UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

NATABOU Jimmy

Pour l'obtention du diplôme de

Master Professionnel en Hydrologie

OPTION : Hydrogéologie

==========

CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DES ZONES POTENTIELES DE RECHARGES DU SYSTEME AQUIFERE DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE KANDI

==========

Superviseur

Prof. ALASSANE Abdoukarim

Maitre de Conférences des Universités CAMES, Enseignant chercheur à l'INE/UAC

Maître de mémoire

Dr. AVAHOUNLIN Fernand Ringo

Maitre-Assistant/CAMES, Enseignant chercheur à l'UNSTIM

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

Année Académique : 2023-2024



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU



DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation présenté par

NATABOU Jimmy

Pour l'obtention du diplôme de

Master Professionnel en Hydrologie

OPTION : Hydrogéologie

CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DES ZONES POTENTIELES DE RECHARGES DU SYSTEME AQUIFERE DU BASSIN SEDIMENTAIRE DE KANDI

Réalisé et soutenu par NATABOU Jimmy

Lundi 06 Mai 2024

Mention : Très Bien

Jury

Président : Prof. YALO Nicaise 12/03/2024

Membres : Prof. ALASSANE Abdoukarim 24/07/2024

Dr. KPEGLI Raoul Ce 11/07/2024

Dr. AVAHOUNLIN Fernand Ringo 05/08/2024

Année Académique : 2022-2023

Dédicaces

A tous mes parents.

Remerciements

Mes sincères gratitudes à tous ceux qui, de quelques manières, ont contribué à la réalisation de ce mémoire et particulièrement à :

Mon superviseur, Professeur Abdoukarim ALASSANE, enseignant chercheur à l'Institut National de l'Eau, pour sa disponibilité et son attachement vis-à-vis de nous malgré ses multiples occupations ;

Mon maître de mémoire, Docteur Fernand Ringo AVAHOUNLIN, Enseignant Chercheur à l'UNSTIM, trouvez ici l'expression de ma gratitude pour l'encadrement, votre disponibilité, vos conseils et orientations qui ont permis la concrétisation de ce travail ;

Docteur Lucie KOUDERIN, responsable des stages au sein du cabinet HYDROGEOCLIM ;

Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE) pour la gestion des formations à l'INE,

Tout le personnel et le corps professoral de l'Institut National de l'Eau et spécialement celui intervenant au Département d'Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau. Nous vous remercions pour les nombreux efforts que vous faites pour que notre formation soit de qualité et pour vos sages conseils,

Tout le personnel du bureau d'étude HYDROGEOCLIM pour leur sens d'ouverture et les autres stagiaires pour le partage et l'harmonie qui est restée entre nous tout au long de notre période de stage ;

Mon grand frère NATABOU D. Iréné pour son précieux soutien et sacrifices qui ne passes pas inaperçus. Merci pour vos conseils et votre attachement à ma réussite ;

Nos frères (Charles, Melon, Ramsès, Fallope, Cliton, Busch, Romuald, Carlos, Freed) et nos sœurs (Princia, Aurore, Gracia, Oswale) pour vos encouragements sans cesse ; que le Seigneur nous fortifie et que son amour soit notre partage ;

Mes camarades étudiants de ma promotion pour tous les inoubliables moments de labeur et d'amitié passés durant ces deux ans de formation.

Nous n'allons pas finir nos remerciements sans témoigner notre profonde gratitude envers le jury chargé d'apprécier notre travail pour l'amélioration de sa qualité.

Résumé

Les eaux souterraines représentent une ressource primordiale pour l'approvisionnement en eau potable des habitants du bassin sédimentaire de Kandi. La nécessité d'une gestion durable devient impérative afin de répondre aux demandes croissantes et aux variations climatiques. L'objectif de cette étude est de caractériser l'hydrodynamique des zones potentielles de recharge des aquifères dans le Bassin Sédimentaire de Kandi. Pour ce faire, une cartographie des zones de recharge potentielles a été réalisée en combinat les Systèmes d'Informations Géographiques et l'Analyse Hiérarchique des Processus des différents facteurs impliquées dans la recharge d'un aquifère. Par la suite une analyse du potentiel de recharge des aquifères dans ces zones de recharges est effectuée. Enfin une étude comparative entre la recharge réelle et la recharge potentielle pour vérifier leur degré de corrélation. La cartographie des zones potentielles de recharge effectuée, révèle que l'ensemble du bassin présente un potentiel favorable à la recharge, avec une zone de bonne recharge représentant 71% de la superficie totale. L'estimation de la recharge potentielle révèle une variabilité spatiale des valeurs selon les différentes zones, allant de 3,36 mm/an à 269,47 mm/an, tandis que les valeurs de recharge réelle varient de 4,13 mm/an à 33,53 mm/an, avec des variations significatives entre la recharge potentielle et réelle au niveau local. L'analyse du coefficient de corrélation de Pearson révèle une corrélation positive modérée (0,36) entre la recharge réelle et la recharge potentielle, suggérant que l'augmentation de la recharge potentielle s'accompagne généralement d'une augmentation de la recharge réelle, et vice versa.

Mots clés : Bassin Sédimentaire de Kandi, Cartographie, zone potentielle de recharge, recharge, coefficient de corrélation de Pearson.

Abstract

Groundwater is an essential resource for supplying drinking water to the inhabitants of the Kandi sedimentary basin. The need for sustainable management is becoming imperative in order to meet growing demand and climatic variations. The aim of this study is to characterise the hydrodynamics of potential aquifer recharge zones in the Kandi Sedimentary Basin. To achieve this, potential recharge zones were mapped using a combination of Geographic Information Systems and Hierarchical Analysis of the Processes and factors involved in aquifer recharge. An analysis of the potential for aquifer recharge in these recharge zones was then carried out. Finally, a comparative study of actual recharge and potential recharge is carried out to check the degree of correlation between them. The mapping of potential recharge zones reveals that the entire basin has a favourable potential for recharge, with a zone of good recharge representing 71% of the total surface area. Estimation of potential recharge reveals spatial variability in values across the different zones, ranging from 3.36 mm/year to 269.47 mm/year, while actual recharge values vary from 4.13 mm/year to 33.53 mm/year, with significant variations between potential and actual recharge at local level. Analysis of Pearson's correlation coefficient reveals a moderate positive correlation (0.36) between actual recharge and potential recharge, suggesting that an increase in potential recharge is generally accompanied by an increase in actual recharge, and vice versa.

Key words: Kandi sedimentary basin, Mapping, potential recharge areas, Recharge, Pearson correlation coefficient

Liste des sigles et acronymes

AHP : Analytical Hierarchy Process

BSK : Bassin Sédimentaire de Kandi

BRGM : Bureau de Recherche Géologiques et Minières

DGEau : Direction Générale de l'Eau

FAO : Food and Agriculture Organisation

IGN : Institut Géographique Nationale

MFP : Méthode de Fluctuation Piézométrique

MNT : Model Numérique de Terrain

NNE : Nord-Nord-Est

RGPH-4 : Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitat

SRTM : Shuttle Radar Topographic Mission

SSW : Sud-Sud-Ouest

SIG : Systèmes d'Informations Géographiques

USGS: United States Geological Survey

Liste des tableaux

Tableau 1 : Reclassification des paramètres et les côtes assignées aux différentes classes..... 26
Tableau 2 : Échelle d'évaluation des différents paramètres vis-à-vis de l'infiltration..... 26
Tableau 3 : Valeur de l'Indice aléatoire en fonction du nombre de critères (Saaty,1980)..... 28
Tableau 4 : Expression Verbale et Numérique de l'Importance Relative d'une Paire de..... 30
Tableau 5 : Matrice issue de la comparaison des différents paramètres 30
Tableau 6 : Classification des taux de recharge selon FAO (1967) 31
Tableau 7 **:** Superficie et taux de recharges des différentes zones..... 37
Tableau 8 : Amplitudes moyennes des remontées piézométriques dans les différents piézomètres..... 38

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation du Bassin Sédimentaire de Kandi 8
Figure 2 : Carte des altitudes du Bassin Sédimentaire de Kandi..... 9
Figure 3 : Colonne lithostratigraphique de la série paléozoïque du bassin de Kandi (Konaté 1996)..... 11
Figure 4 : Coupe géologique O-E du Bassin de Kandi (BGR & NBA, 2019 modifié d'après Istituto Ricerche Breda & OBEMINS, 1989) 12
Figure 5 : Coupe géologique interprétative du Bassin de Kandi (Boukari 2007, d'après Konaté 1996) de direction W-E (annexe 3). 13
Figure 6 : Corrélation lithostratigraphique (a) et coupe hydrogéologique (b) suivant la direction SSW-NNE (Gbewezoun 2017). 14
Figure 7 : Moyennes mensuelles (1991-2021) de la pluie à la station synoptique de Kandi (Source des données : METEO Bénin) 15
Figure 8 : Carte du réseau hydrographique du Bassin Sédimentaire de Kandi. 16
Figure 9 : Carte des types de sols du Bassin Sédimentaire de Kandi..... 21
Figure 10: Carte de l'occupation des sols dans le Bassin Sédimentaire de Kandi 22
Figure 11: Carte des pentes du Bassin Sédimentaire de Kandi 23
Figure 12 : Carte de densité de drainage du Bassin Sédimentaire de Kandi..... 24
Figure 13 : Carte des formations géologiques du Bassin Sédimentaire de Kandi 25
Figure 14 : Carte des zones potentielles de recharge dans le Bassin Sédimentaire de Kandi.. 36
Figure 15 : Carte de superposition des zones potentielles de recharges avec les recharges potentielles et réelles 40
Figure 16 : Variation du taux de la recharge potentielle et réelle au cours du temps 40
Figure 17 : Corrélation de Pearson entre recharges réelle et potentielle..... 41

Sommaire

Dédicaces II

Remerciements III

Résumé IV

Abstract V

Liste des sigles et acronymes VI

Liste des tableaux VII

Liste des figures VIII

Sommaire IX

Introduction Générale 1

1. Contexte 1

2. Problématique et question de recherche 1

5. Revue de littérature 3

Chapitre I : Milieu d'étude 6

1.1 Localisation de la zone d'étude 7

1.2 Géomorphologie et géologie 8

1.3 Hydrogéologie 12

1.4 Végétation 14

1.5 Climat et hydrographie 14

1.6 Quelques aspects socio-économiques 16

Chapitre II : Approche méthodologique 18

2.1 Données 19

2.2 Matériel utilisé 20

2.3 Méthodes 20

Chapitre III : Résultats et discussion 34

3.1 Résultats 35

3.2 Discussion 42

Conclusion et Perspectives 45

Références Bibliographiques 46

Tables des matières 50

Annexes 53

Introduction Générale

1. Contexte

L'eau l'élément fondamental de la vie, joue un rôle crucial dans l'existence et le développement de tous les êtres vivants sur notre planète. De la cellule microscopique à l'écosystème le plus vaste l'eau est l'essence même de la survie et de la prospérité. Les eaux souterraines, nichées sous la surface terrestre, sont bien plus qu'une simple ressource. Elles représentent un maillon vital de l'équilibre hydrique de notre planète, offrant une source d'eau précieuse pour l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture, l'industrie et la préservation des écosystèmes. Environ 71% de la surface terrestre est recouverte d'eau, ce qui correspond à un volume d'environ 1386 millions de km^3 (Shiklomanov & Rodda, 2003 in Gosselin, 2016). De ce volume, seulement 2.53% sont constitués d'eau douce, dont plus de 69% sont stockés sous forme solide dans les glaciers, les neiges permanentes et le pergélisol. L'un des processus assurant la pérennité des eaux souterraines est la recharge des aquifères. Ce processus, souvent imperceptible à nos yeux, représente le renouvellement vital des réserves souterrains. Par le canal des précipitations, d'infiltration, et de mouvements complexes à travers les formations géologiques, les eaux de surface s'infiltrent dans le sol pour rejoindre les réservoirs souterrains, alimentant ainsi le cycle souterrain. Selon Ritchie et Roser (2017), le renouvellement des ressources eau douce en Afrique est estimé à 3 931 km^3 /an avec une moyenne de 131mm/an. Le prélèvement des eaux souterraines est de 45 km3/an soit 8 km^3/an en Afrique de l'Ouest avec une évolution de 9% depuis 2010 (UNESCO-WWAP, 2022).

2. Problématique et question de recherche

Le bassin sédimentaire de Kandi, qui fait partir du bassin sédimentaire transfrontalier d'Iullemenden (partagé essentiellement entre le Niger, le Nigéria et le Bénin), appartient à la zone semi-aride où les populations dépendent principalement des eaux souterraines comme principale source d'approvisionnement en eau (Kpegli et *al*., 2015). Le renouvellement des réservoirs d'eau du bassin est primordial pour la disponibilité de cette ressource de façon durable pour divers usages. Ce renouvellement n'est possible s'il n'y a apport de nouvelle molécule d'eau par le phénomène de la recharge. Elle peut être « diffuse », si elle provient de l'infiltration des précipitations sur une grande étendue ou « localisée » lorsque l'apport en eau vient de lacs et rivières (Lerner et *al*., 1990 ; Healy, 2010 ; Gosselin, 2016 in Jonathan, 2022). Les eaux souterraines du bassin sédimentaire de Kandi constituent la réserve d'eau généralement potable parce que plus ou moins protégées par les formations géologiques par rapport aux eaux de surfaces qui sont en contact direct avec l'atmosphère. Elles sont celles

qu'exploitent les communes qui se trouvent dans le bassin pour diverses utilisations. La croissance démographique et l'expansion des activités agricoles font que la demande en eau augmente au jours le jours. Ainsi l'exploitation de la ressource s'accentue avec le temps. Longtemps considérée comme inépuisable, les eaux souterraines exploitées pour la consommation humaine ne sont pas moins limitées. Donc pour palier à d'éventuelle diminution du niveau d'eau dans les ouvrages, qui entrainerait par la suite la baisse des débits d'exploitation voire le phénomène de pénurie d'eau dans les ouvrages de captages installés et pour mieux préserver la ressource, la compréhension du fonctionnement des facteurs qui interviennent dans la recharge s'avère nécessaire. Une meilleure estimation de la recharge peut aider à mieux gérer la ressource en eau souterraine pour répondre aux besoins en eau actuels et futurs. Il est indispensable de connaitre les zones probables de recharge et la quantité d'eau qui alimente les aquifères du bassin dans le but de maitriser les volumes raisonnables à prélever sans toutefois mettre une pression sur la ressource. Ce qui facilitera la prise de décisions pour une bonne gestion durable des ressources en eaux. C'est dans ce cadre que la présente étude intitulée : « caractérisation hydrodynamique des potentielles zones de recharges du système aquifère dans le bassin sédimentaire de Kandi » est initiée.

3. Objectifs et Hypothèses de recherche

L'objectif générale de cette étude est de caractériser l'hydrodynamique des potentielles zones de recharges du système aquifère dans le bassin sédimentaire de Kandi.

Spécifiquement il s'agit de :

- Cartographier les potentielles zones de recharge ;
- Analyser le potentiel de recharge des aquifères dans les zones potentielles de recharge ;
- Vérifier la relation entre la recharge potentielle et celle réelle.

Les hypothèses découlant des objectifs sont les suivantes :

- Le Bassin Sédimentaire de Kandi est favorable à la recharge dans son ensemble ;
- La recharge des aquifères dans les zones potentielles révèle des variations importantes dans les mécanismes de recharge ;
- Il existe une corrélation plus ou moins modérée entre la recharge potentielle et celle réelle.

4. Clarification des concepts

La recharge d'un aquifère : se définit comme tout flux d'eau qui s'écoule à travers la zone non-saturée (ZNS) et arrive à la nappe, pour participer à son renouvellement (Freeze et Cherry, 1979 in Dieng Ndao., 2018).

Zone de recharge d'un aquifère : est une région où de l'eau peut pénétrer dans le sol et atteindre la nappe phréatique, contribuant ainsi à la recharge de l'aquifère.

Un aquifère : est une formation géologique continue ou discontinue, contenant de façon temporelle ou permanant de l'eau mobilisable, constitué de roches perméables (formation poreuse, karstiques, ou fissurées) et capable de la restituer naturellement ou par exploitation (BRGM, 2021).

Un bassin sédimentaire : est une dépression relative de la croûte terrestre située sur un continent émergé, un plateau continental, ou encore dans un océan, qui recueille des quantités relativement importantes de matériaux sédimentaires qui, par diagenèse, se transforme en suite progressivement en couches stratifiées de roches sédimentaires (Dictionnaire encyclopédique de la diversité biologique et de la conservation de la nature, 2024).

5. Revue de littérature

5.1. Les méthodes de cartographie des potentiels zones de recharges d'un aquifère

La recharge des nappes dans une région varie dans le temps et dans l'espace. Elle est influencée de façon générale par des paramètres qui contrôlent l'infiltration à savoir le type de sol, l'occupation du sol, la topographie, la densité des linéaments, la géologie du milieu et l'épaisseur d'altération. Tous ces paramètres permettent de localiser les zones les plus favorable à l'infiltration en estimant l'implication de chaque paramètre par rapport à l'infiltration. L'utilisation des systèmes d'informations géographiques et la télédétection combiné avec l'analyse multicritère de Saaty (1880) permettent de spatialiser les potentielles zones de recharges. L'une des techniques de détermination des zones potentielles de recharge de la nappe est le croisement des informations spatiales relatives aux différents paramètres régissant la recharge qui sont exprimés en cartes thématiques (Sekouba *et al.* (2014), Edoukou *et al.* (2016), Ake et *al*. (2018) ; Ali & Konate, (2020)). C'est la méthode la plus utilisée par les auteurs car elle permet d'étudier séparément les différents facteurs impliqués dans l'infiltration. Le choix des différents facteurs est défini en fonction de la zone, que l'on soit en zone sédimentaire ou en zone de socle.

