méthode pratique qui est la validation sur le terrain. Pour ce faire, nous avons lors de nos enquêtes, pris les coordonnées de quelques unités d'occupation du sol que nous avons projeté sur les différentes images classifiées afin de voir si ces dernières reflètent les réalités du terrain. Après cette phase réussit, nous avons converti les images classifiées du mode raster en mode vecteur. La production cartographique a consisté à élaborer les cartes d'occupation du sol en ajoutant de nouvelles couches d'informations, le nord géographique, l'échelle et la légende.

2.3.5. Détermination des faciès géochimiques des eaux

Le principal outil utilisé pour identifier les faciès hydrogéochimiques est le logiciel **DIAGRAMME** créé par Roland SIMLER du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau. Ces fonctions sont variées et complètes, en voici quelques-unes : les diagrammes et les paramètres calculés : balances ionique, teneurs en cations, dureté, teneurs en anions, … Toutes les fonctionnalités n'ont pas été utilisées, mais ce logiciel s'avère être simple d'utilisation. De ce fait les diagrammes de PIPER a été établit grâce à ce logiciel. Les données projetées dans le logiciel, permet d'identifier les différents faciès hydrogéochimiques de la zone.

2.3.6. Calcul de l'indice de qualité de l'eau (IQE)

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est une technique de classification de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes internationales respectives. En d'autres termes, l'IQE résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes simples (par exemple, excellent, bon, mauvais…etc.), en générant un score qui décrit l'état qualitative de l'eau en vue d'un usage domestique. Cette méthode a été initialement proposée par Horton (1965) et Brown et *al.* (1970). Dans cette approche, Une valeur numérique appelée poids (weight), comprise entre 2 et 5, est attribuée à chaque paramètre, reflétant son degré d'influence sur la qualité de l'eau. Le tableau 1 présente les poids paramètres physico-chimiques.

Tableau 1: Poids des paramètres physico-chimiques

Pramètres	Norme OMS (1998)	Poids (wi)	Poids Relatifs (Wi)
pH	6.5-8.5	3	0.115
TDS	500	3	0.115
SO_4^{2-} (mg/l)	500	3	0.115
Ca^{2+} (mg/l)	100	3	0.115
Mg^{2+} (mg/l)	50	3	0.115
NO_3^- (mg/l)	45	5	0.192
Cl^- (mg/l)	250	3	0.115
HCO_3^- (mg/l)	200	3	0.115
Total		26	1

Le poids relatif (Wi) est calculé par l'équation suivante :

$$\mathbf{Wi} = \mathbf{wi} / \sum_{i=1}^{n} \mathbf{wi} \qquad (1)$$

Wi est le poids relatif, wi est le poids de chaque paramètre et n est le nombre des paramètres

L'échelle de notation de la qualité (qi) de chaque paramètre est calculée par division de la concentration de chaque paramètre par la norme respective de l'OMS.

$$\mathbf{qi = (Ci/Si)} \ (2)$$

qi : échelle de notation de la qualité

Ci : la concentration de chaque paramètre en mg/l

Si : la norme de l'OMS de chaque paramètre en mg/l.

Pour calculer l'Indice de la Qualité de l'Eau, le Sous-Indice (SIi) est le premier indice à déterminer. A partir de la somme des Sous Indices de chaque paramètre, on détermine l'IQE de chaque échantillon :

$$\mathbf{SIi = Wi \times qi} \ (3)$$

$$\boxed{\mathbf{IQE} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{SIi}} \qquad (4)$$

Quatre classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (Tableau 2).

Tableau 2: Classification de l'eau selon l'IQE (Dawood et *al.*, 2022)

Type d'eau	**IQE**
Excellente	<50
Bien	50-100
Pauvre	100-200
Très pauvre	200-300
Impropre à la consommation	>300

2.3.7. Traitement des données d'analyses et élaboration des modèles de prédiction de la qualité des eaux souterraines

Le logiciel **Pytho**n (3.1) a été utilisé pour le traitement des données et l'élaboration des modèles de prédiction des eaux souterraines de la commune de Za-kpota. Les références utilisées sont les normes béninoises et celles de l'Organisation Mondiale de la Santé pour l'eau potable. A cet, différentes étapes ont été suivies.

- **Prétraitement**

Le prétraitement consiste d'une part choisir les différents modèles à utiliser. Ce choix est fait en tenant compte de la taille et les caractéristiques de nos données et de l'objectif qui est la modélisation de la qualité des eaux souterraines de Za-kpota. Nous avons des données temporelles et les modèles appropriés pour notre prédiction sont les réseaux de neurones. Les modèles de réseau de neurones sont une catégorie de modèles d'apprentissage automatique inspirés du fonctionnement du cerveau humain. Les modèles spécifiques utilisés sont les modèles de Artificial Neural Network (ANN), le Random Forest (RF) et la Regression Linéaire (RL). Un modèle de Artificial Neural Network (ANN) est un type de modèle d'apprentissage profond composé de couches de neurones interconnectés et sont utilisés pour des tâches telles que la classification, la régression, et la reconnaissance de motifs. Random Forest (RF) est un algorithme d'apprentissage automatique qui peut être utilisé pour des tâches de classification et de régression. C'est une technique d'ensemble (ensemble learning) qui construit un certain nombre d'arbres de décision pendant l'entraînement et les combine pour obtenir une prédiction plus robuste et généralisable. La régression linéaire est un modèle statistique qui cherche à établir une relation linéaire entre une variable dépendante (la variable que l'on souhaite prédire) et une ou plusieurs variables indépendantes (les caractéristiques ou covariables). Ce modèle est

utilisé pour modéliser et estimer la relation entre les variables, permettant ainsi de faire des prédictions ou d'analyser la nature de la relation.

Le prétraitement se poursuit avec l'importation des packages et des données, la statistique descriptive et la vérification des valeurs manquantes. S'en suivront l'identification des données d'entrées du modèle et la normalisation des données suivant la méthode min-max. Les données d'entrées des modèles sont : pH, TDS, NO_3^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, HCO_3^- et IQE calculé. La sortie est l'IQE prédit.

$$\boldsymbol{X\text{normalise}'} = \frac{\boldsymbol{X - \text{Min}(X)}}{\boldsymbol{\text{Max}(X) - \text{Min}(X)}}$$ (Goavec C. et Hoarau JF., 2015)

- $X\text{normalise}'$: La valeur normalisée de la variable X
- X : La valeur d'origine de la variable
- $\text{Min}(X)$: La valeur minimale de la variable X dans l'ensemble des données
- $\text{Max}(X)$: La valeur maximale de la variable X dans l'ensemble des donnée

Cette étape finit par la division du jeu de données en ensembles d'entraînement (75%) et de test (25%) et la création du modèle.

- **Traitement**

La phase de traitement consiste à définir les paramètres de chaque modèle, entraîner ou calibrer le modèle et enfin valider le modèle. Le calage des modèles a été faits sur les données d'entrainement et la validation sur les données de test. La figure 5 présente le schéma d'un modèle de réseau de neurones.

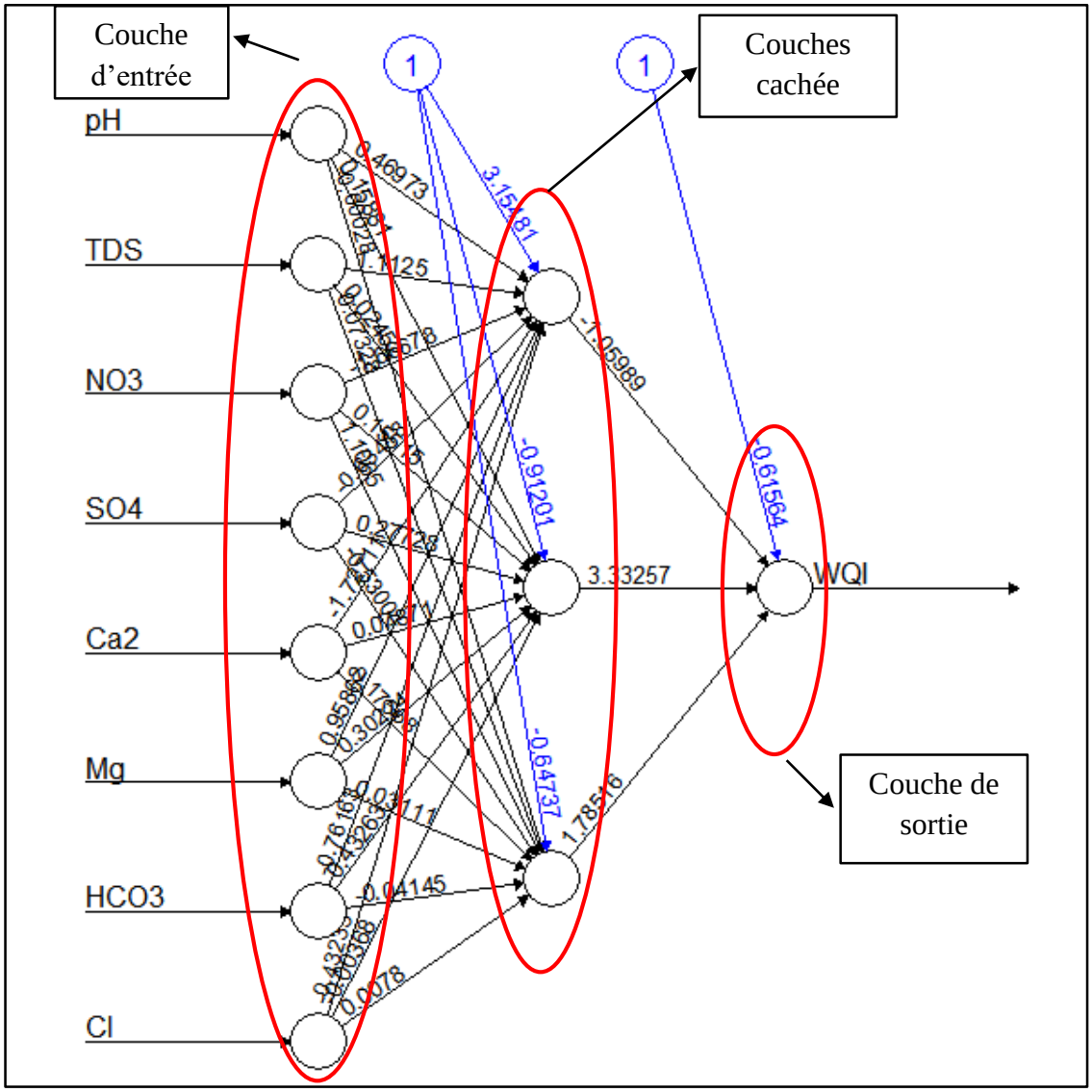


Figure 5: Schéma des réseaux de neurones

- **Post-traitement**

Cette étape consiste en l'évaluation des différents modèles. Les critères d'appréciation de la performance des modèles sont le RMSE (root mean square error), MSE (mean square error), MAE (mean absolute error) et le Nash (Nash-Sutcliffe Efficiency) (Nash et Sutcliffe, 1970) utilisé par Lawin (2007) et le RMSE (RMSE observations Standard deviation Ratio) (Moriasi et *al.*, 2007).