5.2 Les méthodes d'évaluation de la recharge d'une nappe

Pour quantifier la part de l'eau qui s'infiltre dans le sous-sol afin d'alimenter les nappes, nombreuses sont les méthodes utilisées à travers le monde. L'utilisation de ces dernières sont conditionnés non seulement par le type de milieux que l'on désire évaluer la recharge en eau de la nappe mais également des données disponibles. Que ça soit en milieux humide, semi-aride ou aride, chacune des méthodes évalue la recharge en eau en se basant sur des paramètres précis. Scanlon et *al*. (2002) classent les différentes techniques existantes en trois groupes d'après la zone hydrogéologique où les données utilisées pour estimer la recharge ont été acquises : 1) eaux de surface, 2) zone non saturée et 3) zone saturée.

La méthode du bilan hydrologique est basée sur le principe selon lequel la pluie tombée sur le bassin se répartit entre l'évapotranspiration réelle, le ruissellement, la variation de stock et l'infiltration (Koudjega et *al*., 2020). C'est une méthode plus applicable dans les régions humides que dans les zones semi-aride ou aride pour la simple raison que dans les zones humides les hauteurs des pluies sont supérieures à l'évapotranspiration. La limite de cette méthode repose sur les incertitudes liées aux données d'entrées. La précision des résultats obtenus par cette méthode dépend de la qualité et de la disponibilité des données de base. La différence entre les entrées et les sorties d'eau dans le système équivaut à la variation de stockage d'eau dans les réservoirs (Huet, 2015). C'est une méthode qui ne nécessite pas assez de données et simple dans son application.

La fluctuation des niveaux des nappes grâce à un réseau de piézomètre est une méthode très couramment utilisée et simple à implanter et à interpréter. Les augmentations du niveau de la nappe mesurées dans un piézomètre sont associées directement à des épisodes de recharge locale. L'amplitude nette de la recharge calculée avec cette méthode dépend grandement du coefficient d'emmagasinement spécifique (Sy), un paramètre généralement peu disponible et difficile à quantifier (Healy et Cook, 2002 in Chabot-Grégoire, 2022). Ce qui constitue pour cette méthode une limite pour l'évaluation de la recharge. Également notons que cette méthode ne prend pas en compte l'extraction et l'évaporation de l'eau au niveau de la nappe. Donc toute variation du niveau de la nappe est dû aux épisodes pluviométriques.

Les méthodes physiques consistent à suivre, en continu, l'état d'humidité et de pression de l'eau dans le sol. Elles permettent de quantifier les flux d'infiltration effectifs des premiers mètres du sol vers la nappe, dans la zone non saturée. De telles méthodes présentent l'inconvénient d'une application très locale, à l'échelle du m^2, et la nécessité d'une instrumentation et d'un suivi très lourds (AitElMekk, 2017).

Il existe également des méthodes de traçage chimique et isotopique (Chantry, 2003 ; Mattei, 2019). Ces méthodes permettent de retracer l'origine, le cheminement des eaux qui participent à la recharge des nappes. D'après WOOD (1999) in Chantry (2003), la méthode du bilan des chlorures repose sur le même principe que le bilan des masses d'eau : les précipitations peuvent être évaporées, subir un ruissellement de surface ou s'infiltrer dans le sol pour contribuer à la recharge de l'aquifère. Elle est plus adaptée pour évaluer la recharge dans les milieux semi-aride et aride compte tenu de la forte évaporation qu'on observe dans ces zones. La limite de cette méthode se trouve dans l'hypothèse où la source des chlorures dans l'eau provient uniquement des précipitations.

La méthode de traçage isotopique renseigne sur l'âge des eaux par datation en utilisant des couples de traceurs comme tritium/hélium et carbone 14. C'est ainsi que combinés aux données hydrogéochimiques, les isotopes permettent d'évaluer qualitativement la recharge des nappes en fournissant des informations sur l'existence ou non d'une recharge (Diedhiou, 2011 in Diongue, 2018).

La méthode de traçage par la chaleur est une méthode utilisée également pour la recharge de la nappe. Elle consiste à mesurer les variations de la température dans le sol à différentes profondeurs à l'aide de capteurs thermiques, afin de déterminer les flux d'eau dans le sol et de calculer la recharge de la nappe. C'est une méthode qui nécessite assez de moyen donc très couté pour l'acquisition du matériels nécessaire et leur installation.

6. Structure du document

Ce document est organisé en trois chapitres, débutant par une introduction et se concluant par une synthèse. Le premier chapitre aborde la caractérisation du cadre physique de la zone d'étude, le deuxième chapitre est consacré à la description du matériel utilisé ainsi qu'à la méthodologie employée, tandis que le troisième expose les résultats obtenus, suivis d'une discussion.

Chapitre I : Milieu d'étude

Chapitre I : Milieu d'étude

Ce chapitre vise à présenter de manière concise et pertinente le milieu d'étude qui constitue le cadre de notre recherche. La connaissance du cadre physique constitue un élément déterminant sans lequel aucune étude ne peut être possible et en particulier une étude hydrogéologique dans la présente étude. La présentation du milieu par sa localisation, ces caractéristiques environnementales, hydroclimatiques et géologiques sont les principaux points développés pour mieux caractériser et aider à la compréhension des processus et des enjeux qui sont associées au cadre de recherche.

1.1 Localisation de la zone d'étude

Le Bassin Sédimentaire de Kandi (figure 1) constitue le prolongement au Bénin du grand bassin de Sokoto au Nigéria et des Iullemeden au Niger. Il est localisé entre les parallèles 10° 12' et 12° 8' de latitude Nord et les méridiens 2° 45'et 3° 46' de longitude Est. Ce bassin, à remplissage essentiellement détritique, s'étend sur environ 160 km de long et sur une largeur de 45 à 95 km ; il couvre une superficie d'environ 10 000 km² (Konate, 1996). Il est limité à l'ouest par la faille de Kandi d'orientation Nord 20° Est (Konate et al 1994), à l'ouest par le bassin de Sotoko au Nigeria, au Nord par le fleuve Niger et au Sud par le socle cristallophyllien.

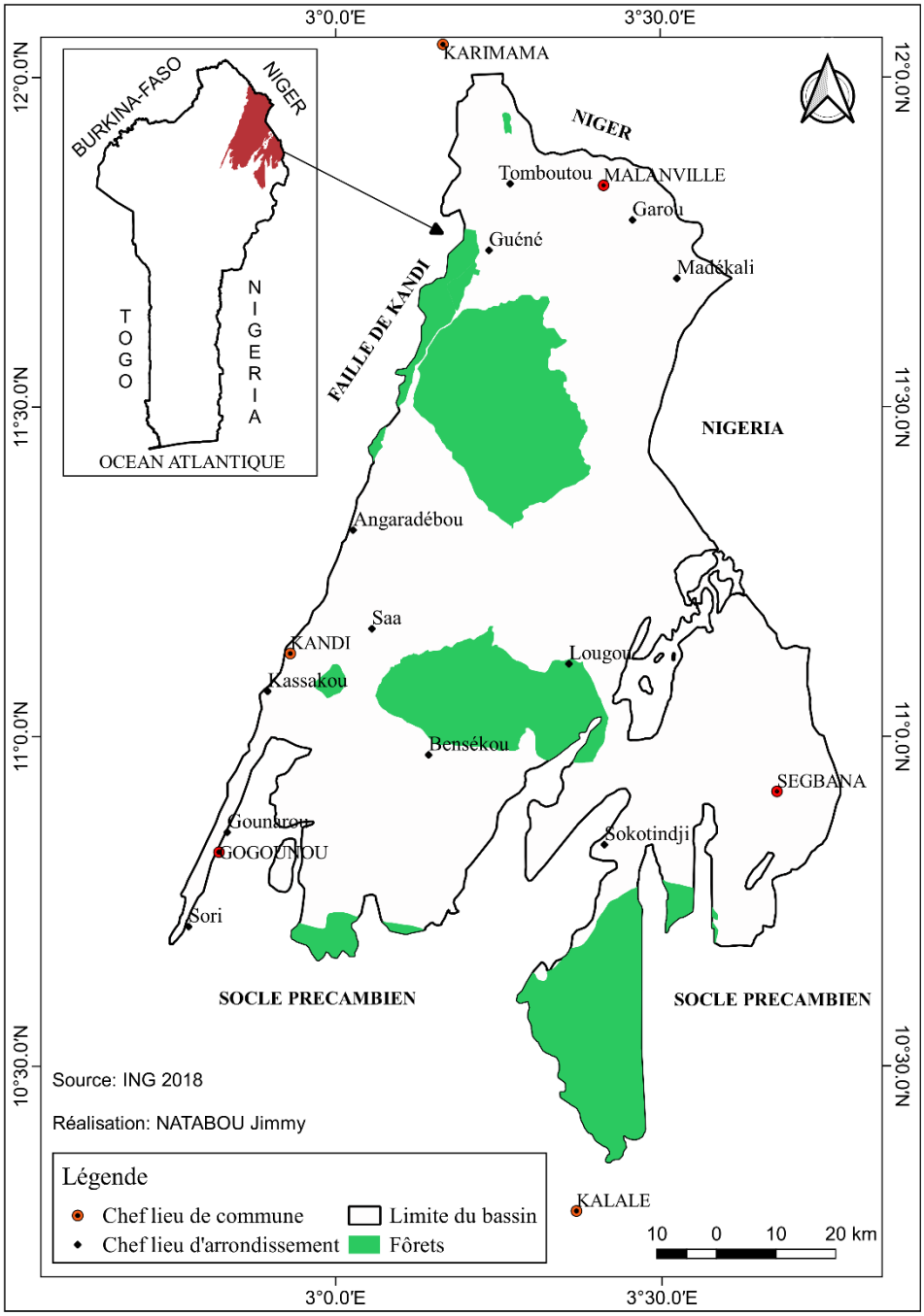


Figure 1 : Carte de localisation du Bassin Sédimentaire de Kandi

1.2 Géomorphologie et géologie

1.2.1 Géomorphologie

La géomorphologie du bassin est marquée par une vaste pénéplaine où affleurent essentiellement des grès du Crétacé nommé grès de Kandi. Les dépôts du BSK (Bassin Sédimentaire de Kandi) épousent remarquablement la topographie molle du socle en formant une vaste plaine légèrement inclinée vers le Nord (Boukari, 2007). Ce bassin se présente comme une plaine drainée par la Sota et ses affluents qui coulent dans des vallons très évasés. Cette

platitude générale est interrompue par des buttes de cuirasses ferrugineuses et traversée du Nord-Est au Sud par un chaînon cristallin (SERHAU, 1992.). Les altitudes varient de 150m à 424m (figure 2). Les faibles altitudes se retrouvent au niveau de la vallée du fleuve Niger et de Sota caractérisé par la formation du quartenaire et les fortes altitudes se retrouvent au niveau des lignes de crêtes et au niveau des contacts du bassin avec le socle.

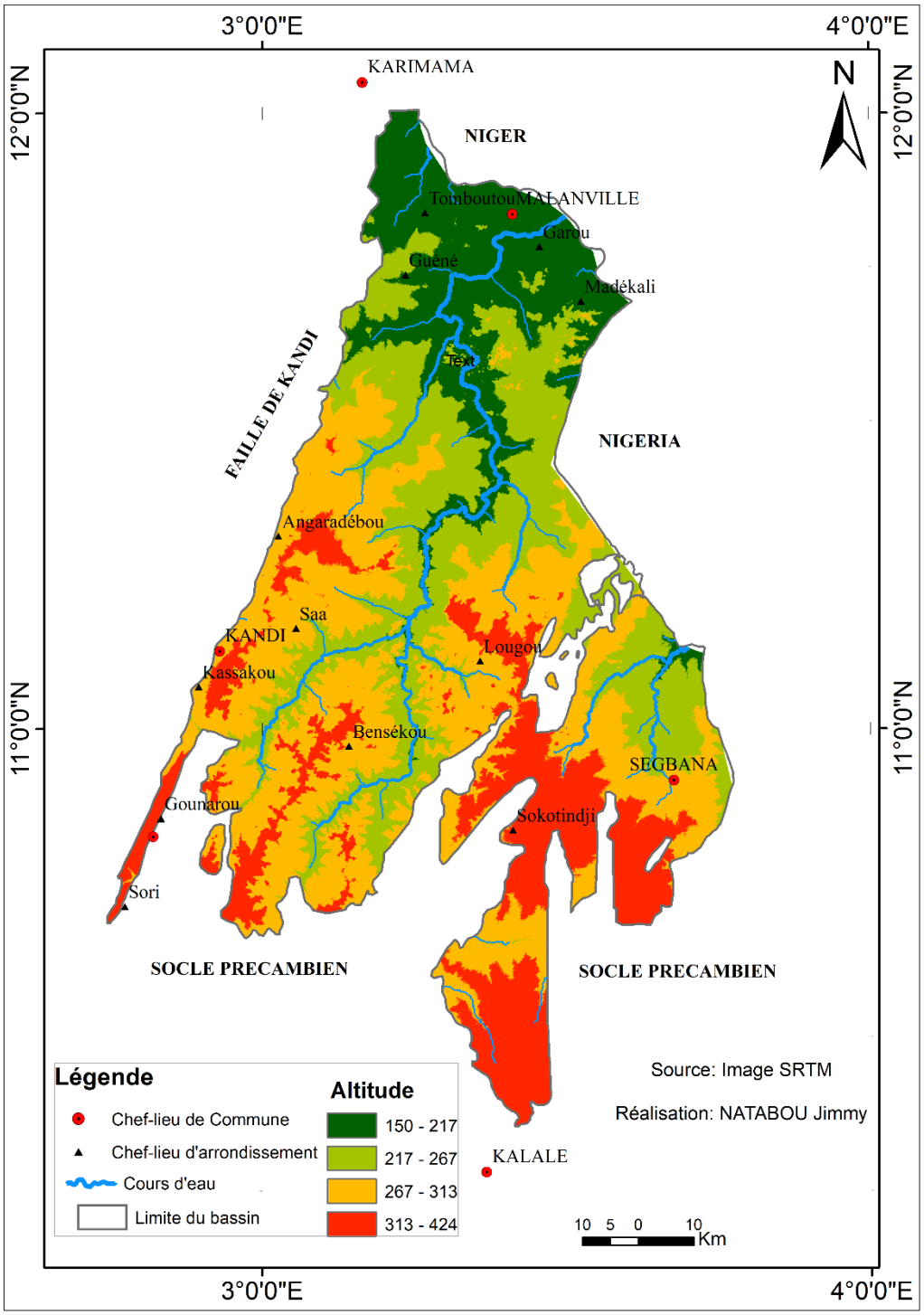


Figure 2 : Carte des altitudes du Bassin Sédimentaire de Kandi

1.2.2 Géologie

Le Bassin de Kandi est un bassin sédimentaire débutant au mésozoïque /paléozoïque avec des dépôts continentaux grossiers de l'Ordovicien supérieur (Formation de Wèrè) et des sédiments plus fins (Formation de Kandi) comprenant des dépôts marins de l'Ordovicien supérieur jusqu'au Silurien inférieur (figure 3). La géométrie du bassin est marquée par des structures horst et graben avec comme limite ouest la faille de Kandi (figure 4). Dans l'ensemble du bassin, les sédiments paléozoïques sont généralement pentés de 10° vers Ouest Nord-Ouest (Konaté et al, 2006). Les séries sédimentaires de Kandi reposent en discordance majeure sur le socle précambrien. Dans les formations précambriennes, quatre unités stratigraphiques ont été identifiées sur la base des indicateurs lithologiques, sédimentaires et paléontologiques depuis le Cambrien jusqu'aux reliques du Continental Terminal (IRB, 1982 ; Alidou, 1983 ; Konate, 1996). La subdivision lithostratigraphique du bassin de Kandi a été modifié et complété par (Konaté, 1996) (figure 3). Ainsi donc les formations de Wèrè et de Kandi ont été subdivisé en des membres auxquels des noms ont été attribué.

La formation de Wéré d'âge d'Ordovicien supérieur subdivisée en deux membres (figure3) : le Membre Wa et le Membre Wb. Le membre Wa situé à la base est constitué des grès grossiers à moyens microconglomératiques à grands litages obliques plans et en auges d'une épaisseur maximale, à l'affleurement, d'environ 150 m et au sommet, le Membre Wb de formation gréseux grossier et microconglomératiques à gros blocs, litages obliques plans ou en auges dont l'épaisseur maximale est d'environ 350 m.

La formation de Kandi d'âge ordovicien supérieur à silurien inferieur, d'une puissance de l'ordre de 75 m, cette formation marine est constituée d'un matériel gréseux fin, silteux, présentant parfois des intercalations de niveaux gréseux grossiers (Figure 3). Subdivisée en membres Ka et Kb. Le membre Ka comprend des grès fins à Harlania, à litages sigmoïdes, des siltites, grès fins à Cruziana, à litages ondulés et sillons érosifs. Le membre Kb comprend grès fins à Harlania, à litages sigmoïdes, des Siltites, grès fins à Cruziana, à litages. La (figure 4) présente une coupe géologique de direction Ouest-Est (annexe 1) du Bassin de Kandi réalisé par Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) modifié d'après Instito Richerche Breda et OBEMINS (1989). Cette coupe met l'accent sur les différentes formations géologiques présentent dans le bassin mais également fait ressortir les différentes subdivisées faites par (Konaté, 1996).

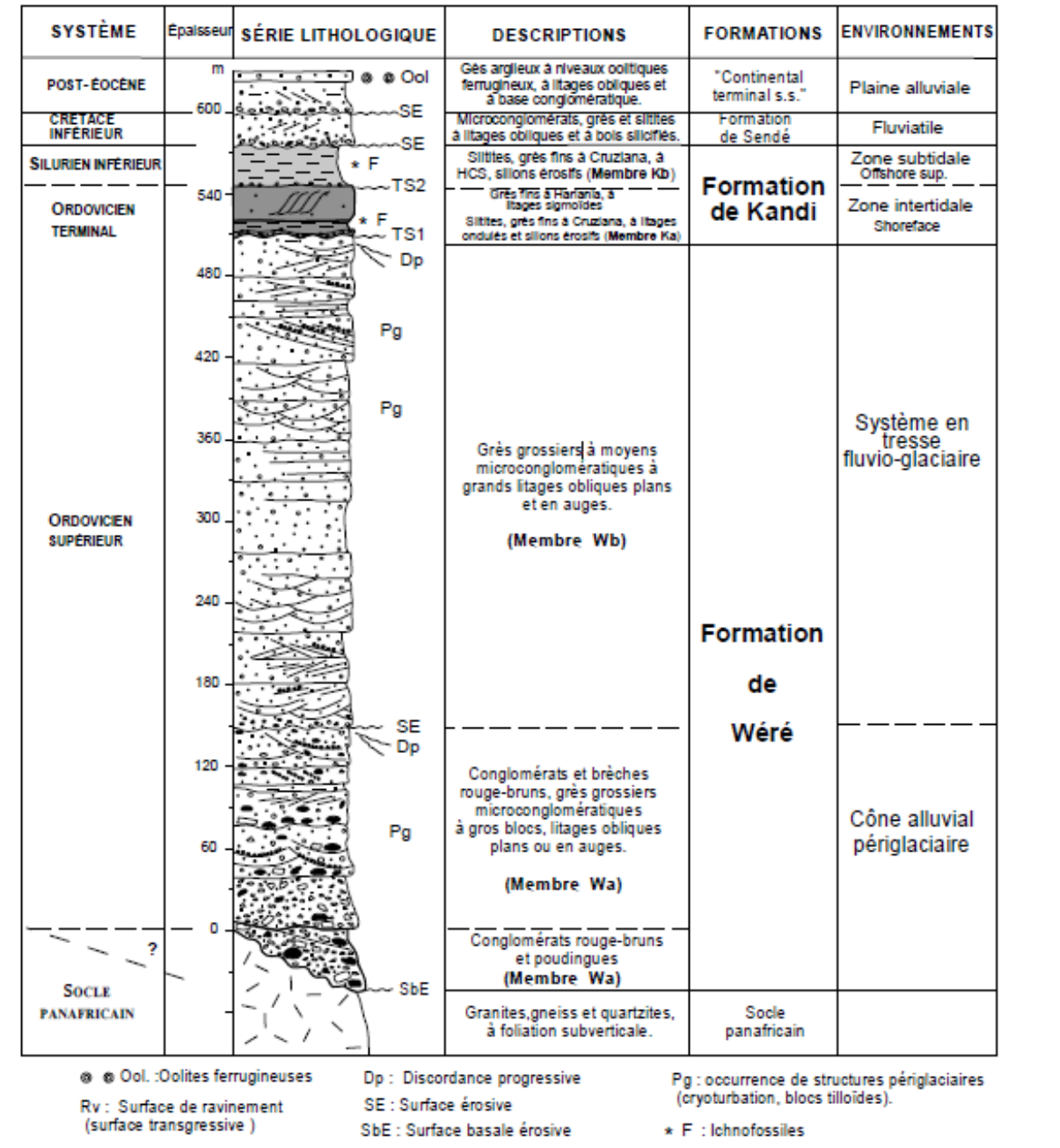


Figure 3 : Colonne lithostratigraphique de la série paléozoïque du bassin de Kandi (Konaté 1996)

La formation de Sendé d'âge du crétacé inferieur plus localisée au Nord-Est du Bassin (figure 13) est constitué de microconglomérats, de grès, siltites à litages obliques et à bois silicifiés. Ces dépôts, de faible puissance (20 à 30 m) sont également en continuité avec les sédiments du bassin de Sokoto au Nigéria (Alidou *et al.*, 1979 ; Alidou et lang, 1983 ; Alidou, 1987 ; IRB, 1989).

La formation du continentale terminale d'âge post Eocène (figure 13) est constitué de grès argileux à niveau oolitique ferrugineux, à litages obliques et à base conglomératiques. Le Continental Terminal repose en discordance angulaire sur le socle, le plus souvent altéré ; il est relativement concordant (mais en contact érosionnel) avec les formations sédimentaires sous-jacentes qu'il ravine localement (formations de Wèrè, de Kandi et de Sendé) (Konaté 1996).

Les formations du quartenaire sont localisées dans la vallée le long du fleuve Niger. Elles sont constituées d'alluvions sablo-argileuses des grands fleuves, les grès et cuirasses ferrugineux et les colluvions ont une faible épaisseur atteignant 100 m environ (Alidou, 1983).

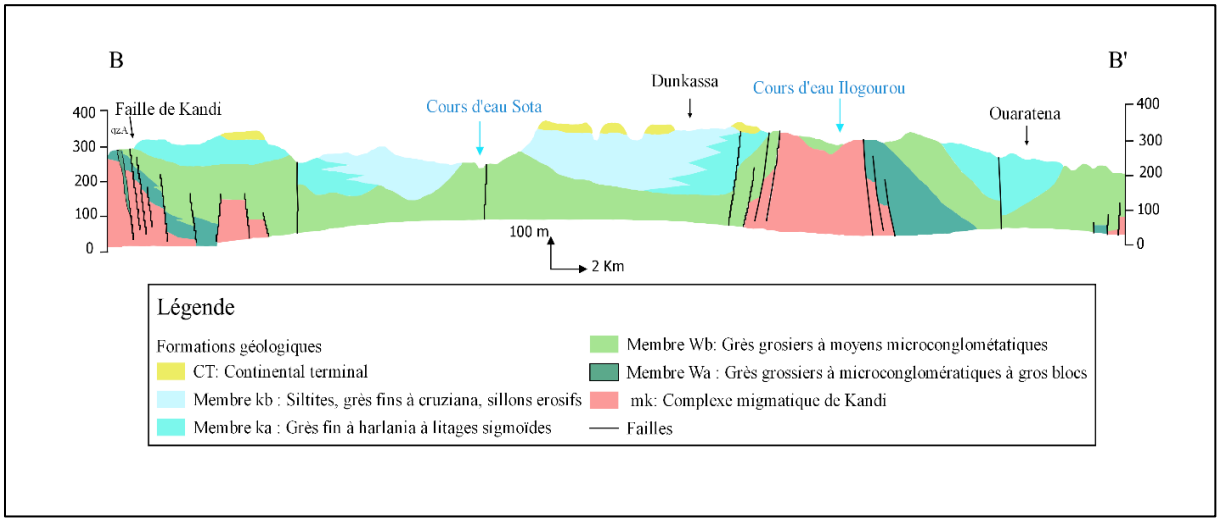
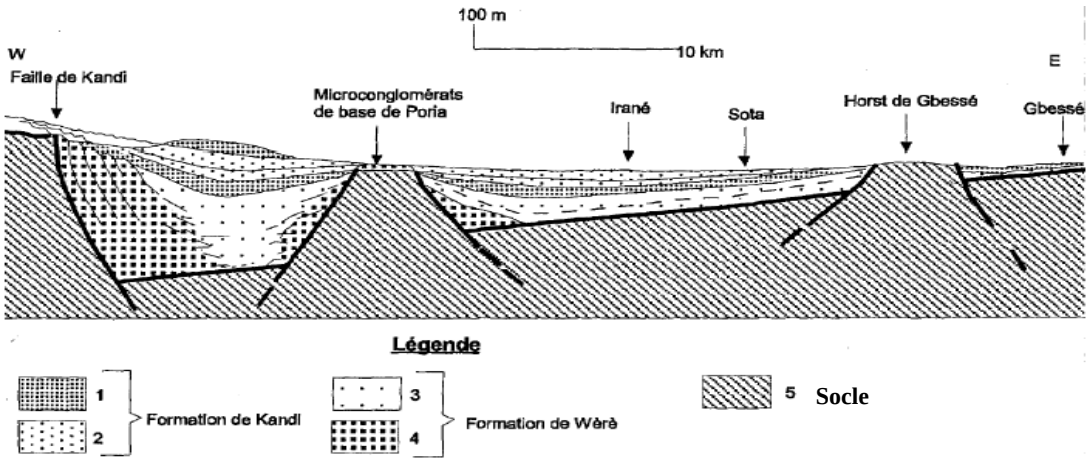


Figure 4 : Coupe géologique O-E du Bassin de Kandi (BGR & NBA, 2019 modifié d' après Istituto Ricerche Breda & OBEMINS, 1989)

1.3 Hydrogéologie

Le Bassin sédimentaire de Kandi comprend deux grands aquifères d'après les travaux de (Konaté, 1996 ; Boukari, 2007 ; Achidi et al., 2012). Il s'agit de l'aquifère du cambrio-ordovicien connu sous le nom de formation de Wèrè et de l'aquifère d'ordovicien terminal/silurien appelé formation de Kandi (figure 5). L'aquifère du cambro-ordovicien qu'est l'aquifère inférieur est constitué de conglomérats, de brèches et de grès lacustres. C'est un aquifère continu, et en majorité semi-captif mais libre au sud et à la bordure ouest du bassin. L'aquifère d'ordovicien terminal/silurien (formation de Kandi) qu'est l'aquifère supérieur est constitué de grès fins de marée sur fond de microconglomérats et de silt. C'est un aquifère continu à nappe libre dans le bassin. A ces aquifères s'ajoute celui du quartenaire constitué des alluvions récentes de sable et d'argile localisé uniquement dans la vallée du fleuve Niger. C'est un aquifère à nappe phréatique (Boukari, 2007). En dehors de ces formations aquifères il y a la formation du continental terminale constituée de grès grossiers du mio-pliocène. Bien qu'elle

soit parfois appelée aquifère, ce n'est pas réellement un aquifère productif dans le bassin de Kandi car elle ne constitue pas une couche continue sur les plans géologique et hydraulique. Cette formation n'est donc pas exploitée (Kpegli et al, 2015). Tout le bassin constitue en réalité un système aquifère unique, localement bicouche dans ses confins nord et nord-est, puis libre dans ses bordures Sud et Est, enfin semi-captif, voire semi-libre, partout où la Formation de Kandi termine la série. Il peut être véritablement captif dans les endroits où cette formation est constituée exclusivement de siltites, voire d'argilites. Les forages ont une profondeur de 27 à 102 m dans le bassin (Achidi et al., 2012). Les plus profonds d'entre eux se trouvent autour de la commune de Kandi et dans la partie centrale du bassin. Les rendements spécifiques des forages varient de 0,005 à 19,8 m3/h/m, et les chiffres les plus élevés sont observés le long de la rivière Sota, où les dépôts sédimentaires sont plus épais et la transmissivité varie de 2 $.10^{-6}$ à 7. 10^{-3} m^2/s (Achidi et al., 2012). Il ressort de la carte potentiométrique de la nappe aquifère peu profonde que le niveau hydrostatique des eaux souterraines varie de 380 à 150 m. Les chiffres les plus élevés sont observés dans le Sud et les plus faibles au Nord. La nappe est principalement réalimentée dans la partie méridionale du bassin et les eaux souterraines coulent vers le nord, en direction de la vallée du fleuve Niger qui constitue la principale zone de déversement (Kpegli et al. 2015).



1- Siltites, **2-** Grès fin avec un fond micro-conglomératique **3-** Grès fluviatiles **4-** Conglomerats et brèches **5-** Socle

Figure 5 : Coupe géologique interprétative du Bassin de Kandi (Boukari, 2007) d'après (Konaté 1996) de direction W-E (annexe 3).

La coupe hydrogéologique (figure 6) de direction SSW et NNE (annexe 2) (Gbewezoun, 2017), met en évidence trois aquifères de bas en haut au niveau du bassin sédimentaire de Kandi. Il s'agit en première position de la formation de Wèrè qui n'affleure qu'au Sud et disparait en profondeur en allant vers le Nord. Le second correspond à la formation de Kandi à nappe libre au centre mais pourrait se retrouver également sous pression en allant vers le nord et le troisième

correspond aux alluvions de la vallée du Niger au Nord du bassin. Les trois formations hydrogéologiques en contact physique, donc en continuité hydraulique verticalement, correspondraient en fait à un seul et même aquifère.

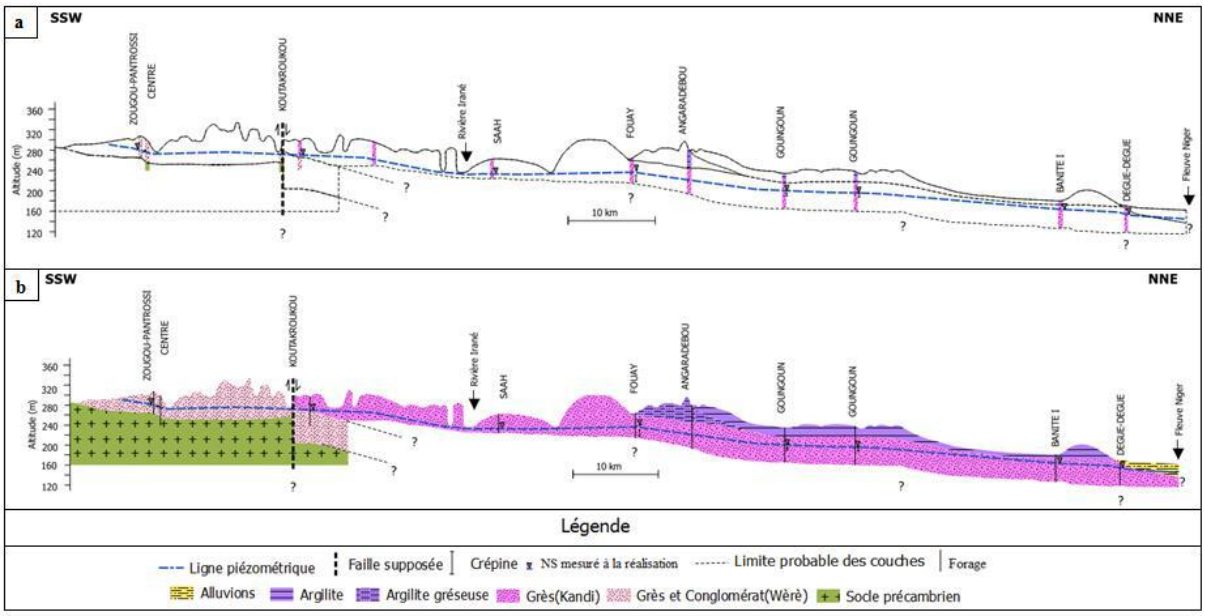


Figure 6 : Corrélation lithostratigraphique (a) et coupe hydrogéologique (b) suivant la direction SSW-NNE (Gbewezoun 2017).

1.4 Végétation

La végétation est constituée d'une savane arbustive clairsemée, dominée par des épineux dont l'Acacia seyal et l'Acacia siebenona au Nord et une savane arborée herbeuse fortement dégradée au Sud. On y trouve des arbres d'intérêt socio-économique comme *Parkia biglobosa* (néré) *Butyrospermun paradoxa* (karité) et *Adansonia digitata* (baobab) qui sont des essences protégées. Les galeries forestières longent les cours d'eau, les vallons. Ces forêts sont peuplées d'essences telles que le caïlcédrat (*Khaya Senegalensis*), le faux acajou (*khaya grandifolia*), et le lingué (*Afzélia africana*) (RGPH-4, 2013). Il y a la présence de plusieurs forets au niveau du Bassin. Celles de Gouroubi, de Goungoun, de la Sota et de Kandi (figure 1). Également au sud du bassin se trouve la forêt des trois rivières et la zone cynégétique de Djona (Nord-Ouest) recouvrant en partie le BSK (figure1).

1.5 Climat et hydrographie

Le climat dans le bassin évolue du type soudanien dans sa partie Sud vers le type soudano-sahélien dans sa partie Nord. Il est caractérisé par un régime unimodale de saison de pluie entre les mois d'avril à octobre et une saison sèche durant les autres mois de l'année. La pluviométrie moyenne annuelle de la période (1991-2021) à la station synoptique de Kandi est 1050, 32 mm

(figure 7). L'analyse de cette figure montre que les mois les plus pluvieux de l'année sont ceux de mai à septembre avec un pic observé dans le mois d'août. L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle au niveau de la même station est de 930.71mm. Ce climat de type soudanien joue un grand rôle dans la disponibilité des ressources en eaux du bassin. Un dérèglement de ce climat impacterait directement la pluviométrie et par ricochet le taux des recharges des aquifères dans l'ensemble du bassin.