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Statistique descriptive des données physico-chimiques

3.1.1.1. Analyse statistique des données

Le tableau 3 présente la statistique descriptive des résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la commune de Za-kpota.

Tableau 3: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de commune de Za-kpota

Paramètres	Unités	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart Type
T	°C	28.90	30.59	34.18	1.44
Ph	-	5.59	6.57	7.83	0.46
CE	µS/cm	59.00	**228.80**	1344.00	248.48
TDS	mg/l	32.00	141.57	672.00	132.56
Salinité	PSU	0.02	0.08	0.58	0.11
OD	mg/l	6.74	7.28	7.50	0.22
MES	mg/l	0.01	32.11	81.00	25.93
NH_4^+	mg/l	0.01	0.51	3.31	0.68
NO_2^-	mg/l	0.03	0.70	5.34	1.02
NO_3^-	mg/l	0.01	19.13	**108.12**	24.51
Ca^{2+}	mg/l	1.43	22.16	**114.97**	22.55
Mg^{2+}	mg/l	3.92	16.79	52.28	14.62
Na^+	mg/l	0.37	4.05	13.50	3.68
K^+	mg/l	0.14	1.88	7.80	2.00
Cl^-	mg/l	0.40	9.89	42.60	8.56
SO_4^{2-}	mg/l	0.01	3.31	45.64	10.96
HCO_3^-	mg/l	6.15	38.74	252.15	59.32
Fe^{2+}	mg/l	0.00	0.13	1.14	0.21
F^-	mg/l	0.03	0.36	**2.05**	0.38
PO_4^{3-}	mg/l	0.01	0.52	**2.08**	0.40
CO_3^{2-}	mg/l	0.00	0.00	0.00	0.00
CO_2 Libre	mg/l	0.00	0.00	0.00	0.00
IQE	-	14.55	27.51	86.48	15.54

Les résultats d'analyses montrent que les eaux souterraines de la commune de Za-kpota ont une température qui varie de 28.90°C à 34.18°C avec une acidité marquée par des valeurs de pH compris entre 5.59 et 7.83, soit une moyenne de 6.57. L'ensemble des eaux échantillonnées apparaît moyennement minéralisé avec des conductivités généralement inférieures à 1500 µS/cm avec un minimum de 59 µS/cm et un maximum de 1344 µS/cm et une moyenne de

228.80 µS/cm. La minéralisation des eaux de cette zone est donc très variable allant des eaux très peu minéralisées aux eaux fortement minéralisées. En ce qui concerne les Solides Totaux Dissous (TDS) les résultats obtenus sont similaires à ceux de la conductivité électrique et varient de 32 à 672mg/l. Les valeurs de Matières En Suspension (MES) sont comprises entre 0.01 et 81 mg/l avec une moyenne de 32.11 mg/l. Les valeurs moyennes d'ammonium nitrites et nitrates sont respectivement 0.51 mg/l. 0.70 mg/l et 19.13 mg/l. Notons aussi que nous avons de fortes concentrations en nitrates allant jusqu'à 108.12 mg/l. Les teneurs moyennes en magnésium (Mg^{2+}), calcium (Ca^{2+}), sodium (Na^{+}), potassium (K^{+}), chlorure (Cl^{-}), sulfates (SO_4^{2-}), bicarbonates (HCO_3^{-}) et fer (Fe^{2+}) sont respectivement 16.79mg/l. 22.16mg/l. 4.05mg/l. 1.88mg/l. 9.89mg/l. 3.31mg/l. 38.74mg/l et 0.13mg/l. Ces teneurs sont généralement conformes aux normes béninoises sauf le cas des nitrates, nitrites, phosphores et fluorures qui dépassent par endroit. Ces fortes concentrations en nitrates, nitrites, phosphores et fluorures observées, indiquent des traces de pollutions des eaux souterraines de la commune.

3.1.1.2. Corrélation entre les variables

La figure 6 présente la matrice de corrélation entre les différents variables physico-chimiques. L'analyse de cette figure révèle de fortes corrélations significatives entre les variables suivantes : [Na^{+}-K^{+}] (0.9), [CE-TDS] (1), [CE-NO_3^{-}] (0.8), [TDS- NO_3^{-}] (0.8), [NO_3^{-}-Salinité] (0.8), [Ca^{2+}-Salinité] (0.8). Il existe également mais à un degré moindre une bonne corrélation entre [TDS-Ca^{2+}] (0.7), [CE-F^{-}] (0.7), [CE-Na^{+}] (0.7), [TDS-Na^{+}] (0.7), [TDS-K^{+}] (0.7), [NO_3^{-} -Na^{+}] (0.7), [SO_4^{2-}-F^{-}] (0.7), [Ca^{2-}-F^{-}] (0.7), [Salinité- Ca^{2+}] (0.7). Ces fortes corrélations observées entre les variables mettent en évidence la similarité des phénomènes à l'origine de la mise en circulation de ces ions dans les eaux souterraines de la zone d'étude. Ces différentes corrélations traduisent l'influence de chacun de ces paramètres dans la minéralisation des eaux de de la commune de Za-kpota.

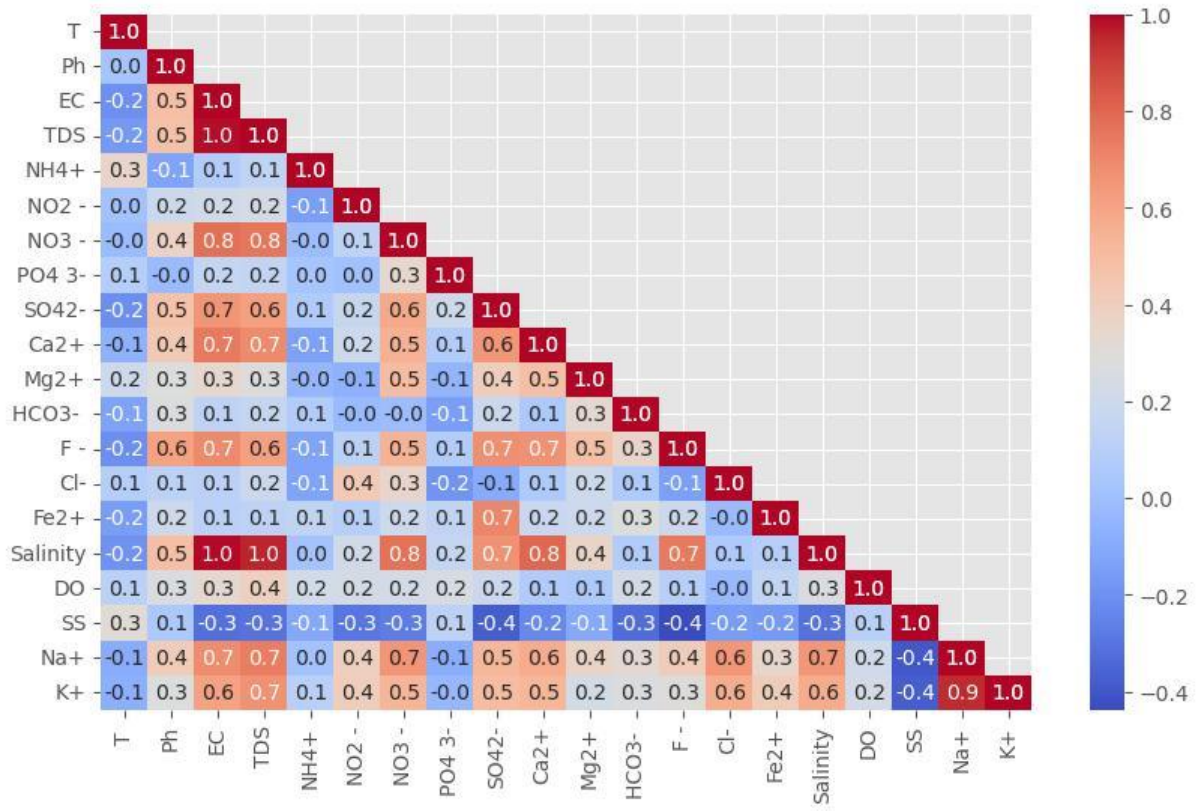


Figure 6: Matrice de corrélation

3.1.1.3. Faciès géochimiques des eaux

Les échantillons reportés sur le diagramme de Piper correspondent aux faciès bicarbonaté calcique et bicarbonaté magnésienne. Le reste est représenté par les faciès chloruré calcique et chloruré magnésienne. Les éléments majeurs montrent que Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^- et Cl^- sont respectivement les cations et anions dominants. Le diagramme de Piper montre que 75 %des points tracés des échantillons d'eaux souterraines tombent dans la zone de bicarbonate et calcium tandis que les autres 25 % dans la zone du magnésium et chlorure (figure 6). L'on constate généralement qu'il n'y a pas eu un grand changement des faciès au cours de ces dernières années. La figure 7 présente les différents faciès des eaux souterraine de la commune de Za-kpota au cours des années 2008 et 2022.

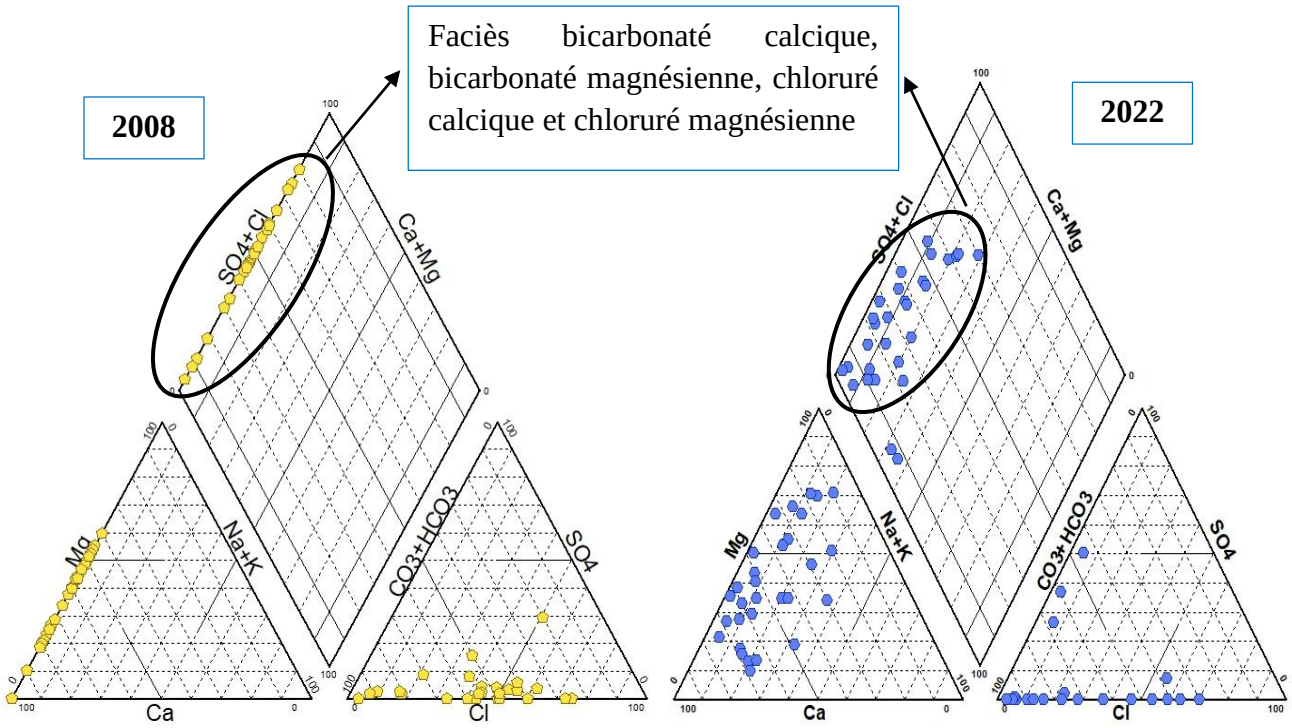


Figure 7: Faciès géochimique des eaux souterraines de Za-kpota de 2008 et 2022 (Diagramme de Piper, Juin 2023)

3.1.2. Analyse de l'évolution de l'occupation des terres de la commune de Za-kpota

3.1.2.1. Analyse des cartes d'occupation du sol

La figure 8 présente les cartes d'occupation de sol de 2008, 2013, 2018 et 2022. De cette figure, on conclut que les différentes unités d'occupation du sol de Za-kpota sont entre autres : les champs de cultures et de jachère qui regroupe les zones de cultures pérennes et les cultures annuelles, les agglomérations et les sols nus qui sont des espaces où la couverture végétale est absente et les zones d'habitation et la végétation composées de la forêt dense, forêt galerie et forêt claire.

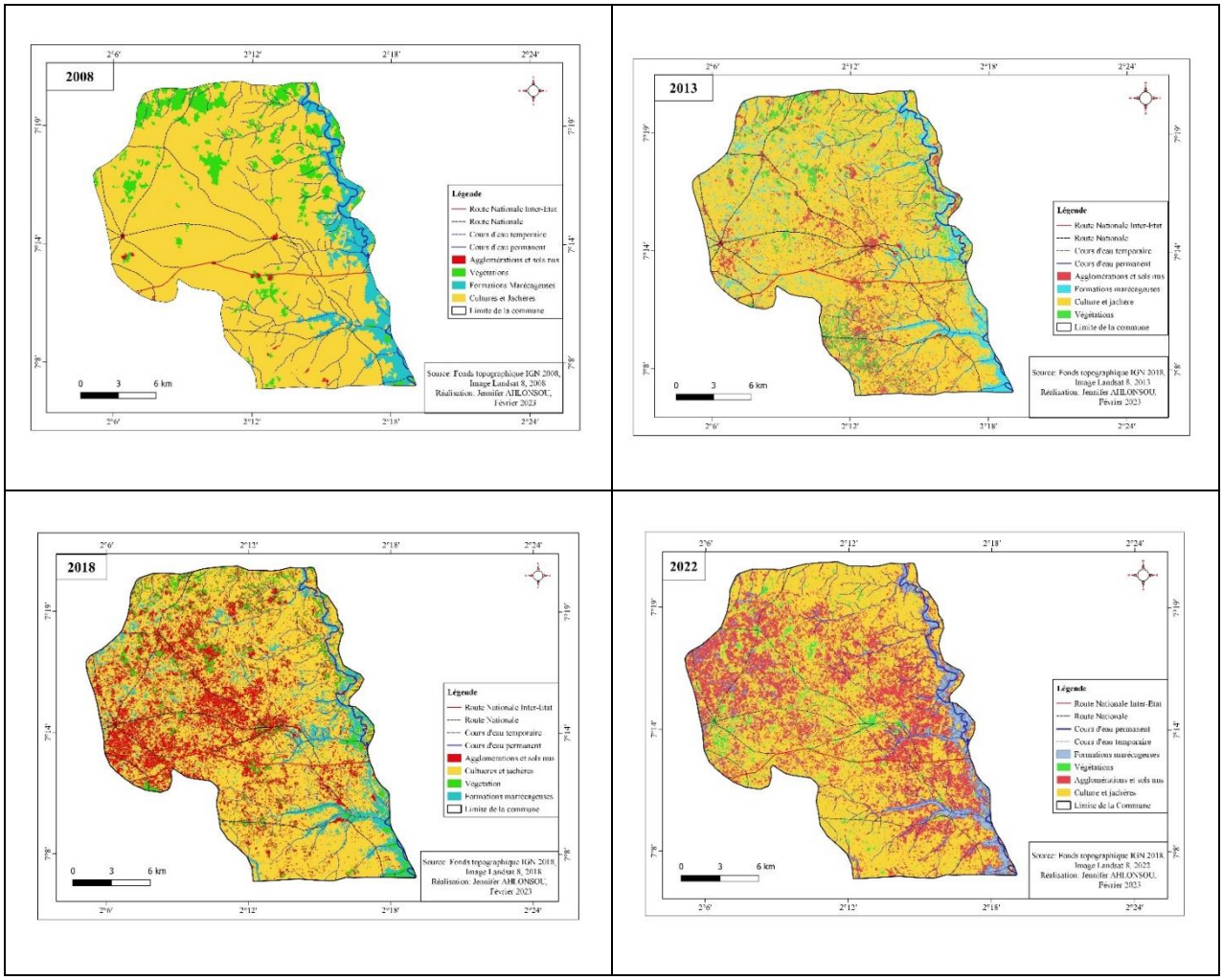


Figure 8: Carte d'occupation du sol de Za-kpota 2008- 2022

3.1.2.2. Evaluation des superficies des unités d'occupations du sol

La figure 9 présente l'évolution spatio-temporelle des différentes unités d'occupations du sol (2008-2022).

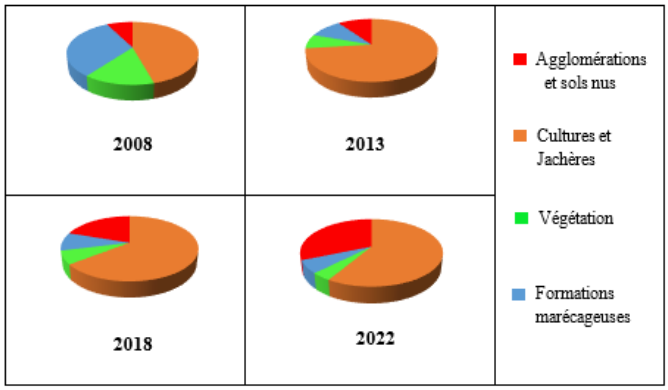


Figure 9: Evolution spatio-temporelle des unités d'occupations du sol (2008-2022)

Le tableau 4 présente les résultats de l'analyse statistique des différentes unités d'occupations du sol (2008-2022).

Tableau 4: Analyse statistique des superficies d'unités d'occupation du sol (2008-2022)

Unités	% 2008	% 2022	± %
Agglomérations et sols nus	7.6	31.31	**+23.71**
Culture et Jachère	45.6	58.59	**+12.99**
Végétation	14.7	3.88	**-10.82**
Formations marécageuses	32.1	6.21	**-25.89**

L'analyse des différents figures et tableau révèle qu'il y a eu au cours de ces dernières années une régression respective de 10% et de 25% de la végétation et formation marécageuse au profit des aires d'agglomération, sols nus, cultures et jachères.