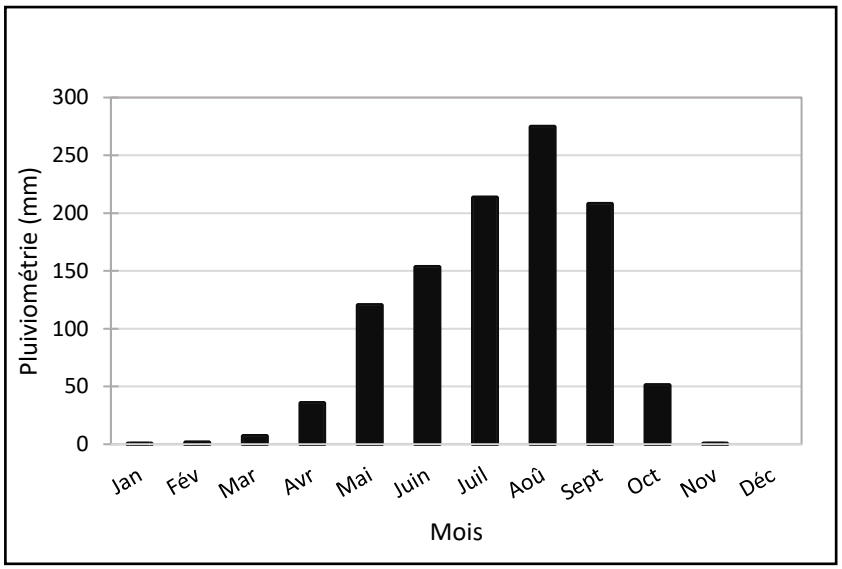


Figure 7 : Moyennes mensuelles (1991-2021) de la pluie à la station synoptique de Kandi (Source des données : METEO Bénin**)**

Le réseau hydrographique du BSK est très dense et est constitué des cours d'eaux qui sont principalement les affluents du côté Béninois du fleuve Niger (figure 8). Il s'agit des cours d'eau d'Alibori et de la Sota avec ses affluents Tassinet, et Irané. La Sota est le principal cours d'eau qui traverse le bassin du Sud au Nord pour se jeter dans le fleuve Niger. L'Alibori se trouve dans sa partie Nord-Ouest en petite portion. Toutes ces rivières sont plus ou moins intermittentes et sont tributaires du fleuve Niger. L'analyse morphologique du réseau hydrographique montre que tous les cours d'eau sont approximativement orientés Nord-Sud, sauf à l'Est du BSK où le socle affleurant a imposé une direction NE-SW à la rivière Illogorou et ses affluents (Alidou, 1983).

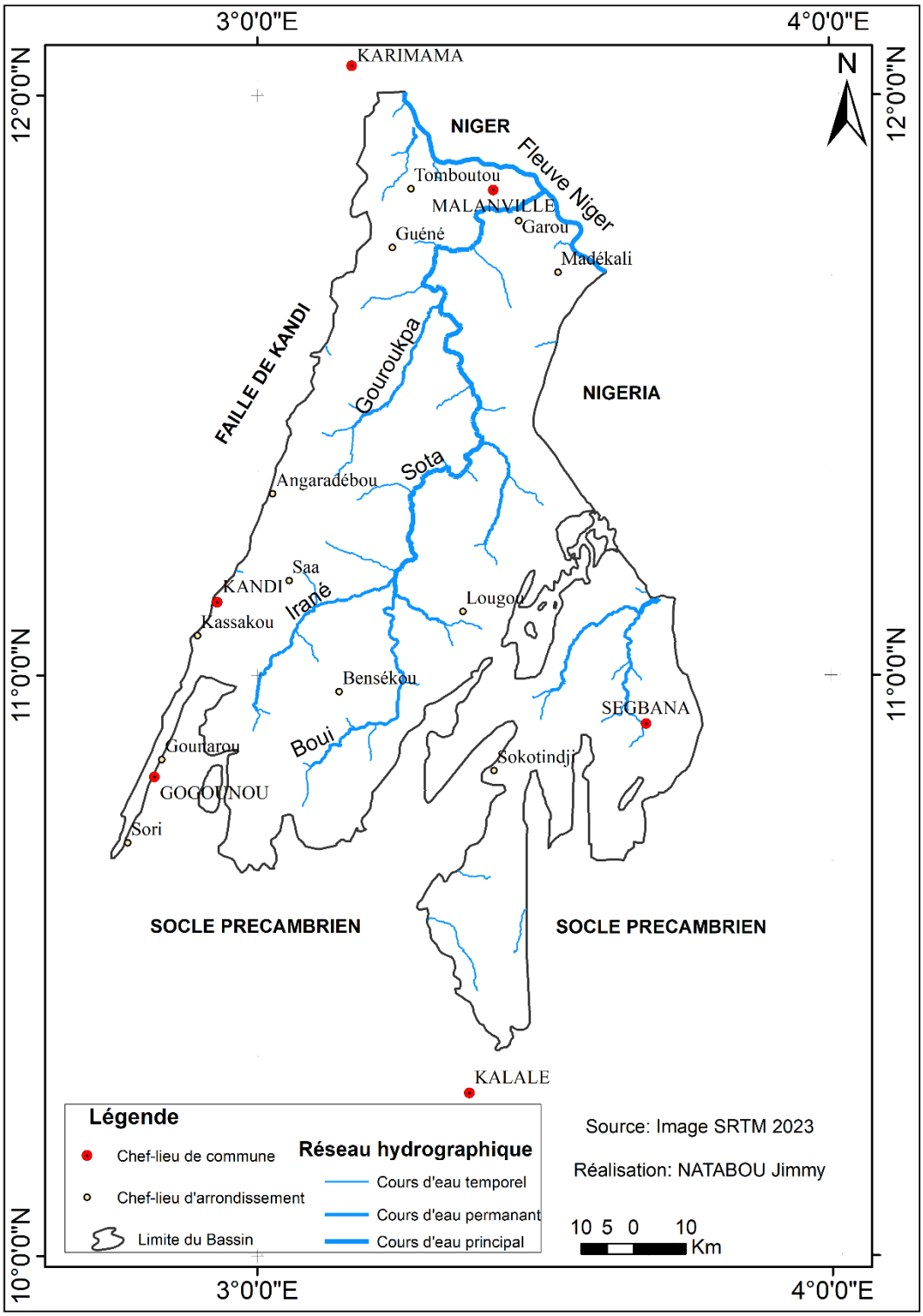


Figure 8 : Carte du réseau hydrographique du Bassin Sédimentaire de Kandi.

1.6 Quelques aspects socio-économiques

Six agglomérations se localisent dans les limites du bassin sédimentaire de Kandi à savoir la commune de Karimama, Malanville, Kandi, Kalalé, Gogounou et Sègbana. Certaines sont situés dans leur intégralité, tandis que d'autres occupent une partie de l'étendue du bassin. La population cumulée habitant le bassin est estimée à environ 635 818 individus selon le

quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH-4) de 2013. L'assemblage ethnique observable dans le bassin comprend les groupes suivants : Baatombu, Peuls, Dendi, Haoussa, Mokolé, Boo, Bariba, Kotokoli, Yom, Lokpa, Otamari, Djerma, Yorubas, Nago et Gourmantché, Fon Mina, et Goun. Les activités économiques menées à l'intérieur du bassin englobent principalement l'agriculture, l'élevage, le commerce et les transports. L'agriculture se distingue comme la source de revenus prédominante pour les municipalités distinctes situées dans le bassin. Les principales cultures cultivées sont le coton, l'igname, le maïs, le sorgho, arachide et le riz. Cette pratique agricole se caractérise par sa focalisation sur les cultures vivrières. La population habitant le bassin occupe une superficie non négligeable du bassin. Leur mode de vie par l'utilisation de la ressource en eau, l'utilisation des terres, leur pratique agricole impact la recharge des nappes mais également la qualité de l'eau des nappes.

La première partie dédiée à la présentation du cadre physique du milieu d'étude a permis d'examiner en détail les éléments qui englobent l'environnement dans lequel se situe le sujet de recherche. Les aspects géographiques, hydrographiques, hydroclimatiques, géologiques, hydrogéologiques et socio-économiques ont permis d'assoir une base nécessaire pour une analyse approfondis des enjeux qui seront abordés dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Approche méthodologique

Chapitre II : Approche méthodologique

2.1 Données

Les différentes données utilisées au cours de cette étude sont constituées essentiellement des données planimétriques, climatiques, piézométriques.

2.1.1 Données Planimétriques

Les données planimétriques comprennent la carte pédologique de reconnaissance du Dahomey au 1/200 0000, les feuilles géologiques de Malanville, de Bembèrèkè et de Dunkassa extraite de la carte géologique du Bénin d'échelle 1/200 000 de 1989 réalisé par l'office Béninoise des Mines et les Fonds topographique de L'ING de 2018. Également l'image satellitaire Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) obtenue le 10 janvier 2023 et de l'image Oli tirs de LANDSAT 9 de la scène 191-051 téléchargé le 03 mars 2023 sur le site Earth Explorer de United States Geological Survey (USGS) est utilisée. L'image SRTM de notre zone d'étude a permis d'extraire un Model Numérique de Terrain (MNT) de résolution 30m, des cartes de pente de terrain, de densité de drainage et hydrographique. Le traitement de l'image LANDSAT Oli a permis d'extraire la carte d'occupation des sols.

2.1.2 Données climatiques et piézométriques

Les données climatiques utilisées sont composées des données pluviométriques de la station synoptique de Kandi. Les données pluviométriques collectées sont de la période de 2011 à 2020. Elles ont permis de connaitre les hauteurs de pluie durant cette période. Ce qui a facilité la détermination des moyennes annuelles des hauteurs de pluie durant cette période. Ces données utilisées sont obtenues à la METEO Bénin. Pour les chroniques piézométriques, elles sont obtenues grâce aux niveaux statiques mesurées par les capteurs qui enregistrent de façon automatique la fluctuation du niveau des nappes dans les cinq (05) piézomètres (P1 Malanville, P2 Gogounou, P3 Ségbana, P4 Ségbana et P6 Kandi) installés dans le BSK par la Direction Générale de l'Eau (DGeau). Ces données de fluctuation du niveau des nappes obtenues journalièrement sur la période de 2011-2020 ont permis par la suite, la détermination des moyennes annuelles. Notons qu'il y a des lacunes de données pour certaines années au niveau de certains piézomètres. Un manque de trois ans soit 2013-2016 pour le P3 et un manque de l'année de 2013 pour P4 ce qui est dû au disfonctionnement des capteurs installés au niveau de ces piézomètres durant ces périodes.

2.2 Matériel utilisé

Plusieurs outils ont été utilisé pour le traitement des données. Il s'agit du Microsoft office Word 2016, Excel 2016, des logiciels tels que QGIS 3.16, ArcGIS 10.4, ENVI 5.1 et le langage de programmation R version 4.1.2

Les logiciels QGIS et ArcGIS pour l'interpolation et la réalisation des différentes cartes, l'ENVI 5.1 pour le traitement des images satellitaires et le langage R et Excel pour le traitement des données statistiques et la résolution des équations complexes et Word pour la rédaction du rapport.

2.3 Méthodes

2.3.1 Recherches documentaires

Au cours de cette étape, nous avons recueilli les informations fondamentales concernant les techniques de cartographie, de télédétection, des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes phréatiques. Ces renseignements variés ont été extraits de documents tels que des thèses de doctorat, des articles scientifiques, des rapports de mémoires, des rapports d'études, etc.

2.3.2 Cartographie des potentielles zones de recharges

Dans cette étude, la méthode employée pour repérer les zones potentielles de recharge de la nappe consiste à croiser les données spatiales liées aux divers facteurs qui influent sur la recharge des aquifères. Elle se résume par l'identification des paramètres ; la cartographie et la reclassification des paramètres, la pondération des paramètres par la méthode multicritère AHP et enfin la combinaison des cartes thématiques pour cartographier les zones potentielles de recharge des nappes (Haouchine et *al.* 2010 ; Abdou Ali & Konaté, 2020 ; Aké et *al.* 2018).

2.3.2.1 Identification des paramètres influençant la recharge

Les travaux de Haouchine et al. (2010), indique que les paramètres qui contribuent à la recharge des aquifères dans une région sont : le type sol, le type d'occupation du sol, la géologie, la pente du terrain et la densité de drainage. Ces paramètres sont fonction des caractéristiques du milieu d'étude. Outre ces paramètres la densité de fracturation, l'épaisseur d'altération et la perméabilité peuvent être complété dans le cas où il s'agit d'une zone de socle. Notre cadre d'étude étant un bassin sédimentaire nous avons fait le choix de cinq paramètres. Ainsi donc les paramètres prisent en compte dans cette étude sont : le type de sol, le type d'occupation des sols, la géologie, la pente du terrain et la densité de drainage.

2.3.2.2 La cartographie des paramètres et reclassification

2.3.2.2.1 Etablissement de la carte du type de sols

Le type de sol joue un rôle crucial dans la recharge des aquifères. Ces différentes caractéristiques influencent la vitesse d'infiltration et la rétention d'eau. La carte du type de sols (figure 9) est obtenue par numération de la carte pédologique de reconnaissance du Dahomey au 1/200 0000. L'ensemble de la superficie du BSK est constitué des sols ferrugineux tropicaux plus ou moins sableux. On y rencontre également des sols minéraux bruts sur roches affleurant et sur cuirasse et des sols peu évolués sur matériau alluvial que l'on retrouve dans la vallée des cours d'eaux.

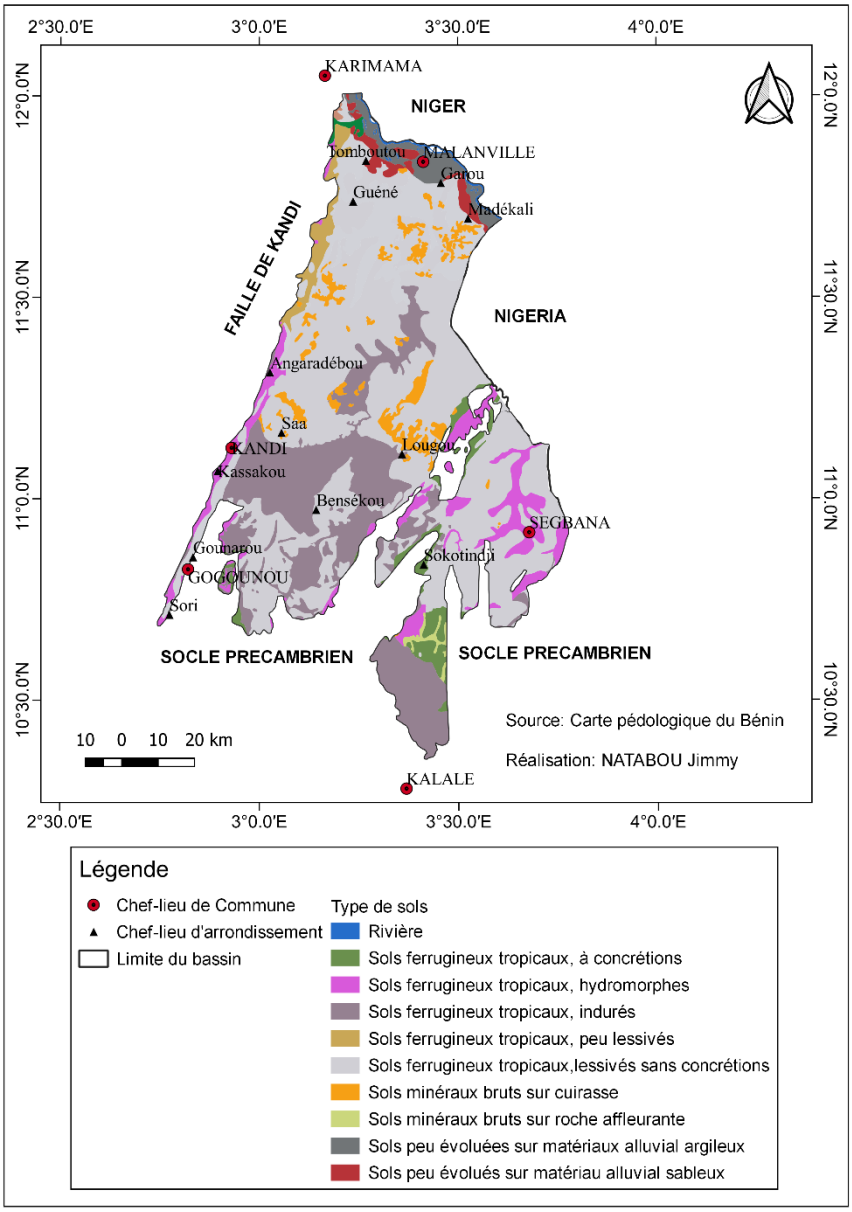


Figure 9 : Carte des types de sols du Bassin Sédimentaire de Kandi

2.3.2.2.2 Etablissement de la carte d'occupation du sol

L'occupation du sol est un facteur qui influence directement la manière dont l'eau interagir avec le sol. La réalisation de sa carte (figure 10) s'est faite en utilisant des images satellitaires de Landsat 9. Ces différentes images sont prétraitées, réhaussées pour une bonne extraction des informations recherchées. Ensuite une classification des différentes occupations du sol a été faite. L'occupation des sols au niveau du Bassin Sédimentaire de Kandi est repartie en neuf (09) classes que sont : Mosaïque de culture et jachère, forêt claire et savane marécageuse, forêt dense, habitation, savanes arborée et arbustive, sol érodé et dénudé, surface rocheuse et enfin surface sableuse. Ces différentes classes sont localisées un peu partout dans le bassin.