3.1.3. Evolution temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota (Cas des Fluorures, Nitrates, Phosphore et de IQE)

Les figures 10, 11, 12 et 13 présentent l'évolution temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota : Cas des Fluorures, Nitrates, Phosphores et de IQE

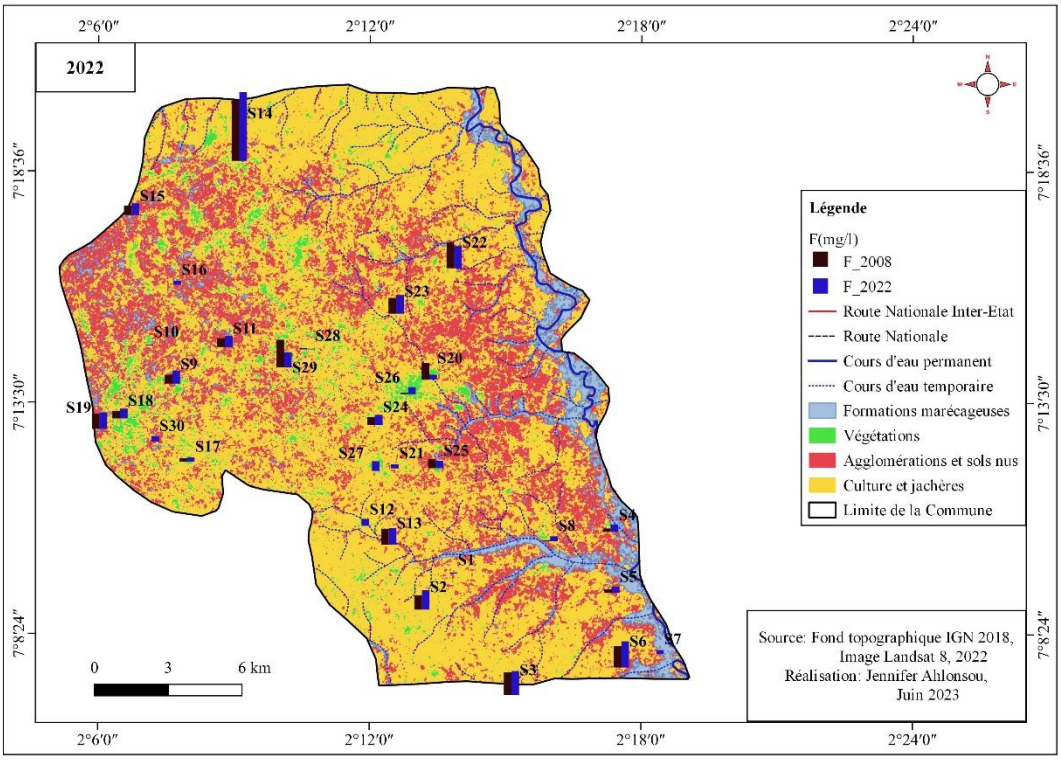


Figure 10: Evolution temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota : Cas des Fluorures

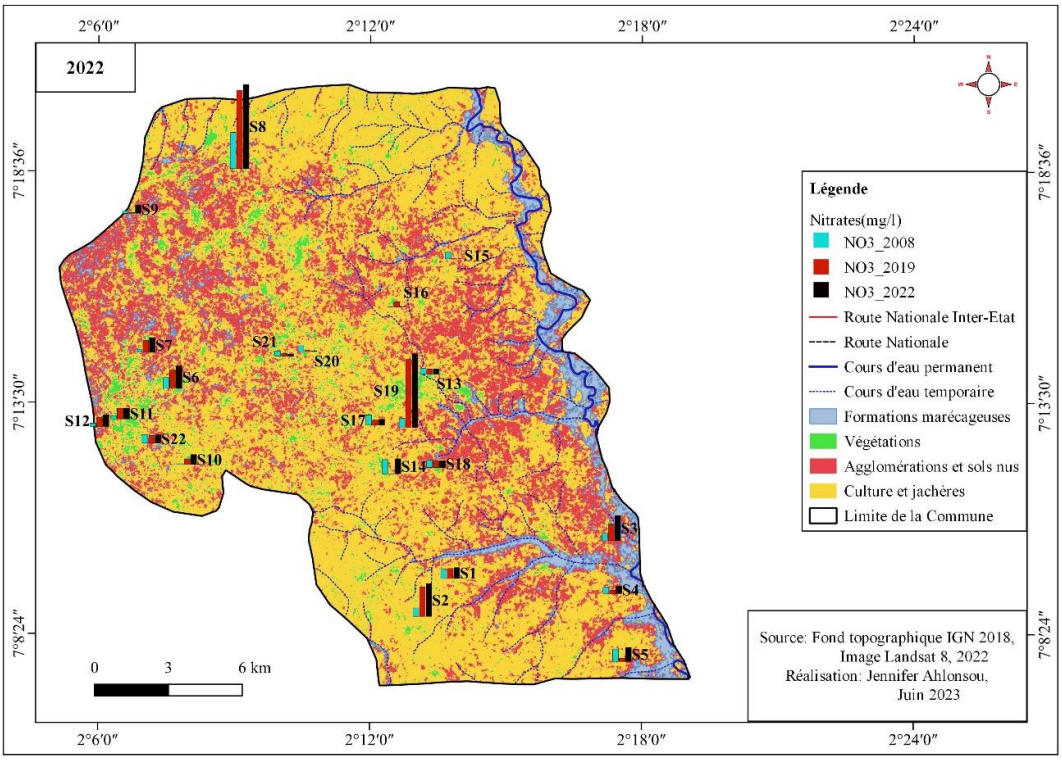


Figure 11 : Evolution temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota : Cas des Nitrates

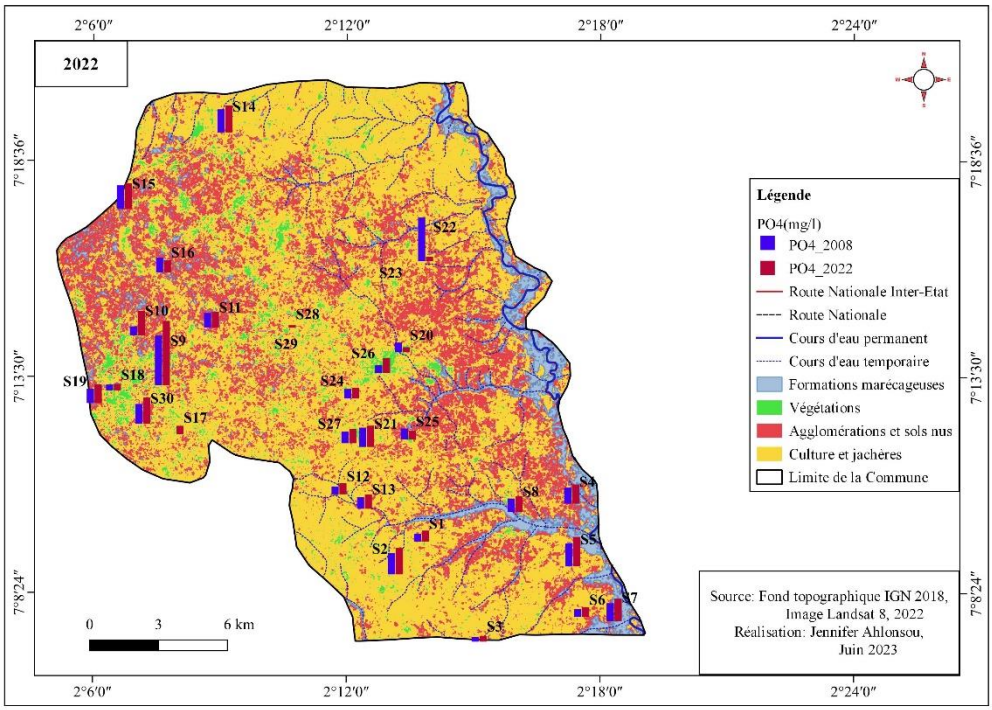


Figure 12: Evolution temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota : Cas des Phosphores

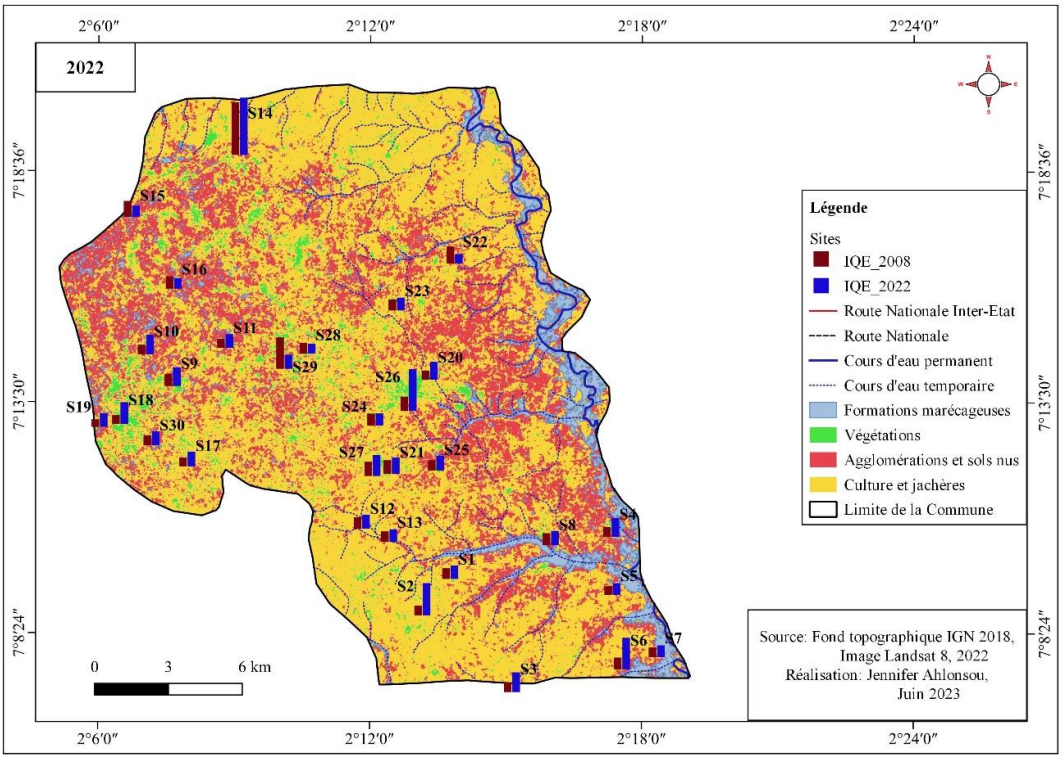
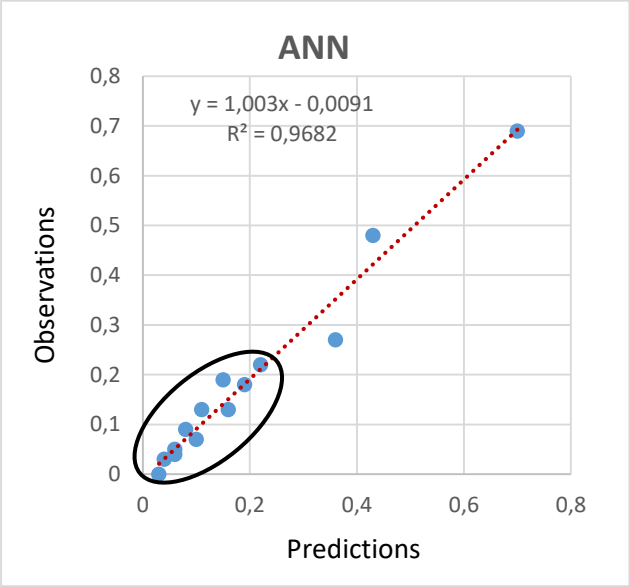


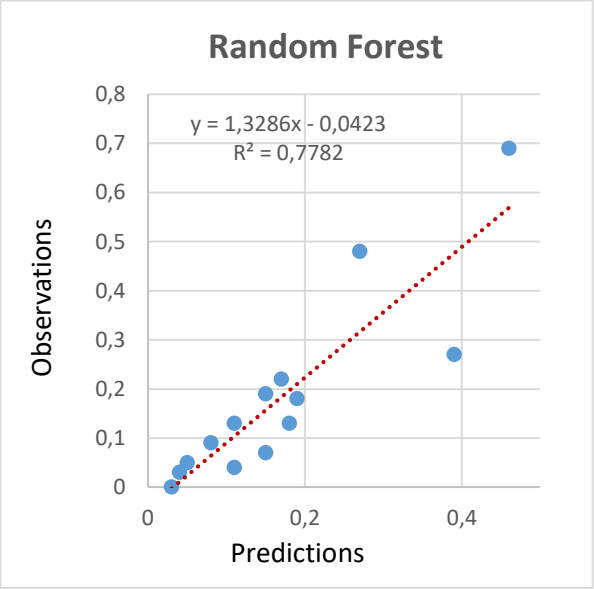
Figure 13: Evolution temporelle de l'Indice de Qualité de l'Eau des eaux souterraines de la commune de Za-kpota

Les différentes cartes d'évolution temporelle de la qualité des eaux souterraines de la commune révèlent qu'il y a généralement au cours de ces dernières années, une augmentation des concentrations en fluorures, nitrates, phosphores et de l'indice de qualité de l'eau. Cette augmentation des concentrations serait due à l'utilisation d'engrais par les agriculteurs pour accroitre la production agricole. Ainsi donc l'augmentation de l'indice de qualité des eaux souterraines de ladite commune serait due à l'augmentation des concentrations de certains minéraux au cours de ces dernières années. Plus l'indice de la qualité des eaux augmente, plus la qualité de ces eaux se détériore. Notons qu'à ce stade, les eaux de cette zone sont toujours de bonnes car l'IQE < 100 (Dawood et *al.*, 2022). Néanmoins, l'on constate par endroit la diminution des concentrations en fluorures et autres au fil du temps. Face à la détérioration progressive de la qualité des eaux souterraines au cours de ces dernières années, il est alors important d'établir un modèle de prédiction de la qualité des eaux souterraines de la commune de Za-kpota qui sera un outil de sensibilisation contre les différentes pollutions des eaux souterraines.

3.1.4. Modèle de prédiction de la qualité des eaux de la commune

La figure 14 présente les résultats de la modélisation de la qualité des eaux souterraines avec 3 modèles : ANN, RF et RL.





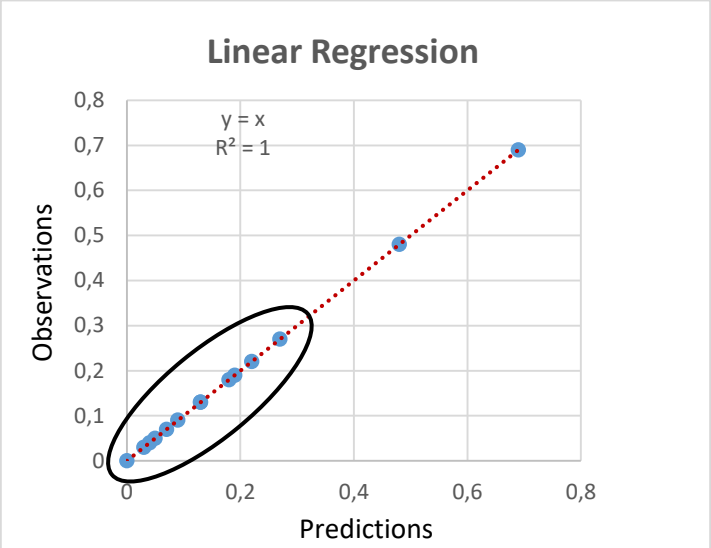


Figure 14: Valeurs IQE observées et prédites (ANN, RF et RL)

D'après ces figures, on constate qu'il y a eu augmentation de l'indice de qualité de l'eau après prédiction. Les modèles ANN et RL sont les meilleurs modèles pour prédire la qualité des eaux de ladite commune car on constate que les points sont alignés autour de la ligne de tendance, cela suggère une bonne concordance entre les valeurs observées et prédites. Cela se confirme aussi par les valeurs de RSME, R^2, et Nash que nous avons obtenues pour les modèles ANN et RL. Le tableau 5 présente les performances des modèles après calage et validation des modèles.

Tableau 5: Evaluation des performances des modèles

Modèles	**Calage**			**Validation**		
	RMSE	R^2	Nash	RMSE	R^2	Nash
ANN	7.51 E-05	1	1	0	0.98	0.98
RF	7.51 E-05	1	1	0.01	0.73	-19.28
RL	0.42	1	1	0	1	1

3.2. Discussion

Les résultats d'analyses montrent que les eaux souterraines de la commune de Za-kpota ont une température qui varie de 28.90°C à 34.18°C soit une moyenne de **30.59°C**. Ces températures élevées pourraient s'expliquer par l'influence de la chaleur ambiante sur les eaux prélevées et aussi par le gradient géothermique de la zone d'étude (Degbey et *al*., 2010). Les eaux de Za-kpota sont dans l'ensemble acides avec une acidité marquée par des valeurs de pH compris entre **5.59** et **7.83** avec une moyenne de **6.57**. L'acidité de ces eaux serait dû à une forte production du CO2 biogénique dans le milieu (Faillat et Drogue. 1993). Ces résultats sont conformes à ceux de Azokpota et *al*. (2022). Les valeurs de pH étant généralement inférieures à 7 expliquent l'absence des ions carbonates et du CO_2 libre car pH<7 ne favorise pas la production des ions carbonates et ces derniers réagissent souvent avec le CO_2 libre. L'ensemble des eaux échantillonnées apparaît moyennement minéralisé avec des conductivités généralement inférieures à 1500 µS/cm avec un minimum de **59 µS/cm** et un maximum de **1344 µS/cm** et une moyenne de **228.80 µS/cm**. La minéralisation des eaux de cette zone est donc très variable allant des eaux très peu minéralisées aux eaux fortement minéralisées. Les eaux de la zone sédimentaire présentent des conductivités variant entre 75 µS/cm (S19) et 524 µS/cm(S27) tandis que celles de la zone du biseau sec présentent des conductivités comprises entre 59 µS/cm (S9) et 184 µS/cm(S10). La plus forte conductivité électrique a été enregistrée au site S14 qui se retrouve dans une zone de socle avec une valeur de 1344 µS/cm. Cette variation de minéralisation des eaux souterraines est due d'après Appelo et Postma, de la nature des roches traversées au cours de l'infiltration d'une part et du temps de contact entre l'eau et les minéraux d'autre part (Appelo et Postma, 2009). En ce qui concerne les Solides Totaux Dissous (TDS) les résultats obtenus sont similaires à ceux de la conductivité électrique et varient de 32 à 672mg/l. Les valeurs de Matières En Suspension (MES) sont comprises entre 0.01 et 81 mg/l avec une moyenne de 32.11 mg/l. La présence abondante de MES dans les eaux de puits et forages analysées pourrait s'expliquer par l'exposition de ces eaux à la pollution. L'oxygène dissous (OD) est compris entre 6.74 et 7.50mg/l. Cette plage de valeurs est généralement due à la température élevée des eaux prélevée qui est liée à la profondeur des puits et forages. En effet, plus l'eau est peu profonde, plus la concentration d'OD est élevée car le vent créant des vagues à la surface augmente l'OD. Allant de 0.02 à 0.58, la salinité est trop faible et une salinité plus faible, contribue à une plus grande concentration d'OD car les sels affectent la solubilité des gaz en les faisant sortir de l'eau. Les valeurs d'OD sont en concordance donc avec les valeurs de salinités mesurées. Les valeurs moyennes d'ammonium nitrites et nitrates sont

respectivement 0.51 mg/l. 0.70 mg/l et 19.13 mg/l. Notons aussi que nous avons de fortes concentrations en nitrates allant jusqu'à 108.12 mg/l. Les nitrates sont très solubles dans l'eau ils migrent donc aisément dans la nappe phréatique lorsque les niveaux excèdent les besoins de la végétation. La présence de nitrates dans l'eau de consommation est principalement attribuable aux activités humaines (Saâdia et *al*.,2007). Les causes intrinsèques de cet état de chose sont les engrais de synthèses, les pesticides utilisés par l'agriculture et les rejets toxiques des activités industrielles (Dougnon 2017). Notifions que nous avons constaté lors de nos enquêtes sur le terrain l'utilisation de pesticides et herbicides par les agriculteurs pour accroitre la production **(Annexe 2, Photo 14)**. Les teneurs moyennes en magnésium (Mg^{2+}), calcium (Ca^{2+}), sodium (Na^{+}), potassium (K^{+}), chlorure (Cl^{-}), sulfates (SO_4^{2-}), bicarbonates (HCO_{3-}) et fer (Fe^{2+}) sont respectivement 16.79mg/l. 22.16mg/l. 4.05mg/l. 1.88mg/l. 9.89mg/l. 3.31mg/l. 38.74mg/l et 0.13mg/l. Ces teneurs sont généralement conformes aux normes béninoises. Les concentrations moyennes de fluorure et de phosphate sont généralement d'ordre de 0.01 à 2.08 mg/l et sont conformes aux résultats de Tossou et *al*. (2019). Les corrélations avec la CE, expliquent l'importance de ces éléments dans la minéralisation des eaux souterraines de cette zone. Cet axe exprime à la fois la minéralisation et la pollution organique de l'eau (Lagnika et *al.*, 2014). La corrélation NO_3^{2-}, Na^{+}, K^{+} et NO_3^{2-} met en évidence la relation eau-roche, tandis que la présence des nitrates en quantité élevé dans les eaux exprime la minéralisation rapide due aux activités anthropiques (Abdou et *al.*, 2016). Les échantillons reportés sur le diagramme de Piper correspondent aux faciès bicarbonaté calcique et bicarbonaté magnésienne. Le reste est représenté par les faciès chlorurés calciques et chlorurés magnésienne.