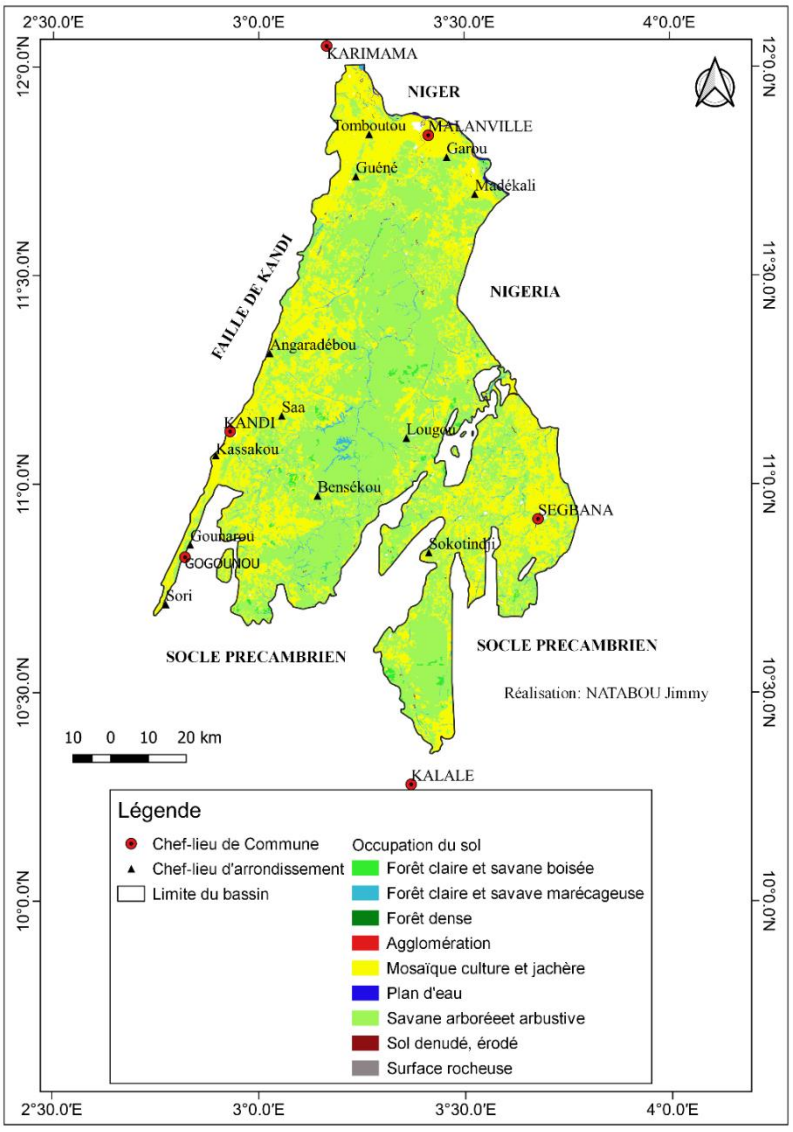


Figure 10: Carte de l'occupation des sols dans le Bassin Sédimentaire de Kandi

2.3.2.2.3 Etablissement de la carte de pente de terrain

Les pentes influent sur la direction et la vitesse de l'écoulement de l'eau de pluie. Sur une pente plus prononcée, l'eau peut s'écouler rapidement, limitant le temps d'infiltration. En revanche, sur une pente plus douce, l'eau à plus de temps pour s'infiltrer dans le sol. La carte des pentes (figure 11) a été établie à partir du MNT suite au traitement de l'image SRTM. La carte des pentes obtenue est classée en quatre grandes classes que sont : (0 – 3,31), (3,31- 6,85), (6.85 – 15,92) et (15,92-56,38). La majorité de la zone d'étude a une pente plus ou moins uniforme à l'exception des vallées des cours d'eau où l'on retrouve les pentes les plus élevées du bassin.

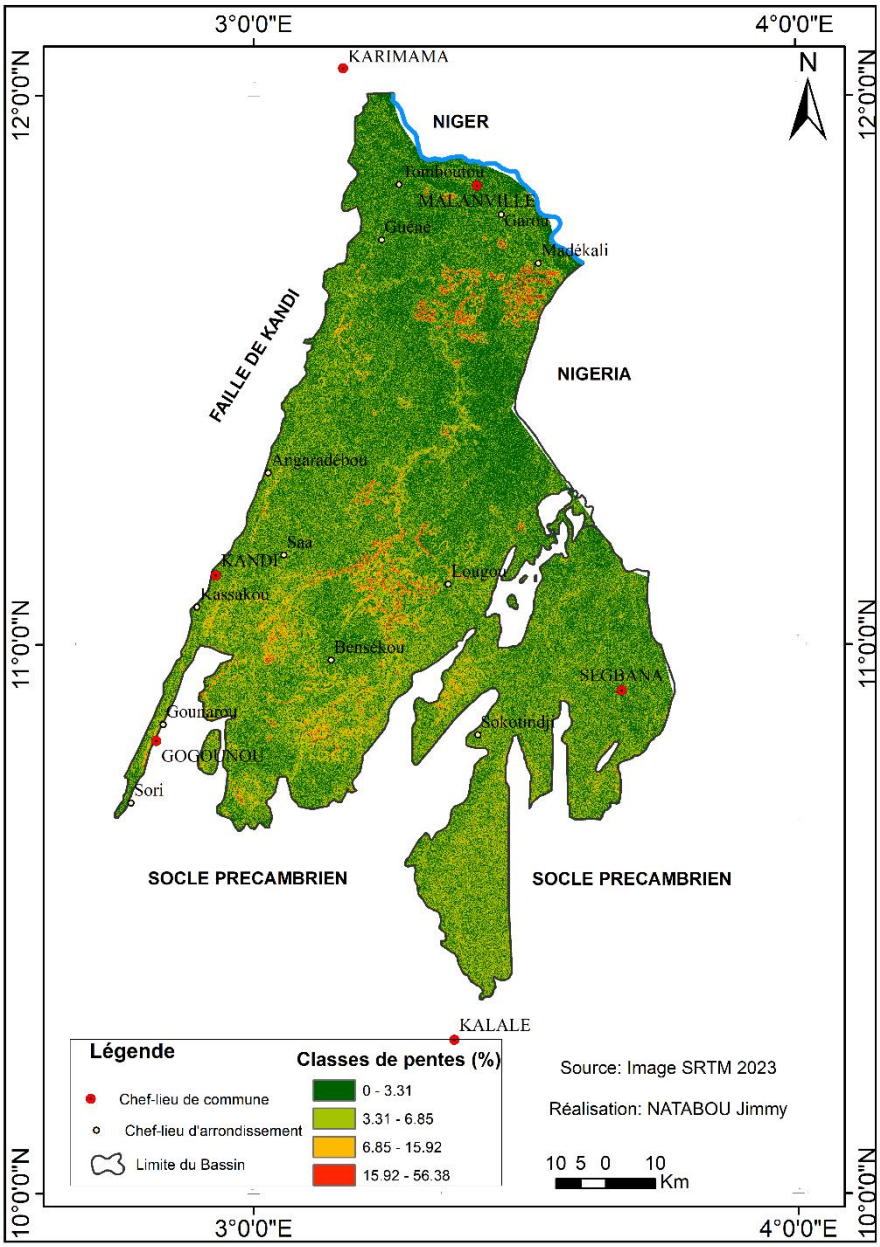


Figure 11: Carte des pentes du Bassin Sédimentaire de Kandi

2.3.2.2.4 Etablissement de la carte densité de drainage

La densité de drainage est le rapport entre le linéaire total du cours d'eau dans un bassin et la superficie de ce dernier. Elle s'exprime en Km/km². La carte de densité de drainage permet d'identifier les zones où l'infiltration de l'eau dans le sol est la plus importante. Les zones avec une densité de drainage plus faible indiquent généralement une meilleure capacité d'infiltration, ce qui peut être essentiel pour la recharge de l'aquifère contrairement aux zones de densité de drainage plus forte. La carte de densité (figure 12) a été établie à partir du réseau hydrographique extraite de l'image SRTM du bassin sédimentaire de Kandi. Elle affiche quatre grandes catégories de densité, caractérisées par des niveaux élevés le long des cours d'eau et aux intersections avec les affluents, diminuant de manière progressive à mesure que l'on s'éloigne des cours d'eau. Les valeurs varient 1.52 km/km² à 86.16 km/km².

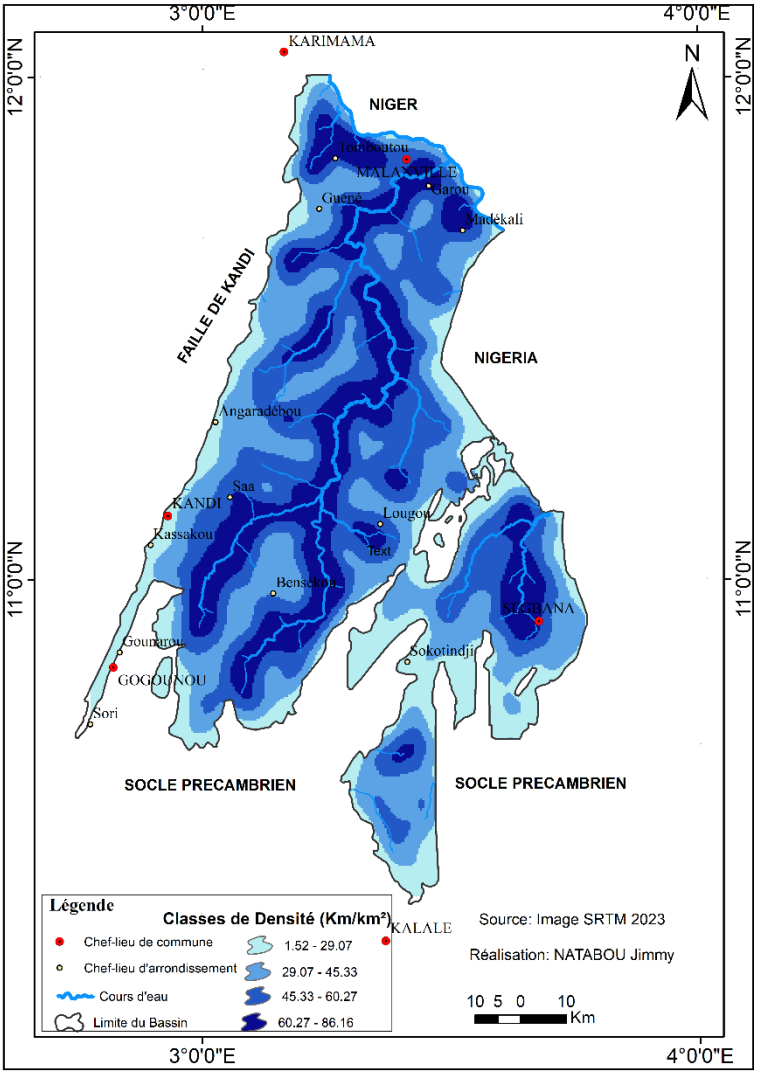


Figure 12 : Carte de densité de drainage du Bassin Sédimentaire de Kandi

2.3.2.2.5 Etablissement de la carte des formations géologiques

La géologie permet d'identifier les types de formations géologiques qui sont propices à la recharge des aquifères. Elle fournit les outils nécessaires pour comprendre la structure, la composition et le comportement du sous-sol. La carte géologique (figure 13) est obtenue par numérisation de la carte géologique du Bassin Sédimentaire de Kandi (Konaté, 1996). La carte géologique obtenue présente les formations lithologiques composées de couverture sédimentaire récent constitué de sable argileux au niveau de la vallée du fleuve Niger. La formation du grès de Kandi est celle qui couvre la majorité de la superficie du bassin. Elle est présente du nord au sud en passant par le centre et de l'Ouest à l'Est constitué de grès fin et de siltites. En dehors de ces deux formations il y a les formations de Sendé localisé au Nord Est et le continental terminal qui est repartie en de petite portion au centre à l'Est et vers le Nord-Est du Bassin.

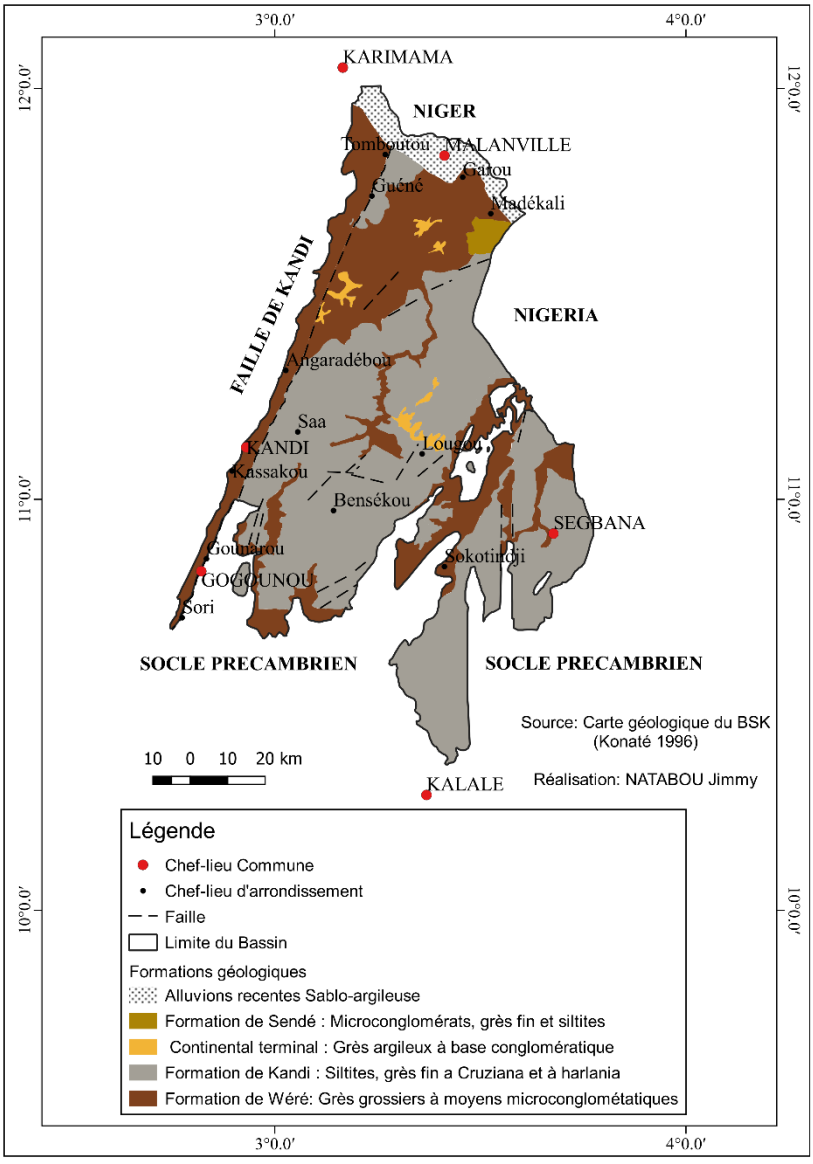


Figure 13 : Carte des formations géologiques du Bassin Sédimentaire de Kandi

2.3.2.3 Reclassification des paramètres

La reclassification des cartes paramétriques consiste à définir de nouvelles classes de sorte à établir des cartes thématiques en vue de mieux apprécier le phénomène étudié (Djémin et *al*, 2022). L'attribution des cotes a été rendue possible grâce à l'évaluation des classes de divers paramètres. Cette approche repose sur l'assignation de notes aux différentes catégories de paramètres sélectionnées, évaluées en fonction de leur degré d'infiltration, en délimitant des intervalles. Pour l'assignation des côtes des différents paramètres, nous nous sommes basés sur l'échelle des côtes de Haouchine (Tableau 2) tout en prenant en compte l'avis des personnes ressources sur les différentes caractéristiques des paramètres contrôlant la recharge.

Grâce à cette classification, les côtes de chaque classe (Tableau 1) des paramètres influençant l'infiltration dans notre zone ont été obtenu.

Tableau 1 : Reclassification des paramètres et les côtes assignées aux différentes classes

Paramètres	Classes	Degré d'infiltration	Côtes
Sol	Rivière	Faible	2
	Sols ferrugineux tropicaux hydromorphe, sols ferrugineux tropicaux indurés, sols ferrugineux tropicaux lessivés sans concrétions	Moyen	5
	Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés	Faible	2
	Sols ferrugineux tropicaux à concrétions, sols minéraux bruts sur curasse	Faible	2
	Sols minéraux bruts sur roche affleurante	Faible	2
	Sols peu évolués sur matériaux alluvial argileux	Faible	2
	Sols peu évolués sur matériaux alluvial sableux	Très fort	9
	Sols peu évolués sur matériaux alluvio-colluvial	Moyen	5
	Mosaïque culture jachère	Fort	7
	Forêt claire et savane marécageuse	Moyen	5

Occupation du sol	Forêt claire savane boisé	Fort	7
	Forêt dense, plan d'eau	Faible	2
	Agglomération	Faible	2
	Savanes arborées et arbustive	Fort	7
	Sol érodé et dénudé, surface rocheuse	Faible	2
	Surface sableuse	Très fort	9
Pente de terrain	0 - 3.31	Très fort	9
	3.31- 6.85	Fort	7
	6.85 -15.92	Moyen	5
	15.92 - 56.38	Faible	2
Formation géologique	Alluvions récentes sablo-argileuse	Moyen	5
	Grès argileux à base conglomératique	Moyen	5
	Siltites, grès fin à Cruziana et à Harlania	Moyen	5
	Microconglomérats, grès fin et siltites	Moyen	5
	Grès grossiers à moyens microcongloméatiques	Fort	7
Densité de drainage	1.51 -29.07	Très fort	9
	29.07 -45.33	Fort	7
	45.33-60.27	Moyen	5
	60.27-86.16	Faible	2

Tableau 2 : Échelle d'évaluation des différents paramètres vis-à-vis de l'infiltration

(Haouchine *et al.*, 2010)

Classe	Très fort	Fort	Fort à moyenne	Moyenne	Moyenne à faible	Faible	Très faible
Côtes	10	8	6, 5	5	3, 5	2	1

2.3.2.4 Détermination des poids des paramètres par la méthode d'analyse multicritère (AHP)

La méthode d'analyse multicritère de Saaty connue également sous le nom d'analyse multicritère par échelles de jugement, a été développée par (Saaty, 1980). C'est une méthode d'aide à la prise de décision. Elle est celle choisie dans cette étude pour déterminer les poids des paramètres pour la cartographie potentielle des zones de recharge des nappes. Cette méthode facilite la détermination des poids de pondération en effectuant des comparaisons par paire. Les différents paramètres impliqués sont pris deux à deux en se basant sur leur importance dans le processus de recharge des nappes dans notre étude. La comparaison est effectuée en utilisant l'échelle de notation de Saaty (1980), comme présenté dans le tableau 4. Le tableau 5 présente la matrice dérivée de la comparaison par paire des paramètres. Lorsque deux paramètres ont une importance équivalente dans le processus de recharge des nappes, la note 1 leur est assignée. Cependant, si l'importance d'un paramètre est supérieure à celle de l'autre, des notes sont affectés dans la plage de 3 à 9 ; autrement, les notes attribuées varient de 1/9 à 1/3.

A la suite des comparaisons binaires, une vérification de la cohérence des jugements à travers l'établissement des priorités est nécessaire. Ces priorités permettront de synthétiser les appréciations faites d'une façon mathématique afin de vérifier leur cohérence (Saaty, 1990). La vérification de la cohérence des jugements se fait en calculant le ratio de cohérence (RC). Sa détermination n'est possible qu'après avoir calculé l'Indice de cohérence (Ic) et connaitre également la valeur de l'indice aléatoire. La justification de la cohérence des jugements se faits en se basant sur le ratio de cohérence. S'il est inférieur à 10% cela implique que les jugements sont cohérents dans le cas contraire ils sont incohérents. Les valeurs des indices aléatoires sont définies en fonction du nombre de paramètre pris en compte pour l'étude (Tableau 3).

Tableau 3 : Valeur de l'Indice aléatoire en fonction du nombre de critères (Saaty,1980)

Nombre de critères	**2.00**	**3.00**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
Ia	0.00	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Dans la présente étude, cinq (5) paramètres ont été utilisé. Donc la valeur de l'indice aléatoire prise en compte est de 1.12.

L'indice de cohérence et du ratio de cohérence sont déterminés par les formules suivantes :

$$\boldsymbol{IC = \frac{\lambda \max - k}{k-1}} \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{RC = \frac{IC}{Ia}} \qquad (2)$$

Où, **IC** est l'indice de cohérence, **λmax** est la valeur propre maximale des éléments comparés, **k** est le nombre d'éléments comparés, **RC** est le ratio de cohérence, **IC** est l'indice de cohérence et **Ia** est l'indice aléatoire. Le calcule de IC et RC sont détaillés dans (Anoh et al., 2012). Les résultats obtenus sont consignés dans le (tableau 5).

Le Ratio de cohérence obtenu dans notre cas est de 5%, donc inférieur à 10% ce qui implique que nos jugements sont cohérents et satisfaisants. Le coefficient de pondération d'un paramètre est déterminé après le calcul de son vecteur propre. Il exprime l'importance de chaque paramètre par rapport à un autre (Saaty, 1977). Le vecteur propre Vp et le coefficient de pondération Cp sont respectivement déterminés à partir des équations suivantes :

$$\boldsymbol{Vp = \sqrt[k]{W1\ X \ldots X\ Wk}} \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{Cp = \frac{Vp}{\Sigma Vp}} \qquad (4)$$

Vp est le vecteur propre, **W** est la note de la comparaison par paire, **k** est le nombre de paramètres considérés et **Cp** est le coefficient de pondération.

Tableau 4 : Expression Verbale et Numérique de l'Importance Relative d'une Paire de critères (Saaty, 1980)

Expression d'un critère par rapport à un autre	Notes
Même importance	1
Modérément important	3
Fortement important	5
Très important	7
Extrêmement important	9
Modérément moins important	1/3
Fortement moins important	1/5
Moins important	1/7
Extrêmement moins important	1/9
Valeurs intermédiaires	2, 4, 6 et 8

Tableau 5 : Matrice issue de la comparaison des différents paramètres

Paramètres	**OS**	**S**	**P**	**G**	**D**	**Vp**	**Cp**
OS	1	3	4	5	4	3.35	0.45
S	1/3	1	3	5	5	1.90	0.28
P	1/4	1/3	1	3	5	0.61	0.16
G	1/5	1/3	1/5	1	3	0.58	0.08
D	1/7	1/5	1/5	1/7	1	0.24	0.04
Somme	-	-	-		-	6.68	1.00
		IC= 0.06			Ia = 1.12		**RC = 0.05**

Légende : OS : Occupation du sol

S : Type de sol

P : Pente

G : Géologie

D : Densité de drainage

2.3.2.5 Combinaison des cartes thématiques pour la cartographie des zones potentielles de recharge

La cartographie des zones potentielles de recharge est faite par la méthode d'agrégation complète des paramètres. Cette méthode utilisée par les SIG consiste à multiplier chaque couche thématique par son coefficient de pondération en additionnant les résultats pour produire des indices d'aptitude du degré d'infiltration des eaux pour la recharge des nappes. La méthode de calcul utilisée dans le SIG pour la superposition des cartes est l'approche opérationnelle du critère unique de synthèse de Roy (Garouni et Merzouk, 2006). La formule appliquée dans le SIG pour déterminer les indices d'infiltration des eaux dans les nappes est la suivante :

$$\mathbf{I_{inf} = 0{,}45\,[OS] + 0.28\,[S] + 0{,}16\,[P] + 0.08\,[G] + 0{,}04\,[D]\ (}\ 5)$$

Avec $\mathbf{I_{inf}}$ la somme des côtes pondérées calculées pour chaque pixel du raster à partir de la côte des cinq paramètres.

2.3.3 Evaluation de la recharge potentielle dans les différentes zones cartographiées

L'évaluation de la recharge des nappes d'eau souterraines constitut un véritable casse-tête pour les scientifiques puisque qu'elle implique plusieurs facteurs difficiles à caractériser. Ainsi dans la présente étude le choix est porté sur une méthode de spatialisation combinée avec les hauteurs d'eau précipitées. Cette méthode fait un croissement des paramètres qui contrôlent la recharge en utilisant les SIG afin de connaitre les dégrées d'infiltrations de l'eau dans les différentes zones afin de déterminer par la suite le volume qui s'infiltre au niveau de chaque polygone.
Notre premier objectif a permis de sortir la carte des zones potentielles de recharge du secteur d'étude ce qui constitue une étape cruciale pour déterminer la recharge potentielle de façon zonale. Grace à cette carte quatre zones potentielles ont été catégorisées. Ainsi en se basant sur le résultat de notre premier objectif et de l'échelle proposée par la FAO (1967), nous avons évaluer les potentielles recharges. L'échelle proposée par la FAO (Tableau 6) a permis de connaitre le pourcentage d'eau qui s'infiltre dans chaque zone en fonction de sa classe.

Tableau 6 : Classification des taux de recharge selon FAO (1967)

Classe de recharge	Très forte	Forte	Moyenne	Faible	Très faible
FAO (1967)	45-50%	30-35%	10-20%	5-10%	< 5%

Taux Moyen	**47.5**	**32.5%**	**15%**	**7.5%**	----------
Taux Déterminée	45-50%	30-35%	10-20%	5-10%	--------

Pour calculer la quantité d'eau qui s'est réellement infiltrée la FAO (1967) propose un calcul simplifié.

Volume infiltré (*Vinf) = volume précipité x Σ taux de recharge x % de la surface (* 6)

- **Calcul de la surface des polygones de chaque classe**

Les différentes surfaces sont lues directement sur la couche dessin qui sont automatique calculées par le logiciel Argis.

- **Calcul de la surface totale :**

La surface est calculée en additionnant les valeurs des différentes surfaces directement relevées sur la couche (surface du polygone délimitant chaque classe).

- **Calcul du volume précipité :**

La période prise en compte pour déterminer les volumes précipités au niveau du bassin est de 2011 à 2020, soit sur dix ans. Nous avons dans un premier temps calculé le volume précipité pour chaque année ce qui a permis par la suite d'estimer les recharges annuelles. Ces volumes sont déterminés par (l'équation 6) suivante :

Volume précipité = précipitation moyenne x surface totale (7)

2.3.4 Evaluation de la recharge réelle par la méthode de fluctuation piézométrique (MFP)

Les données des niveaux statiques acquises au niveau de la DGEau ont permis de calculer les niveaux piézométriques et par la suite estimer la recharge moyenne annuelle sur la période de (2011-2020) au niveau du BSK. Le niveau piézométrique est déterminé par (équation 9) suivante :

$$\boldsymbol{NP = Z - NS} \quad (8)$$

Avec :

NP : le niveau piézométrique (m) ;

Z : l'altitude par rapport au point de mesure (m)

NS : le niveau Statique (m).

La méthode des fluctuations piézométriques a impliqué la représentation graphique de l'évolution des niveaux piézométrique au fil du temps, avec les années en abscisse et les niveaux piézométriques en ordonné. Cette approche nous a permis d'évaluer l'amplitude piézométrique annuelle sur toute la période étudiée des piézomètres prisent en compte. L'amplitude est obtenue en faisant la différence entre le point le plus élevé et le point le plus bas au niveau de la courbe de variation des niveaux piézométriques (annexe 4). L'amplitude moyenne des fluctuations piézométriques multiplier par la porosité efficace a permis d'estimer la Lame d'eau (équation 9).

$$\boldsymbol{Leau = Sy * Amp\ moy} \quad (9)$$

Avec Leau (m), la lame d'eau rechargée ; Sy (%), la porosité efficace et Ampl moy (m), l'amplitude moyenne.

La porosité de drainage qui représente la proportion des vides ou des espaces interstitielles dans un matériau géologique qui sont interconnectés permettent le déplacement et le stockage de l'eau souterraine. Ce Facteur représente un paramètre très important dans l'estimation de la recharge par la méthode des fluctuations piézométriques. Dans la présente étude, la porosité prise en compte est celle utilisé par (Séguis et al, 2011) qu'est de 2%.

Notre méthodologie intégrative, alliant données variées techniques et analytiques, constitue le fondement essentiel sur lequel repose notre étude. Ces approches nous ont permis de poser les jalons nécessaires à une analyse approfondie des dynamiques hydrologiques, ouvrant la voie des conclusions éclairées et des recommandations pertinentes pour la gestion des ressources en eau.

Chapitre III : Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussions

Cette partie de notre étude offre l'occasion de récapituler nos résultats et de les replacer dans le contexte de notre recherche. Nous mettrons en lumière les principaux résultats obtenus et discuterons de leur importance pour la gestion des ressources en eau. Nous aborderons également les limites de notre étude et identifierons les pistes de recherches futures pour pousser notre compréhension des phénomènes hydrologique du bassin sédimentaire de Kandi.

3.1 Résultats

3.1.1 Carte des potentielles zones de la recharge

L'utilisation des SIG et de la méthode multicritère AHP ont permis de ressortir la carte des potentielles zones de recharges du BSK (figure 14).

L'analyse de cette carte permet d'identifier quatre degrés de recharges à savoir : Degré de mauvaise recharge, de recharge médiocre, de bonne recharge et enfin d'excellente recharge.

Les zones de faible recharge ne représentent que 1% de la superficie cartographiée du bassin. Elles sont localisées dans le lit du cours d'eau au sud de la Sota. Dans ces zones on note les plus forts pourcentages de pentes dans le BSK qui varient entre 15,92% à 56,36%. Ce qui favorise une grande densité de drainage qui permet plutôt un grand ruissellement d'eau au détriment d'une infiltration.

Les zones de recharge médiocre occupent 10% du Bassin. Elles se retrouvent le long des vallées des cours d'eau du nord au sud de la zone étude se situant sur les formations récentes sablo-argileuse. Elles se trouvent également au sud du bassin sur les sols ferrugineux tropicaux indurés avec une occupation allant de savane arborée et arbustive à forêt dense. La nature indurée des sols combiné avec une formation géologique composée de grès fin et de siltites limite plus moins l'infiltration de l'eau dans cette zone. En dehors des deux localisations majeures, on y rencontre également au niveau des localités de Ségbana, de Gogounou et de Malanville des îlots isolés de médiocre zone de recharge de part d'autre du bassin.

Les zones de bonne recharge représentent 71% du Bassin sédimentaire de Kandi. C'est la classe majoritaire répartie du Nord au sud, de l'Ouest à l'Est en passant par le centre. Elles se retrouvent en majorité sur la formation du grès de Kandi avec des petites pentes qui varient de 0 à 6.65 % mais également sur la formation de Wéré, du Continental terminal et de Sende. Avec des pentes moins prononcées constituant plus ou moins un plateau couvert d'une variété de forêt allant de forêt claire et savane boisée à savane arborée arbustive en passant par forêt dense, l'infiltration dans cette zone est bonne. Puisque la faible pente réduirait considérablement le ruissellement et les forets grâce aux racines des plantes valoriseraient une bonne infiltration

dans les premiers horizons de sol. Ensuite la présence des grès qui constituent des formations perméables viendraient compléter la liste. Tous ces facteurs occupant une très grande surface du bassin justifient le fort pourcentage de degré de recharge dans la zone d'étude.

Enfin les zones d'excellente recharge occupe 18% de la superficie cartographiée. Elles sont plus localisées à l'Ouest au niveau des localités telles que Kassakou, Angaradebou, au Nord-Ouest dans les localités de Tombouto et de Guéné. Au Nord-Est dans la localité de Madécali et longe la limite de l'Est du bassin du Nord-Est jusqu'au Sud-Est au environ de la localité de Ségbana. Notons également que la classe de recharge excellente se retrouve de part et d'autre sur l'ensemble de la surface en ilots isolés. Les différents secteurs d'excellente recharge sont couverts par des mosaïques de cultures et jachères avec des pentes variant de 0 à 3%. Des facteurs propices à une très bonne infiltration de l'eau.

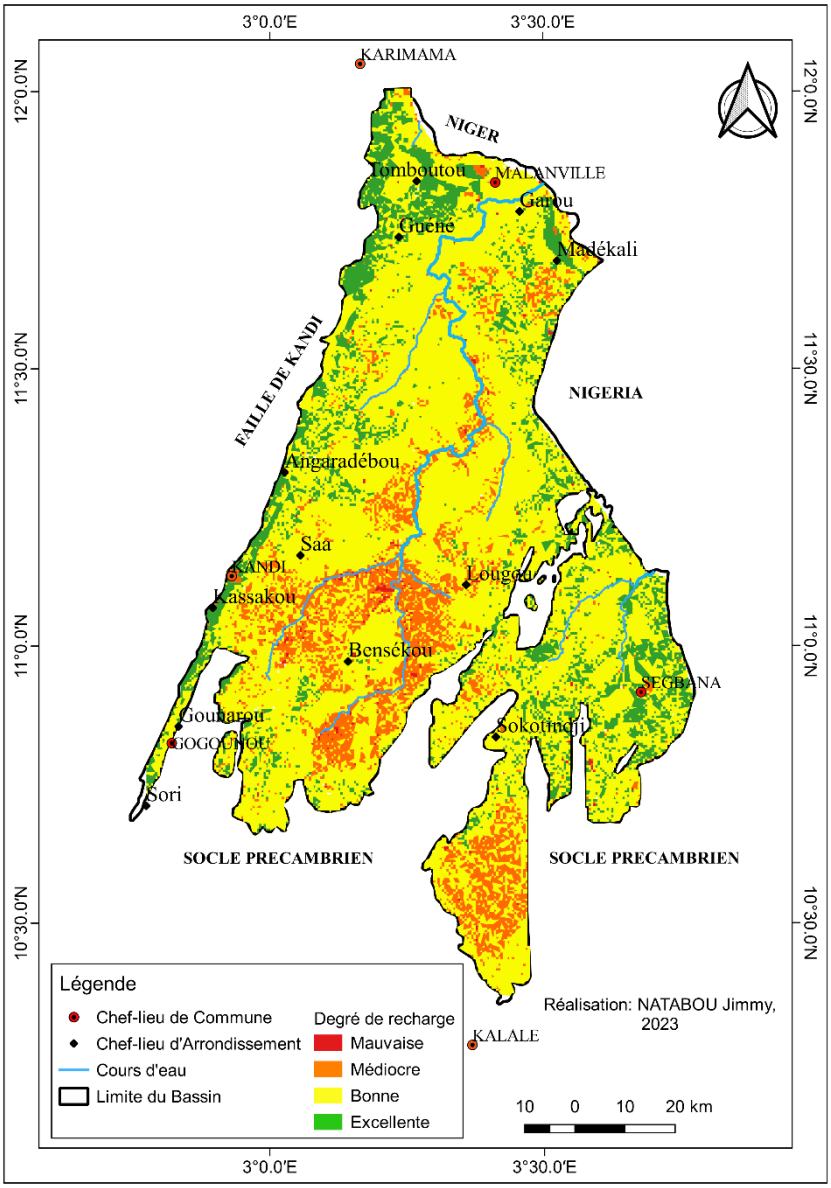


Figure 14 : Carte des zones potentielles de recharge dans le Bassin Sédimentaire de Kandi

3.1.2 Evaluation de la recharge potentielle

La recharge potentielle du BSK est obtenu par la combinaison des paramètres influençant la recharge par cartographie et l'analyse multicritère. Il s'agit d'utiliser les différentes superficies de chaque zone potentielle de recharge et leur taux de contribution afin de quantifier la part d'eau qui pourrait recharger la nappe à travers chaque superficie.

Le (tableau 7) présente les différentes superficies liées à chaque zone de potentielle recharge accompagné de leur taux de recharge. Ces superficies sont calculées par le logiciel de cartographie sur la couche dessins représentant la surface des polygones délimitant chaque classe.

Tableau 7 : Superficie et taux de recharges des différentes zones

	Mauvaise (Surface 1)	**Médiocre (Surface 2)**	**Bonne (Surface 3)**	**Excellente (Surface 4)**
Surface (m2)	5 861 175 545	1 514 654 585	61 398 188	816 974 065
Taux de recharge (%)	1	10	71	18
Surface total (m^2)	8 254 202 383			

- **Calcule du Volume précipité ($V_{pré}$)**

P = 1050,32 mm = 1,0532 m ; surface Totale : 8 254 202 383 m²

$V_{pré}$ = 8 669 553 847 m^3/an

- **Calcule de la recharge**

V_{inf} = 8 669 553 847 x (0.71 x 0.475+0.18 x 0.325+0.01 x 0.075+0.1 x 0.15)

$V_{in\ f}$ = 2 923 807 035 m^3/an

L'utilisation de la valeur du volume d'eau infiltré a servis de déterminer la lame d'eau infiltrée dans l'ensemble de la zone d'étude. Elle vaut :

L_{inf} = 337.25 mm/an

De ce fait, au niveau du bassin sédimentaire de Kandi pour la période prise en compte, 32.11% des précipitations s'infiltrent. Ce pourcentage d'infiltration est reparti sur les différences zones

de la manière suivante : 22.80% sur la surface de bonne recharge, 5.78% au niveau de la zone d'excellente recharge, 3.21% dans la zone de recharge médiocre et enfin 0.32% au niveau de la zone de mauvaise recharge. Les zones de bonne et excellente recharge contribuent à 28.58% sur 32.11% des infiltrations.