L'analyse des différentes cartes d'occupations du sol de Za-kpota, révèle qu'il y a eu au cours de ces dernières années une régression respective de 10% et de 25% de la végétation et formation marécageuse au profit des aires d'agglomération, sols nus, cultures et jachères. On en déduit donc que la commune de Za-kpota a connu une dynamique de l'occupation de ses terres entre les années 2008 et 2022. Les différentes cartes de l'évolution temporelle de la qualité des eaux souterraines de la commune révèlent qu'il y a au cours de ces dernières années, une augmentation des concentrations en nitrates, fluorures, phosphores et de l'IQE. Ces eaux étant de bonne qualités d'après la plage de l'IQE (Dawood et *al.*, 2022), mais leur qualité se détériore au fil du temps avec une augmentation de l'IQE. Ces augmentations seraient en lien avec l'utilisation constatée au cours de nos enquêtes sur le terrain, d'engrais (pesticides et herbicides) par les agriculteurs pour accroitre la production **(Annexe 2, Photo 14)**. Ainsi il est

donc important d'établir une relation entre la disparition des unités de l'occupation du sol et l'augmentation des concentrations observées dans les eaux souterraines de Za-kpota. La commune de Djougou a connu une extension de 2,78% de la superficie occupée par les habitats au détriment des forêts entre 2005 et 2015 et que les arrondissements les plus denses de la commune ont connu une dégradation de leurs eaux souterraines par une augmentation des valeurs de leur conductivité électrique et de leur concentration en chlorure et en nitrate (Alidou, 2017). Les travaux réalisés par Arsène et *al*. sur le bassin de l'Ouémé en 2014, les résultats de la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin en 1978, 1998 et 2010 ont permis de constater une régression de la savane arborée et arbustive ; de la forêt claire et de la savane boisée arborée ; de la forêt galerie et de la forêt dense d'une part et une progression des zones de cultures et jachères, des plantations et agglomérations et des sols dénudés. La régression significative des quatre formations est due à l'extension des aires de cultures et des jachères dans le bassin. Par ailleurs, le développement accru des aires de cultures et des agglomérations engendre une réduction progressive de l'étendue des surfaces boisées et la déstabilisation de la structure des sols. Cette dégradation du milieu physique impact sur le ruissèlement et l'infiltration des eaux. (Arsène et *al,* 2014). En effet, le développement accru des aires de cultures et des agglomérations engendre une réduction progressive de l'étendue des surfaces boisées et la déstabilisation de la structure des sols. Cette dégradation du milieu physique a des impacts sur le ruissèlement et l'infiltration des eaux. Aussi l'urbanisation, l'essor de l'industrie et de l'agriculture intensive ont accru, de manière diachronique, la pollution des masses d'eau. La présence des nitrates serait due utilisation abusive des produits sanitaires riches en azote et intrants dans la production cotonnière et des produits vivriers par les populations (Samari, 2007 in Adandedji, 2010). La pollution azotée provient des eaux usées domestiques, des effluents industriels (agro- alimentaires, papeteries...) et principalement du lessivage des engrais et effluents d'élevage dans les zones agricoles. Des nitrates peuvent également être rejetés par les stations d'épuration d'eaux résiduaires urbaines (Aziz A. 2014). Aussi, la diminution des concentrations observé par endroit, serait généralement dû aux changements observés au niveau de l'occupation du sol. En effet, on constate qu'on avait à ces endroits en 2008, la présence des cultures et jachères mais qui de nos jours sont remplacées par des agglomérations ou routes. Ainsi donc, ces terres ne reçoivent plus d'énormes quantités d'engrais comme dans les années 2008.

Les modèles ANN et de RL de prédiction de la qualité de l'eau montre qu'il y aura au fil des temps, une augmentation de l'indice de la qualité des eaux donc une détérioration progressive

de la qualité des eaux souterraines de Za-kpota. Le modèle RL ayant donné des performances trop juste (R^2=1, RMSE=1 et Nash=1) laisse à comprendre que ce modèle est trop performant pour prédire les données de qualité de l'eau. Le modèle qui pourra servir d'outils de sensibilisation est le modèle ANN. Ces résultats sont conformes au résultats Cao et *al*. (2019) qui, sur la base des données existantes sur l'utilisation des terres au Canada, ont effectué des prévisions à court terme du changement d'utilisation des terres à l'aide de modèles RNN de réseaux neuronaux récurrents. C'est aussi le cas de Dawood et *al.* (2022) en Irak, qui sur la base de l'indice de qualité de l'eau et des techniques statistiques multivariées, ont évalué et prédit la qualité des eaux souterraines avec l'aide du système d'information géographique. Ils ont appliqué des modèles de perception multicouche (MLP) pour modéliser l'indice de qualité de l'eau. Ils ont découvert que le réseau MLP prédisait avec précision la sortie (indice de qualité de l'eau). De nombreux chercheurs ont simulé et prédire des changements dans LULC et LST de villes autour d'algorithmes d'apprentissage automatique tels que le réseau de neurones artificiels (ANN) : Wuhan en Chine (Zhang et *al.,* 2022c), Ikom au Nigeria (Mohammad et *al.,* 2022), et Faisalabad au Pakistan (Tariq et Shu, 2020). Yatoo et al. (2022) ont utilisé la simulation d'automates cellulaires (CA) et l'ANN pour surveiller le changement d'utilisation des terres et ses perspectives d'avenir à Ahmedabad, en Inde.

Conclusion et suggestions

L'étude consiste à évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune de Za-kpota par l'apport de la télédétection et du Machine Learning. Les résultats des analyses des eaux échantillonnées indiquent que ces eaux sont généralement acides (pH variant entre 5.59 et 7.83) avec une minéralisation variable (59 µS/cm à 1344 µS/cm) selon la géologie du milieu. Ces eaux ont connu une détérioration de leur qualité physico-chimique. Aussi, l'analyse diachronique de l'occupation des terres de Za-kpota révèle qu'il y a eu au cours de ces dernières années, une régression de la végétation et formation marécageuse au profit des aires d'agglomération, sols nus, cultures et jachères. L'analyse diachronique de la qualité des eaux souterraines de la commune et l'utilisation accrue des herbicides et pesticides pour accroitre la production et la dynamique de l'occupation de terres de Za-kpota ces dernières années, confirment que la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la commune est due aux activités anthropiques. Il est donc nécessaire de trouver un moyen efficace pour sensibiliser la population sur ces pratiques qui polluent les eaux souterraines. Ainsi, Les résultats des modèles de prédiction (ANN, RF et RL) de la qualité des eaux souterraines élaborés, ont permis de conclure que les modèles basés sur les Réseau de Neurones Artificiels et Régression Linéaire permettent de mieux prédire (ANN : R^2=0.97 et RMSE=0 ; RL : R^2=1 et RMSE=0) l'évolution la qualité des eaux souterraines de la commune de Za-kpota.

Ainsi avant toute chose, il est essentiel de préserver au maximal la qualité des eaux souterraines. Comment veiller à ce que cela soit bien effectué ?

En respectant un périmètre de protection autour des points de captage et des zones de recharges afin de prévenir et de réduire toute pollution susceptible de corrompre la qualité des eaux prélevées. Le deuxième point essentiel est de la réduction de l'utilisation d'engrais azotés afin de réduire la présence des nitrates et autres difficilement biodégradables. Et enfin, lorsqu'il est observé un dépassement du taux de nitrates dans la ressource eau, on peut appliquer des traitements spécifiques, tels que la dénitrification biologique (utilisation de bactéries transformant les nitrates en azote gazeux) ou la dénitrification par échange d'ions (emploi d'une résine qui absorbe les nitrates de l'eau qui la traverse en libérant, en échange, des ions chlorures), pour éliminer les nitrates présents dans la ressource eau.

Toute fois pour appréhender la question de la pollution des eaux souterraines, il faut tenir compte de leur vulnérabilité ou non à la pollution. Alors, qu'en est-il de la vulnérabilité des eaux souterraines de Za-kpota à la pollution ?

Références bibliographiques

1. Abdou Babaye M. S., Sandao I., Saley M. B., Wagani I. et Ousmane B. (2016), Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (Sud-Ouest du Niger), Int. J. Biol. Chem. Sci. 10(6): 2728-2743, Decembre 2016.

2. Adandedji M.F. (2010) : Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique des eaux souterraines du plateau d'Abomey, Mémoire de Licence Professionnelle en Hydrologie. Université d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey- Calavi, 53p.

3. Ahlonsou A. J. (2020) Evolution spatio-temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines et impact de l'occupation du sol dans la commune de Za - kpota, Mémoire de Licence Professionnelle en Hydrologie. Université d'Abomey-Calavi, Université d'Abomey-Calavi, Institut National de l'Eau/Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, 66p.

4. Alassane A. (2004) : Etude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto Novo (Sud du Bénin) : identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle, Thèse de doctorat. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 145p.

5. Alidou A. H. (2017) : Impact de l'urbanisation sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines : Cas de la commune de Djougou. Mémoire de Licence Professionnelle en Hydrologie. Université d'Abomey-Calavi, 65p.

6. Appelo C.A.J. et Postma D. (2009): Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd Edition, 649p.

7. Arsène A., Djafarou A., Expedit V. W. et Michel B. (2014) : Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oueme à l'exutoire de Bétérou (Bénin), Afrique science, 128-142.

8. Ayad W. et Kahoul M. (2016) : Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de puits dans la région d'El-Harrouch (N.E -Algérie) [Assessment of physicochemical and bacteriological quality of Well water in the region of ElHarrouch (N.E-Algeria)], J. Mater. Environ. Sci. 7 (4) (2016). 1288-1297.

9. Aziz A. (2014), Pollution anthropique de cours d'eau : caractérisation spatio-temporelle et estimation des flux. Thèse de doctorat en Génie des Procédés pour l'Énergie et l'Environnement à l'université de Lorraine, 228p.

10. Azokpota E., Alassane Y. A., Alphonse S. A., Abdoul Kader A. M., Constant A., Virgile A., Jean C. A., Julien A., Daouda M. et Dominique S. (2022) : Caractérisation Physico-Chimique des Eaux de Surface, des Eaux des Puits Traditionnels et des Citernes Consommées dans les Mairies d'Agbangnizoun et Za-kpota Au Sud Bénin, Elixir Pollution 163(2022) 56064-56070.

11. Bao Q., An D., Thang N., Reza A. et Islam T. (2022): Random forest and nature-inspired algorithms for mapping groundwater nitrate concentration in a coastal multi-layer aquifer system *J. Clean. Prod.* 343 130900.

12. Benyamin H., Abdulhakim M. A. et Sadegh J. (2022) : Utilisation des terres urbaines et classification de l'occupation des sols avec apprentissage automatique interprétable - Une étude de cas utilisant Sentinel-2 et des données auxiliaires, Applications de télédétection : société et environnement 28 (2022) 100843, 1-18.

13. BGS (2002), Groundwater Quality: Burkina Faso. British Geological Survey. http://www.wateraid.org/~/media/Publications/groundwater-quality-information-burkina-faso.pdf.

14. Boubakar H. A. (2010) : Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER), Thèse de doctorat. Université Abdou-Moumouni de Niamey, 250p.

15. Bouraoui F. et Grizzetti B. (2014): Modelling mitigation options to reduce diffuse nitrogen water pollution from agriculture Sci. Total Environ, 468–469 1267–77.

16. Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A., Tozer, R.G., (1970). A water quality index– do we dare? Water Sew. Works 117, 339–343.

17. Campos- Taberner M., García-Haro FJ, Martínez B., Izquierdo-Verdiguier E., Atzberger C., Camps- Valls G. et Gilabert MA (2020) Understanding deep learning in land use classification based on Sentinel-2-time series; Rapports scientifiques 10:17188 (pp 1-12).

18. Cao C., Dragic´evi´c S. et Li S. (2019) Prévision à court terme du changement d'utilisation des terres à l'aide de modèles de réseaux de neurones récurrents ; Durabilité 2019, 11, 5376 ; doi :10.3390/su11195376.

19. Castrillo M. et López A. (2020):: Estimation of high frequency nutrient concentrations from water quality surrogates using machine lerning methods *Water Res.* 172.

20. Chandra S. et *al*. (2015), Evaluation du facteur hydrogéologique et de leur relation avec les fluctuations saisonnières de la nappe phréatique dans le district de Dhanbad, Jharkhand, Inde ISH J Hydraul Eng 21(2), 193-206 Chauhan.

21. Dawood AS, Jabbar MT, Al- Tameemi HH *et* Baer EM (2022) : Application de l'indice de qualité de l'eau et des techniques statistiques multivariées pour évaluer et prédire la qualité des eaux souterraines à l'aide du système d'information géographique. Journal of Ecological Engineering 2022, 23(6), 189–204.

22. Degbey C., Makoutode M., Ouendo E. M., et De Brouwer (2010) : Pollution physico-chimique et microbiologique de l'eau des puits dans la Commune d'Abomey-Calavi au Bénin en 2009, Int. J. Biol. Chem. Sci. 4(6): 2257-2271, December 2010.

23. Deo, Ravinesh C., Şahin, Mehmet (2017) : Prévision du rayonnement solaire mondial à long terme avec un algorithme ANN couplé à la surface terrestre dérivée d'un satellite (MODIS), température (LST) pour les sites régionaux du Queensland. Renouveler. Sust. Énergie. Rév.72 (mai), 828-848.

24. Dougnon (2017) : Pollution des cours d'eau du Benin : Quels impacts sur la biodiversité et la santé humaine, 28p.

25. Edgeworth F.Y. (1908) : Sur les erreurs probables des constantes de fréquence (suite). J.Roy. Statistique Soc. 71, 499-512.

26. El Mahdi B. (2011), Réseaux de neurones artificiels appliqués à la méthode électromagnétique transitoire infini TEM, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, 108p.

27. Faillat J.P. et Drogue C. (1993), Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique, Article in Hydrological Sciences Journal · June 1993, p215-229.

28. Goavec C. et Harau JF. (2015), Une mesure de la vulnérabilité économique structurelle pour une économie ultrapériphérique européenne : le cas de La Réunion, Géographie, économie, société 2015/2 (Vol. 17), 177-200.

29. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. H. et Friedman J. H. (2009): The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction (Vol. 2, pp. 1-758). New York, springer.

30. Horton R.K., (1965), An index number systemfor rating water quality.J.WaterPollut, Control Fed. 37 (3), 300–306.

31. INSAE (2015) : Que retenir des effectifs de populations en 2013 ? Rapport, 35p.

32. Kristin Seeber, Djoret Daïra, Aminu Magaji Bala et Sara Vassolo (2014) : Études de la qualité des eaux souterraines dans la plaine d'inondation du Logone inférieur en avril – mai 2013. Rapport N°7. 48p.

la recherche dans l'utilisation de la télédétection pour la science de la qualité des eaux intérieures : Moving towards multidisciplinary applications. Water, 12(1), 16.

33. Lagnika M., Ibikounle M., Montcho JP. C., Wotto V. D., Sakiti1 N. G. (2014) : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des puits dans la commune de Pobè, Benin, Journal of Applied Biosciences 79 :6887 – 6897.

34. Li L., Qiao J., Yu G., Wang L., Li H., Liao C. et Zhu Z. (2022): Interpretable tree-based ensemble model for predicting beach water quality *Water Res.* 211 118078.

35. Luo W., Zhu S., Wu S. et Dai J. (2019) : Comparaison des techniques d'intelligence artificielle pour la prédiction de la chlorophylle-a dans les lacs américains. Environmental Science and Pollution Research, 26(29), 30524-30532.

36. Ma M., Zhao G., He B., Li Q., Dong H., Wang S. et Wang Z. (2021): XGBoost-based method for flash flood risk assessment *J. Hydrol.* 598 126382.

37. Mahadi Hasan Seyam, Rashedul Haque, Mostafizur Rahman (2022) : Identification des changements d'occupation des sols (LULC) à l'aide de la télédétection et de l'approche SIG : une étude de cas à Bhaluka à Mymensingh, au Bangladesh, 1-12.

38. Mahalanobis PC, (1936) : Sur la distance généralisée en statistique. Sur la distance généralisée dans les statistiques 49–55.

39. Mohammed F., Mustafa, Muhammad R. Ul, Baig, Imran, Takaijudin, H. B., Zeshan et Muhammad T. (2022) : Évaluation de l'utilisation des terres et de la couverture terrestre, changements et prévisions futures à l'aide de la simulation CA-ANN pour Selangor, Malaisie, Eau 14 (3), 402.

40. Moriasi, D., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. & Veith T. L. (2007), Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. ASABE Vol. 50, pp. 885-900.

41. Nash, J. & Sutcliffe, J. (1970), River flow forecasting through conceptual models. part i : A discussion of principles. Journal of Hydrology 10, pp.282-290.

42. Omelza D., (2019) Apprentissage automatique efficace pour la prévision de l'utilisation des terres urbaines à grande échelle en Afrique sub-saharienne. arXiv : 1908.00340v1, 9p.

43. Reddi KR. et *al.*, (1993), Fluctuation des marrées en relation avec certains paramètres physico-chimiques dans l'estuaire de la rivière de Swarnamukkhi, cotee est de l'Inde, ind J Mars Sci 22, 223-234.

44. Reichert P.et Vanrolleghem P.(2001): Identifiability and uncertainty analysis of the River Water Quality Model No. 1 (RWQM1), Water Sci Technol (2001) 43 (7): 329–338.

45. Saadia B, Khadija O, Saïd O, Nourredine EH , Benaissa A . (2007), Etude de la qualité physicochimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc), Afrique SCIENCE 03(3) (2007) 391 – 404.

46. Sambienou G., Tinantikpa N., Alassane A., Boukari M., Kaki C. et Mama D. (2020), Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines des aquifères de socle de la commune de Natitingou au bénin, European Scientific Journal February 2020 édition Vol.16, No.6 ISSN, 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857 – 7431.

47. Shlien, S. et Goodenough D. (1974) : Méthodes quantitatives de traitement du contenu informationnel de l'imagerie ERTS pour la classification du terrain. Deuxième Canadien Symposium sur la télédétection. Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, Ottawa, Canada, p. 237–265.

48. Singh B. et Craswell E. (2021): Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem SN Appl, Sci. 3 1–24.

49. Talukdar S., Singha P., Mahato S., Shahfahad, Pal S., Liou Y.-A., et Rahman A. (2020) Classification de l'utilisation des terres et de la couverture des terres par des classificateurs d'apprentissage automatique pour les observations par satellite - Un examen ; Remote Sens., 12, 1135 (pp 1-24).

50. Tan, Shukui, Zhang, Maomao, Wang, Ao, Zhang, Xuesong, Chen et Tianchi (2021): Comment les différentes forces motrices socio-économiques affectent-elles les émissions de carbone de la Chine ? Nouveau preuves issues d'un modèle de régression multi-échelle pondéré géographiquement. Environ. Sci. Polluer. Rés. 28 (30), 41242-41254.

51. Tanignon A. Y. (2011) : Problématique de l'urbanisation et de protection des ressources en eau souterraine : cas de la commune d'Abomey-Calavi, Mémoire de master. Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'environnement, 52 p.

52. Tariq A. Shu H. (2020) : Analyse en chaîne CA-Markov de la température saisonnière de la surface des terres et du changement de la couverture terrestre de l'utilisation des terres à l'aide d'un satellite optique multi-temporel données de Faisalabad, Pakistan, Télédétection 12.

53. Topp S. N., Pavelsky T. M., Jensen D., Simard M. et Ross M. R. (2020) : Tendances de

54. Tossou J.Y.Y., Hermans T., Dovonon L. F., Boukari M. et Brouyere S. (2019), Proposition d'un support d'aide à la décision pour l'amélioration de l'accès à une eau souterraine de meilleure qualité dans un contexte de contamination géogénique au fluorure au Bénin, Afrique de l'Ouest, Geo-Eco-Trop., 2019, 43, 3, n.s. : 365-373.

55. Trolle D., Hamilton D. P., Pilditch C. A., Duggan I. C. et Jeppesen E. (2011) : Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes : Implications for lake restoration and management, Environmental Modelling & Software, 26(4), 354-370.