La recharge potentielle au niveau de chaque zone d'excellente, de bonne, de médiocre et de mauvaise est respectivement de 60.71mm/an, 269.47mm/an, 33.71mm /an et de 3.36mm/an.

3.1.3 Evaluation de la recharge réelle par la méthode de fluctuation piézométrique

L'amplitude moyenne des remontées piézométriques provoquées par les recharges dans le secteur d'étude est déduite des fluctuations piézométriques temporelles. Les amplitudes de chaque année sont ensuite déterminées pour calculées leur moyenne concernant les cinq piézomètres. Ces amplitudes ont servi par la suite la détermination de la recharge au niveau de chaque piézomètre. Les amplitudes moyennes de la période de (2011-2020) par piézomètre et leur valeur de recharge sont présentées dans le (tableau 8).

Tableau 8 : Amplitudes moyennes des remontées piézométriques dans les différents piézomètres.

Piézomètre	Amplitude moyenne (2011-2020)	Recharge (mm/an)
P1 (Monkassa)	0.52 m	10.31
P2 (Zougou Pantrosso)	1.52 m	32.82
P3(Guené)	0.74 m	14.72
P4 (Piami)	1.68 m	33.53
P6 (Koutakroukou)	0.21m	4.13

Les amplitudes moyennes calculées varient de 0.21m à 3.86 m dans le Bassin Sédimentaire de Kandi. La plus grande amplitude moyenne enregistrée est au piézomètre P4, situé dans la commune de Ségbana, tandis que la plus petite est observée au piézomètre P6, localisé dans la commune de Kandi.

Ces amplitudes différentes ont été utilisées dans le cadre de la méthode de fluctuation piézométrique pour estimer la recharge réelle aux six piézomètres installés dans le bassin. Pour une pluviométrie moyenne de 1050.32 mm sur la période de dix ans, la recharge obtenue aux

piézomètres de P1 à P6 varie de 4.14 mm/an à 32.82 mm/an. Plus spécifiquement, elle s'élève à 10.31mm/an à Monkassa (P1) situé dans la commune de Malanville, à 32.82 mm/an au piézomètre de Zougou Pantrosso (P2) situé dans la commune de Gogounou, à 14.72 mm/an à Guené Laga (P3) et à 33.53 mm/an à Piami (P4), tous deux localisés dans la municipalité de Ségbana et enfin à 4.13 mm/an au niveau de la localité de Kotakroukou (P6).

3.1.3.1 Relation entre la recharge potentielle et celle réelle

La superposition des zones potentielles de recharge avec les recharges potentielles et la distribution des recharges réelles (figure 15) identifie quatre zones de recharge potentielle, allant de mauvaise à excellente, avec des taux de recharge de 3.6 mm/an à 229.47 mm/an. Cette classification reflète la capacité relative des différentes zones à recharger les aquifères en fonctions de divers paramètres géologiques et environnementaux. Les piézomètres (P1 à P6) projetés dans la zone étude révèlent une localisation de P1 à P4 dans la zone identifier comme étant une recharge potentielle bonne, contrairement au P6 qui se retrouve dans la zone caractérisée de médiocre recharge.

Les valeurs de recharges réelles pour ces piézomètres (P1 à P6) sont de 10.24 mm/an, 32.82 mm/an, 14.72 mm/an 33.53mm, 4.13mm/an respectivement. Ces valeurs reflètent les conditions spécifiques de recharge réelle observées dans chaque emplacement de piézomètre. Une analyse des écarts entre les valeurs de recharge potentielles et les valeurs de recharges réelles révèle des variations significatives. Ainsi la recharge moyenne par année tant pour la recharge réelle que pour celle potentielle calculée a permis d'établir le graphe de la variation du taux de recharge des deux types de recharges en fonction du temps (figure 16).

Dans le but d'avoir une idée de la recharge réelle dans l'ensemble des zones du bassin, en dehors des points où se situent les ouvrages, une interpolation des recharges réelles a été faite. Cela a permis de voir la distribution spatiale de cette recharge et l'identification des zones probables à une bonne ou mauvaise recharge réelle des eaux. La figure 15 montre cette répartition et d'après elle, la recharge de l'Est à l'Ouest varie de 6 mm/an à 32mm/an. Dans cette direction on note une croissance de la valeur des recharges. Les valeurs de recharge du Sud vers le Nord varient de 34 mm/an à 12 mm/an. Dans ce cas, on note une décroissance de la recharge réelle.

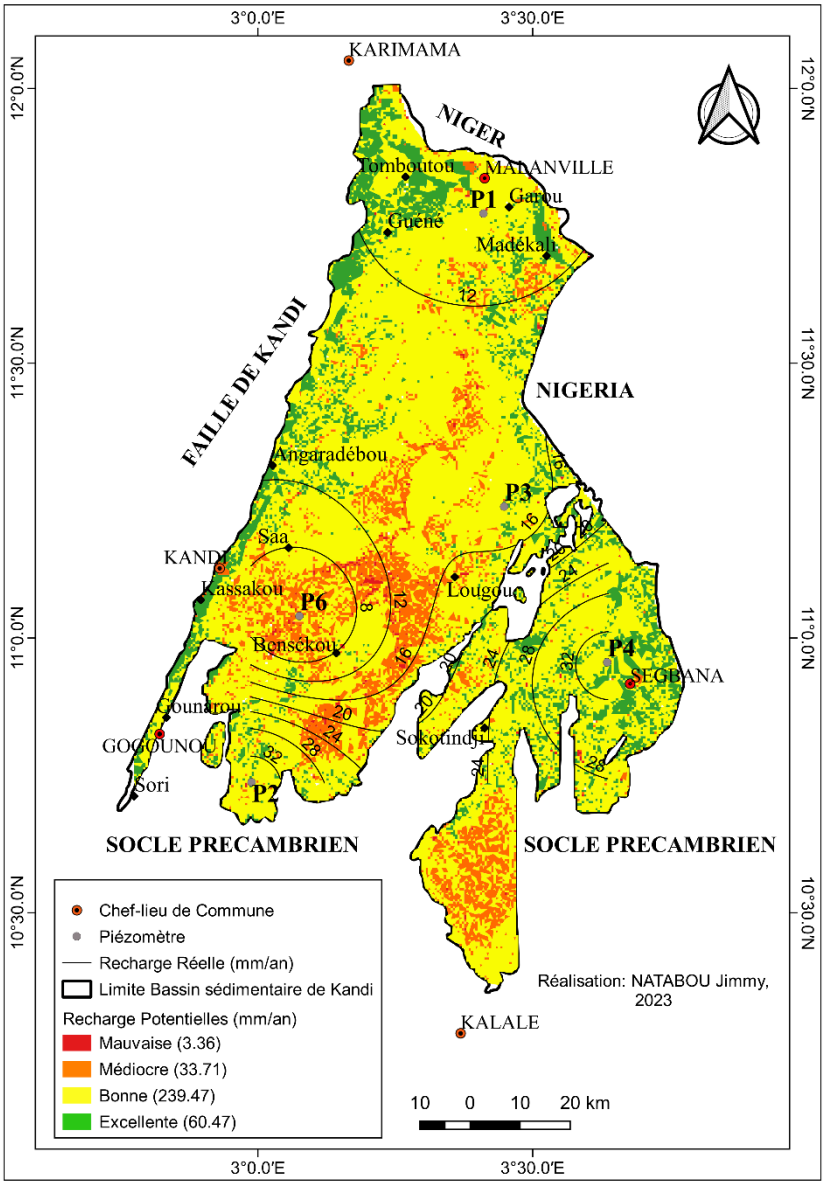


Figure 15 : Carte de superposition des zones potentielles de recharges avec les recharges potentielles et réelles

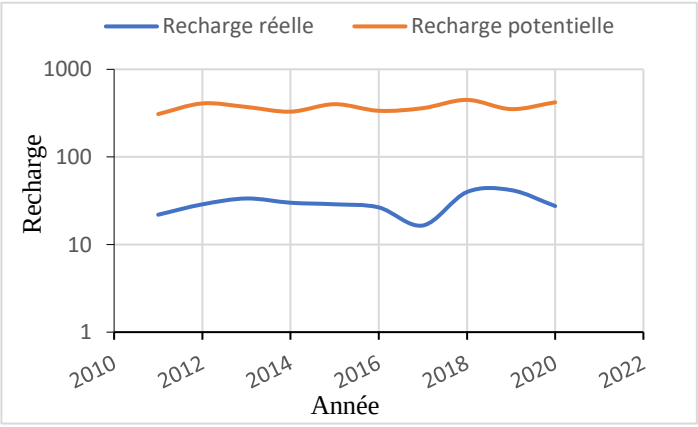


Figure 16 : Variation du taux de la recharge potentielle et réelle au cours du temps

Pour mieux approfondir et voir leur degré de relation, la corrélation de Pearson a été déterminé entre la recharge réelle et celle potentielle sur la période de 2011 à 2020 sur le BSK pour examiner la corrélation entre ces deux valeurs. La corrélation de Pearson, exprimée par un coefficient variant de -1 à 1, mesure la force et la direction de la relation linéaire entre deux ensembles de données. Un coefficient proche de 1 indique une corrélation positive parfaite, tandis qu'un coefficient proche de -1 indique une corrélation négative parfaite. Un coefficient proche de zéro indique une absence de corrélation linéaire entre les ensembles de données. Dans ce cas précis, le coefficient de corrélation de Pearson de 0,36 indique une corrélation positive modérée entre la recharge réelle et celle potentielle (figure17). Cette corrélation suggère que, globalement, lorsque la recharge potentielle augmente, la recharge réelle tend également à augmenter, et vice versa, bien que la relation ne soit pas très forte. Cependant, il est important de noter que la corrélation de Pearson mesure uniquement les relations linéaires entre les variables et ne tient pas compte des relations causales potentielles qui pourraient exister entre la recharge réelle et la recharge potentielle. D'autres facteurs hydrogéologiques et environnementaux tels que la géologie locale, le type de sols, les variations climatiques, l'utilisation des terres et les pratiques de gestion des eaux, peuvent également influencer la relation entre ces deux variables.

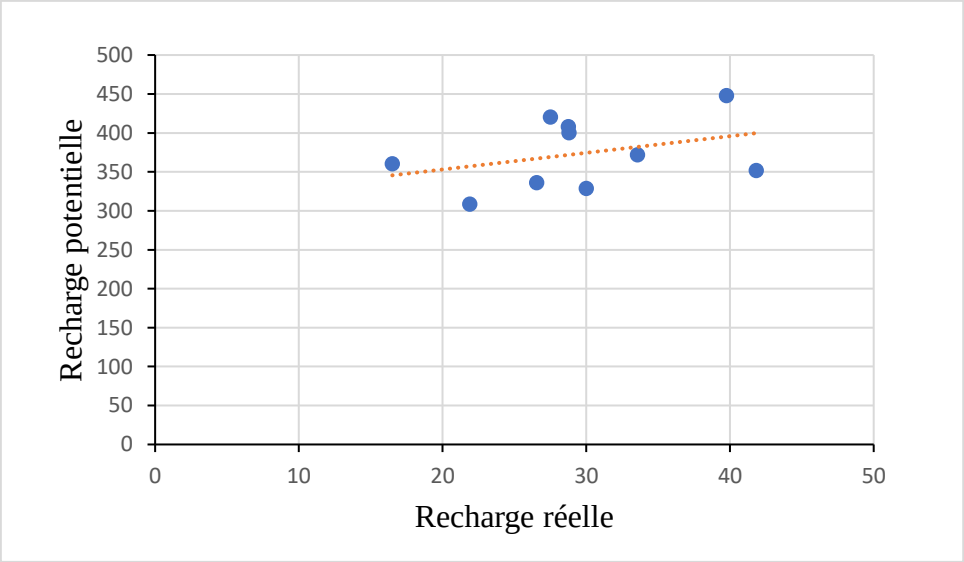


Figure 17 : Corrélation de Pearson entre la recharge réelle et celle potentielle

3.2 Discussion

3.2.1 Zones potentielles de recharge

L'approche méthodologique AHP combinée avec les SIG employée pour cartographier les zones potentielles de recharge des aquifères dans cette étude est une méthode qui, dans cette dernière décennie, a émergée dans la littérature pour évaluer la variabilité spatiale des zones en termes de leur capacité d'infiltration des eaux. Elle représente un outil qui, dans son application, facilite et complète les autres méthodes, permettant ainsi une gestion efficace et une prévision dans l'utilisation des ressources naturelles, notamment la gestion des ressources en eau.

La carte des zones potentielles révèle quatre zones de recharge (mauvaise, médiocre, bonne et excellente). Les zones de bonne recharge se trouvent largement reparties dans le Bassin Sédimentaire de Kandi. Ces zones comprennent principalement les formations du crétacé appelée grès de Kandi et de wèrè qui présentent une perméabilité à granulométrie favorable à l'infiltration Boukari (2007). Elles sont recouvertes par les des cultures et des jachères, caractérisées par une faible pente, qui selon Jourda et al. (2007), favorisent une bonne infiltration. Ainsi, la capacité de rétention du sol par la présence des racines dans les premiers horizons du sol, réduisant considérablement la vitesse d'écoulement de l'eau et la perméabilité des formation géologiques et une faible pente favorisent une infiltration efficace.

Les régions présentant un faible potentiel de recharge se concentrent principalement le long de la vallée du cours de Sota, où l'on observe une densité hydrographique élevée dans le bassin. Ces régions sont également présentes dans la partie méridionale, caractérisée par la présence des sols ferrugineux lessivés indurés en raison et au Nord-Est avec des sols avec minéraux brutes sur curasse. Ces zones à faible potentiel de recharge sont attribuables à des conditions favorables aux ruissellements en surface, au détriment de l'infiltration. L'étude a identifié, les paramètres significatifs pour déterminer la recharge incluent l'occupation des sols, le type de sols, et la pente, avec une importante prépondérante accordée à l'occupation du sol grâce la reclassification. Cependant, l'occupation du sol est elle-même influencée par le type de sol. Ce sont les mêmes résultats obtenus par Ake et al. (2018) au niveau de la nappe de Bonoua en Côte-ivoire.

L'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) présente certaines limites pour la détermination des zones potentielles de recharge des aquifères dans un bassin sédimentaire. Elle est une méthode sensible aux données d'entrées puisqu'elle nécessite des données précises et fiable sur les facteurs qui entre dans l'analyse. Dans cette étude, la topographie, la géologie, l'utilisation des terres, le type de sols, la densité de drainage. Des Paramètres jugés comme les plus significatifs dans la détermination des zones de recharge en milieux sédimentaire. Ce sont les

mêmes paramètres utilisés par Sekouba et al. (2014). Si l'un de ces facteurs se trouvait incorrects ou incomplets, cela fausserait les résultats. L'AHP repose sur des évaluations subjectives des critères et de pondérations attribuées à ces critères et celles-ci aux préférences individuelles de l'expert qui les attribuent. Ce qui peut influencer les résultats et introduirait ainsi un potentiel de biais dans l'analyse en surestimant ou sous-estimer la recharge. Elle peut être également limitée par la résolution spatiale des données disponibles, ce qui peut entrainer une simplification excessive de la complexité des processus hydrologiques à l'échelle locale. Selon Jourda et al. (2007), la fiabilité de l'interpolation des cartes des potentielles zones de recharge serait uniquement à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles. Il incombe une étude plus minutieuse de certains paramètres comme le type de sol et les formations géologiques. Ainsi une étude lithologique, sédimentologique et granulométrique de ces paramètres permettrait de mieux approfondir les résultats. Malgré ces différentes limites, l'AHP reste un outil utile pour évaluer les zones potentielles de recharges des aquifères dans les bassins sédimentaires lorsqu'elle est utilisée de manière judicieuse en tenant compte de ses limitations comme fut le cas dans la présente étude et dans plusieurs autres études, Djémin et al. (2022), et Ake et al. (2018) etc...