56. Tyralis H., Papacharalampous G. et Langousi A. (2019): A Brief Review of Random Forests for WaterScientists and Practitioners and Their Recent History in Water Resources, *Water* 2019, *11*(5), 910, 1-37.

57. Vega M., Pardo R., Barrado E. et Deban L. (1998): Evaluation des effets saisonniers et polluants sur la qualité des eaux fluviales par analyse exploratoire des données, Recherche sur l'eau, 32(12), 3581-3592.

58. Yalo N., Adjanohoun A., Adissin Glodji L. et Kaki C. (2008), Formations géologiques de la glauconie du bassin sédimentaire côtier du Bénin : possibilités d'utilisation pour la fertilisation des sols côtiers, N°12, p64-73.

59. Yatoo, Saleem Ahmad, Sahu, Paulami, Kalubarme, Manik H., Kansara, Bhagirath B., (2022): Surveillance des changements d'utilisation des terres et de leurs perspectives d'avenir à l'aide du système cellulaire simulation d'automates et réseau de neurones artificiels pour la ville d'Ahmedabad, Inde. GéoJournal 87 (2), 765-786.

60. Yuan L, Sinshaw T and ForshayKJ (2020): Review of watershed-scale water quality and nonpoint source pollution models Geosci. 1 1–33.

61. Zhang, Maomao, Zhang, Cheng, Kafy, Abdulla-Al, Tan, Shukui (2022c): Simulation de la relation entre l'utilisation des terres/changement de couverture et l'environnement thermique urbain en utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique dans la ville de Wuhan, en Chine. Terrain 11(1).

62. Zhu M, Wang J, Yang X, Zhang Y, Zhang L, Ren H,WuB and Ye L 2022 A review of the application of machine learning in water quality evaluation Eco-Environment Heal, 1 107–16.

63. https://fr.hach.com/parameters/dissolved-oxygen. (17/10/2023 à 11h50)

Annexes

Annexe 1 : Matériels de terrain et de laboratoire



Photo 2: Flacon en polyéthylène de 1.5l, (Ahlonsou, Décembre 2022)



Photo 3: GPS Gamin, (Ahlonsou, Décembre 2022)



Photo 4: Multiparamètre AQUAREAD AP700 (Ahlonsou, December 2022)



Photo 5: Spectrophotomètre HACH LANGE DR 2800 (Ahlonsou, December 2022)



Photo 6: Colorimètre (DR890) (Ahlonsou, Décembre 2022)

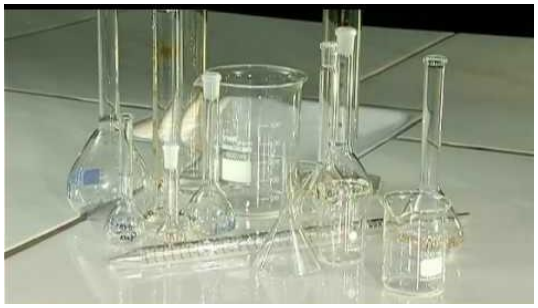


Photo 7: Verrerie de laboratoire (Ahlonsou, Décembre 2022)

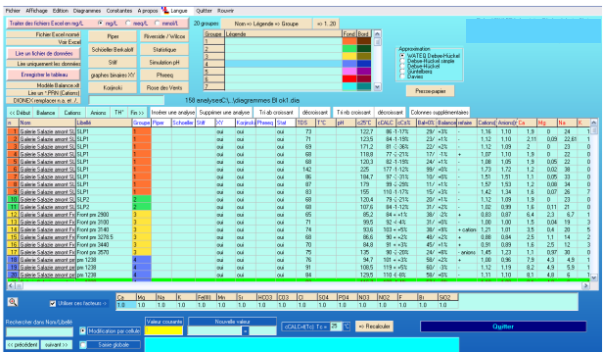


Photo 8: Interface du logiciel DIAGRAMME

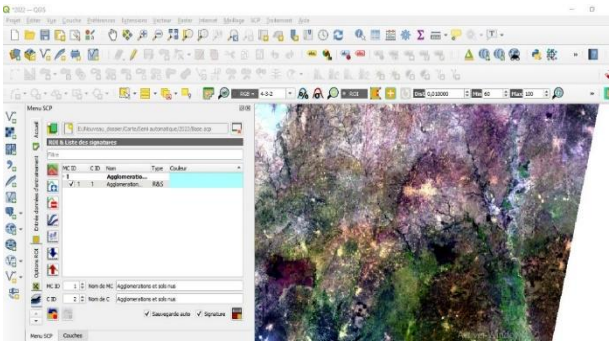


Photo 9: Classification d'image avec SCP(Qgis)



Photo 10: Interface du logiciel Python (Jupyter Notebook)

Annexe 2 : Quelques photos de terrains



Photo 11: Echantillonnage d'eau dans un puits, (Ahlonsou, Décembre 2022)



Photo 12: Echantillonnage d'eau dans un forage, (Ahlonsou, Décembre 2022)



Photo 13: Champs de maïs (Ahlonsou, Décembre 2022)



Photo 14: Pesticide et herbicide (Ahlonsou, Décembre 2022)

Annexe 3 : Indice de Qualité de l'Eau souterraine des forages et puits échantillonnées.

Date	Arrondissement	Village	Localité	ID	Station	X Coord	Y Coord	IQE_08	IQE_22
01/12/2022	ALLAHE	DOGBANLIN	ATOYONOU GON	Puits	S1	2,2296	7,1624	16,29	20,07
01/12/2022	ALLAHE	DOGBANLIN	GUEOU GON	Puits	S2	2,2194	7,1525	14,45	48,77
01/12/2022	ALLAHE	DOGBANLIN	ALOHOUN GON	Puits	S3	2,2524	7,122	14,69	29,85
01/12/2022	ALLAHE	GANHOUA	AHOSSOUHOUE	Puits	S4	2,2888	7,179	14,54	28,27
01/12/2022	ALLAHE	HEHOUNLI	GOME	Forage	S5	2,2893	7,1563	13,27	17,94
01/12/2022	ALLAHE	HEHOUNLI	EPP HEHOUNLY	Puits	S6	2,2928	7,1326	17,86	47,70
01/12/2022	ALLAHE	HEHOUNLI	BATE FANDJI	Forage	S7	2,3056	7,1334	15,05	18,00
01/12/2022	ALLAHE	ZA-HLA	AMLINHOGON	Puits	S8	2,2666	7,1751	18,24	21,75
01/12/2022	ASSALIN	ADJOKAN	ADJOKAN-HOUAO	Puits	S9	2,1273	7,2342	17,78	28,27
01/12/2022	ASSALIN	ASSANLIN	AKADJAME	Puits	S10	2,1174	7,246	14,67	29,59
01/12/2022	ASSALIN	ZOUNZONME	KPOLOKOUE	Puits	S11	2,1466	7,2474	13,88	20,67
02/12/2022	HOUNGOMEY	AKETEKPA	FOLLY	Puits	S12	2,1971	7,181	17,47	21,38
02/12/2022	HOUNGOMEY	AKETEKPA	ANAGONOUSSOHOUE	Puits	S13	2,2071	7,1759	16,01	19,06
02/12/2022	KPAKPAME	KPAKPAME	SOKOME	Forage	S14	2,1518	7,3264	79,54	86,48
02/12/2022	KPAKPAME	TANGBE	TANGBE	Puits	S15	2,1122	7,2959	24,11	17,54
02/12/2022	KPAKPAME	SOME	GOUIDOGON	Puits	S16	2,1277	7,2689	18,90	15,92
02/12/2022	KPOZOUN	AHOSSOUGON	AHOUALI	Puits	S17	2,1328	7,2039	13,44	22,41
02/12/2022	KPOZOUN	LOKOLI	SEME	Puits	S18	2,1081	7,2208	13,25	32,74
02/12/2022	KPOZOUN	ZOUNGOUDO	AÏTEDEKPA	Puits	S19	2,1005	7,2182	11,37	20,42
02/12/2022	ZA-KPOTA	ZA-AGBOGBOME	AGBOGBOMEY	Puits	S20	2,2219	7,2366	13,79	27,14
02/12/2022	ZA-KPOTA	ADJIDO	DJEVOGON	Forage	S21	2,2079	7,2016	20,81	24,89
02/12/2022	ZA-KPOTA	DETEKPA	ADJINANGON	Puits	S22	2,231	7,2791	25,83	14,55
02/12/2022	ZA-KPOTA	DETEKPA	AGONKPAHOUE	Puits	S23	2,2097	7,2611	16,81	19,49
02/12/2022	ZA-KPOTA	HOUKANME	DJANHOUMEGON	Puits	S24	2,2019	7,2186	18,21	18,49
02/12/2022	ZA-KPOTA	KODOTA	SOHOUNTA CENTRE	Forage	S25	2,2243	7,2026	15,29	21,84
02/12/2022	ZA-KPOTA	ZA-KPOTA	AITCHIHOUE CENTRE	Puits	S26	2,2142	7,2294	21,88	63,31
02/12/2022	ZA-KPOTA	ADJIDO	ASSOGBAGAHOUE	Puits	S27	2,2009	7,2017	21,52	31,80
02/12/2022	ZA-TANTA	ALLIGOUDO	HOUANLIKPA	Puits	S28	2,1769	7,2448	16,55	15,11
02/12/2022	ZA-TANTA	ADIKOGON	HODOGON	Puits	S29	2,1684	7,243	47,22	21,14
02/12/2022	ZEKO	ZEKO	AGONGBO GOME	Puits	S30	2,1196	7,2115	14,92	20,81

Annexe 4 : Valeurs observées et valeurs prédites

Valeurs observées	Valeurs prédites		
	ANN	RF	RL
0.07	0.1	0.15	0.07
0.22	0.22	0.17	0.22
0.69	0.7	0.46	0.69
0.09	0.08	0.08	0.09
0.05	0.06	0.05	0.05
0.13	0.16	0.18	0.13
0.48	0.43	0.27	0.48
0.13	0.11	0.11	0.13
0.03	0.04	0.04	0.03
0.19	0.15	0.15	0.19
0.18	0.19	0.19	0.18
0.27	0.36	0.39	0.27
0.04	0.06	0.11	0.04
0	0.03	0.03	0