3.2.2 Estimation de la recharge par MFP

Les aquifères examinés dans le Bassin Sédimentaire de Kandi comprennent l'aquifère cambro-ordovicien ainsi que l'aquifère d'ordovicien terminal/silurien, lesquels présentent globalement des conditions de confinement partiel et de type à nappe libre le long des marges du bassin. Ces caractéristiques hydrauliques font des zones environnantes du bassin des zones de recharge pour lesdits aquifères. L'évaluation de la recharge réelle, effectuée au moyen de la méthode des fluctuations piézométriques, démontre une variabilité spatiale significative, avec des valeurs moyennes oscillant entre 4.13 mm/an à 32.26 mm/an. Ces valeurs de recharges obtenues sont inférieures à celles obtenues par Tchokponhoue (2019) et confirme celles obtenues par Agboton (2022). Cette différence de valeurs de recharges s'expliquerait par la période prise en compte par l'étude et la pluviométrie durant cette période. Les taux de recharge les plus élevées sont dans les directions Est et Sud tandis que les valeurs les plus faibles sont localisées sud-Est et au nord du bassin, ce constat étant corroboré par les études de Kpegli et al., (2015) et Gbewezoun (2017) qui identifient les bordures Sud, Ouest et le Nord-Est du bassin comme des zones de recharge importantes des nappes. En moyenne, le taux de recharge réelle sur l'ensemble du bassin représente 2.80% des précipitations, comparativement à une recharge potentielle estimée à 32.11% sur la même période. La méthode de cartographie de la recharge proposée par Haouchine et al. (2010) tend à surestimer la valeur de la recharge, cependant, elle reste valide

dans la présente étude. Cela est appuyé par la valeur de cohérence Rc obtenue dans cette étude, laquelle s'élève à 5% et demeure inférieur à la norme de 10% recommandée par Saaty (1980). Cette constatation suggère une bonne cohérence dans l'analyse des facteurs influençant la recharge, ainsi que dans la détermination spatialisée de la recharge potentielle. Il faut souligner que dans la présente étude la méthode de fluctuation piézométrique a nécessité l'utilisation de la porosité de drainage des aquifères pour le calcul des recharges réelles. Une porosité de 2% est utilisée dans l'ensemble du bassin. Ce qui constitue une limite dans l'application de cette méthode. Puisque dans le bassin les aquifères tels que le cambro-ordovicien, l'ordovicien terminal et l'aquifère alluvionnaire sont présents. Ces aquifères n'ayant pas les mêmes caractéristiques hydrodynamiques ne pourrait se comporter de la même manière face à la recharge. Mais pour manque de données de porosité de drainage pour chaque aquifère et en se basant sur la formation géologique des aquifères qu'est grès grossiers et fins, la même porosité a été utilisée.

3.2.3 Relation entre recharge potentielle et celle réelle

L'approche utilisée dans cette étude pour faire ressortir la relation qui existerait entre recharge réelle et celle potentielle dans le bassin sédimentaire de Kandi est basée sur une étude comparative dans l'espace et sur l'évolution des différentes valeurs de recharges tout en prenant en compte les facteurs qui impacteraient les recharges. Cette comparaison entre ces deux recharges revêt une importance fondamentale dans la gestion des ressources en eaux souterraine. Ainsi donc suite à l'obtention de la carte des zones potentielle de recharges, une projection des piézomètres avec les valeurs de recharges réelle sur cette carte à faire ressortir une tendance générale où les piézomètres situés dans les zones identifiées comme ayant un potentiel de recharge élevé présente effectivement des valeurs de recharges réelles plus élevées que ceux situées dans les zones de recharge potentielle plus faible. Cette observation corrobore la notion générale selon laquelle les zones de recharge les plus élevées tendent à être des zones actives de recharge des aquifères. Cependant, cette corrélation n'est pas uniforme parce que des conditions locales liées aux facteurs environnementaux et géologiques impactent.

Les résultats et discussions présentés dans ce mémoire mettent en lumières les nuances complexes de la recharge dans le bassin étudié. L'étude a permis de cartographier efficacement les zones potentielles de recharge des aquifères, mettant en lumière leur répartition spatiale variée. L'analyse comparative entre la recharge réelle et potentielle a soulignée des variations significatives, soulignant l'importance d'une approche intégrée pour la gestion durable des ressources en eau souterraine.

Conclusion et Perspectives

La répartition spatiale des potentielles zones de recharge des aquifères dans le bassin sédimentaire a été un succès grâce à la méthode AHP avec les SIG. Elle a permis par l'analyse de la carte, de faire ressortir quatre catégories de recharge variant de mauvaise à excellente avec 71% de zone de bonne et 18% d'excellente recharge. Ce qui confirme que l'ensemble du bassin est favorable à la recharge et de ce fait vulnérable à la pollution. L'évaluation de la recharge potentielle effectuée montre des valeurs de recharge oscillant de 3.6 mm/an à 229.47 mm/an pour les différentes zones tandis que la méthode de fluctuation piézométrique affiche des valeurs allant de 4.13 mm/an à 33.53 mm/an. L'analyse comparative entre la recharge potentielle et celle réelle met en évidences des variations importantes. Une étude de la relation entre les deux types recharge démontre une corrélation positive modérée entre la recharge réelle et celle potentielle. Il est important de souligné que ces résultats sont influencés par des facteurs tels que les formations géologiques, la topographie, la densité de drainage, les types de sols et d'occupation de sols. Cette compréhension des processus de recharge offre des perspectives cruciales pour la gestion durable des ressources en eau dans le bassin.

Perspectives

- Approfondir la compréhension des processus hydrologiques et géologiques contrôlant la recharge des aquifères dans les zones identifiées du Bassin, en se concentrant sur les interactions entre les précipitations, l'infiltration, la géologie locale et l'utilisation des terres en utilisant des modèles hydrologiques et hydrogéologiques avancées ou de techniques de télédétection.
- Intégrer des données hydrologiques, géologiques, géophysiques et climatiques pour une analyse plus holistique et multidisciplinaire des zones de recharge, permettant ainsi une meilleure compréhension des processus et des interactions complexes.
- Examiner la qualité de l'eau dans les zones de recharge identifiées afin de déterminer les éventuelles sources de contamination et d'évaluer les risques pour la sécurité hydrique et la santé publique.

Références Bibliographiques

Abdelhamid Haouchine, Boudoukha Abderrahmane, Fatima Zoha Haouchine, Rachid Nedjaï (2010). Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride : Cas de la plaine d'El Outaya, Biskra, Algérie. EUROJOURNALS, 2010, 45 (4) pp.1-13 halshs-00579048

Achidi J., Bourguet L., Elsaesser R., Legier A., Paulvé E. et Tribouillard N. (2012). Notice explicative de la carte hydrogéologique du Bénin : carte du bassin sédimentaire de Kandi à l'échelle 1/200 000. Rapport Technique, DG-Eau, Cotonou, Bénin, 45p…

Agboton L. J. S. (2022). Variabilité climatique des niveaux piézométriques des systèmes aquifères du bassin sédimentaire de Kandi.

Ake, G. F., Kouame, K. J., Koffi, A. & Jourda, J. P. (2018). Cartographie des zones potentielles de recharges de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la côte d'ivoire). Revue des sciences de l'eau/ Journal of water science, 31(2) ; 129-144.

Ali, I. A., & Konaté, M. (2020). Identification et cartographie des zones potentielles de recharge des eaux dans la région de Dosso (Sud-Ouest Niger) par la méthode de l'analyse multicritère. Europeen scientific journal, ESJ, 16 (18). 217.

Alidou S. (1983). Etude géologique du basin paléo-mésozoïque de Kandi (Nord-Est du Bénin. Afrique de l'ouest). Thèse Doct d'Etat, Univ. Nat. du Bénin et de l'Université de Dijon, France. 328p

Alidou S. et Lang J. (1983). Etude sédimentologique, paléogéographique et stratigraphique du bassin intracratonique paléozoïque-mésozoïque de Kandi (Nord-Est Bénin- Afrique de l'Ouest). Geol. Rundsh, Vol. 72 No. 1, pp. 191-205.

Alidou S., Lang J. et Lemoigne Y. (1979). Bois de structure gymnospermien provenant des formations du bassin de Kandi ("Continental Intercalaire") dans le Nord-Est du Bénin. 7e Réu. Ann. Sci de la Terre, Lyon p. 4, (diff. S.G.F).

Bosch K., Abou A., Heckmann M., et Zinsou S. (2019). Rapport de suivi des eaux souterraines dans le bassin du fleuve Niger. Projet AGES - Appui à l' Autorité du Bassin du Fleuve Niger pour la Gestion des Eaux Souterraines. Niamey, septembre 2019.

Boukari M., (2007). Hydrogéologie de la République du Bénin (Afrique de l'Ouest). Africa Geoscience Review Vol. 14 No. 3, pp. 303-328.

Chabot-Grégoire, J. (2022). Recharge des eaux souterraines dans la région des laurentides et de la MRC Les Moulins. Mémoire de la maîtrise en science de la terre, Université du Québec à Montréal, 165p.

Chantry G. (2003). Estimation des taux de recharge de nappe en zone semi-aride par la méthode du bilan des chlorures (MBC) : Impact de la variabilité spatio-temporelle des teneurs en Cl dans les précipitations et application à deux grands bassins sédimentaires au sahel. Diplôme d'étude supérieurs en gestion intégrée des ressources hydriques, Université d'Avignon, 57p.

Diongue D. M. L. (2018). Estimation des taux de recharge à partir d'un modèle de fluctuation piézométrique dans le bassin urbanisé de Thiaroge. Mémoire de master en géosciences, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 97p.

Djémin E. J., Anongba B.V. R. B., N'guessan Y. G., Soro S., I., Adja M. G. and Jourda J. P. (2022). Contribution de la télédétection et d'un SIG à la cartographie de la dynamique spatio-temporelle des zones potentielles de recharge des nappes du District d'Abidjan (Sud-Est de la Côte Ivoire). European Journal of Scientific Research, ISSN 1540-216X/ 1450-202X Vol. 161 No 1 March, 2022, pp.63-88.

Edoukou J.D., J.K. Kouame, K.S. Deh, A.T. Abinan Et J.P. Jourda (2016). Contribution of the sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessing using the Drastic method: application to groundwater in Dabou region (Southern of Côte d'Ivoire). J. Environ. Prot., 7, 129-143.

Garouni E.A. et A. Merzouk (2006). Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hachef (Maroc) par télédétection et SIG. Rev. Sci. Eau, 19, 1-10.

Gbewezoun H. G. V., (2017). Caractérisation structurale et hydrodynamique de l'aquifère superficiel du bassin sédimentaire de Kandi (Nord-Est du Bénin). Mémoire de master en hydrogéologie ; Université d'Abomey-Calavi, 72p.

Gosselin J-S. (2016). Estimation de la recharge à partir des séries temporelles de la température du sol, des niveaux d'eau dans les puits et de données météorologiques : développement méthodologique et évaluation de l'incertitude. Thèse pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor, Ph.D. en sciences de la terre, 173p.

Huet, M. (2015). Comparaison des méthodes d'estimation de la recharge des aquifères : Exemple de la région Charlevoix-Haute-Côte-Nord. Mémoire de maitrise en science de la terre, l'université de Québec à Chicoutimi, 93p.

Konaté M., Guiraud M., Alidou S., Clermonté J., Drouet J. P. & Lang J. (1994). Structuration et dynamique sédimentaire du bassin paléozoïque en demi-graben de Kandi (Bénin-Niger). CR. Acad. Sci.Paris, t. 318 série II, P. 535-542.

Konaté M. (1996). Evolution tecto-sédimentaire du bassin paléozoïque de Kandi (Nord Bénin, Sud Niger). Thèse de doctorat, Université Nancy I, Université Bourgogne, 302p.

Koudjeka, K. Hervé ; Kodja, D. Japhet ; Vissin, W. (2020). Expédit. Evaluation de la recharge des eaux souterraines profonde de l'aquifère du paléocène supérieur dans le bassin du Mono-Couffo au Bénin. International journal of progressive sciences and technologies, [S, I.], v.20, n. 2, p. 145-155, may. ISSN 2509-01119.

Kpegli K. A. K., Alassane A., Dovonon F. C., Yoxi Y. V., Toro-Spetia L. E. (2015). Geochemical processes in Kandi bassin Benin, West Africa: A combined hydrochesmistry and stable isotopes approach. Quartenary International, vol. 369, pp. 99-109.

Moussa Konaté, Jacques Lang, Michel Guiraud, Mousa Yahaya, Michaël Denis (2006). Un bassin extensif formé pendant la fonte de la calotte glaciaire hirnantienne : le bassin ordovico-silurien de Kandi (Nord Bénin, Sud Niger). Africa Geoscience Review, 2006, Vol. 13 (No. 2), pp.157-183.hal-00192922

Ouassil Ait El Mekki (2017). Spatialisation du potentiel de recharge diffuse d'un aquifère libre sous climat semi-aride par techniques géospatiales et hydrochimiques : cas de l'aquifère du haouz (marrakech, maroc). Hydrologie. Université Cadi Ayyad Faculté Des Sciences Semlalia Marrakech (Maroc), 2017. Français. NNT : . tel-01725794

Ritchi, H. et Roser, M. (2017). Emissions de co2 et de gaz à effet de serre. Notre monde dans les données. Https://ourworlddindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-émission.

Saaty, T.L., 1980. The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority setting, Resource allocation, McGraw-Hill, New York, 19 p.

*Scanlon B.R., R.W. Healy et P.G. Cook (2002**)**. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeol. J., 10, 18-39.*

Sekouba O., K.K. Fernand, B.S. Mahaman, E.A. Gabriel, M.A. Germain, K.K. Alexis Et T. Rene (2014). Estimation et validation de la profondeur des nappes du bassin du N'zo, en Côte d'Ivoire, par le modèle WTR. Physio-Géo, 8, 1-25.

Séguis, L., Kamagaté, B., Favreau, G., Descloitres, M., Seidel, J.L., et al. (2011). Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone:The Donga basin (Benin, West Africa): inter-annual variability of water budget. Journal of Hydrology, 402:1-13.

Shiklomanov IA & Rodda JC (2003). World Water Resources at the Beginning of the Twenty First Century. International Hydrology Series. Cambridge University Press, Cambridge, United kingdom.

Tchokponhoue R. (Quantification de la recharge par la méthode de fluctuation piézométrique dans le bassin sédimentaire Kandi)

UNESCO-WWAP (2022). Eaux souterraines, rendre l'invisible visible. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, publié en 2022 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture,7, Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France.

Tables des matières

Dédicaces II

Remerciements III

Résumé IV

Abstract V

Liste des sigles et acronymes VI

Liste des tableaux VII

Liste des figures VIII

Sommaire IX

Introduction Générale 1

1. Contexte 1

2. Problématique et question de recherche 1

3. Objectifs et Hypothèses de recherche 2

4. Clarification des concepts 3

5. Revue de littérature 3

5.1. Les méthodes de cartographie des potentiels zones de recharges d'un aquifère 3

5.2 Les méthodes d'évaluation de la recharge d'une nappe 4

6. Structure du document 5

Chapitre I : Milieu d'étude 6

1.1 Localisation de la zone d'étude 7

1.2 Géomorphologie et géologie 8

1.2.1 Géomorphologie 8

1.2.2 Géologie 10

1.3 Hydrogéologie 12

1.4 Végétation 14

1.5 Climat et hydrographie 14

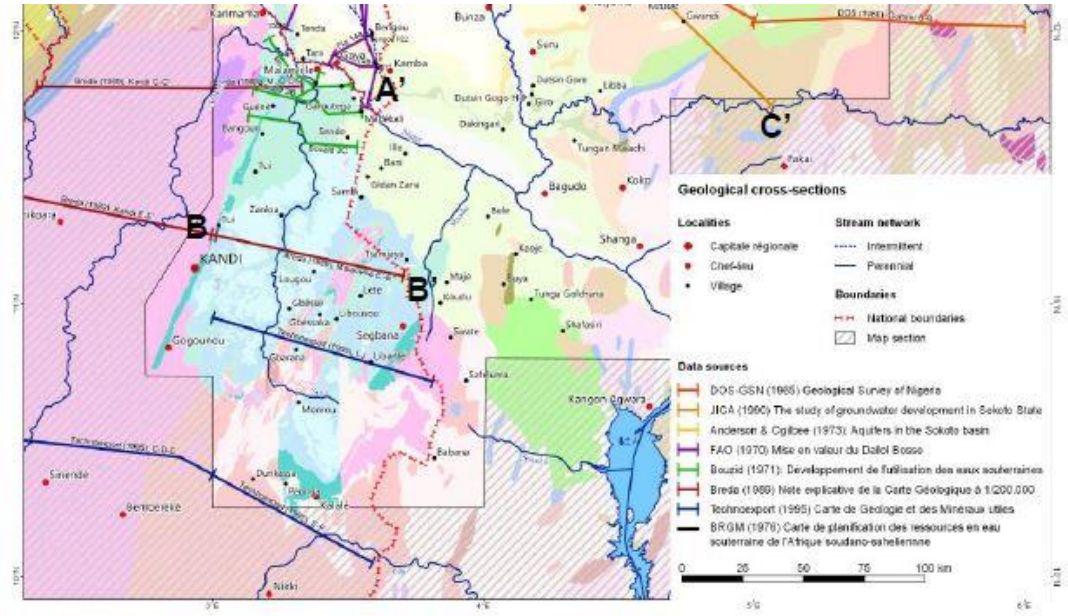
1.6 Quelques aspects socio-économiques 16

Chapitre II : Approche méthodologique 18
2.1 Données 19
2.1.1 Données Planimétriques 19
2.1.2 Données climatiques et piézométriques 19
2.2 Matériel utilisé 20
2.3 Méthodes 20
2.3.1 Recherches documentaires 20
2.3.2 Cartographie des potentielles zones de recharges 20
2.3.2.1 Identification des paramètres influençant la recharge 20
2.3.2.2 La cartographie des paramètres et reclassification 21
2.3.2.2.1 Etablissement de la carte du type de sols 21
2.3.2.2.2 Etablissement de la carte d'occupation du sol 22
2.3.2.2.3 Etablissement de la carte de pente de terrain 23
2.3.2.2.4 Etablissement de la carte densité de drainage 24
2.3.2.2.5 Etablissement de la carte des formations géologiques 25
2.3.2.3 Reclassification des paramètres 26
2.3.2.4 Détermination des poids des paramètres par la méthode d'analyse multicritère (AHP) 28
2.3.2.5 Combinaison des cartes thématiques pour la cartographie des potentielles zones de recharge 31
2.3.3 Evaluation de la recharge potentielle dans les différentes zones cartographiées 31
2.3.4 Evaluation de la recharge réelle par la méthode de fluctuation piézométrique (MFP) 32
Chapitre III : Résultats et discussion 34
3.1 Résultats 35
3.1.1 Carte des potentielles zones de la recharge 35
3.1.2 Evaluation de la recharge potentielle 37
3.1.3 Evaluation de la recharge réelle par la méthode de fluctuation piézométrique 38

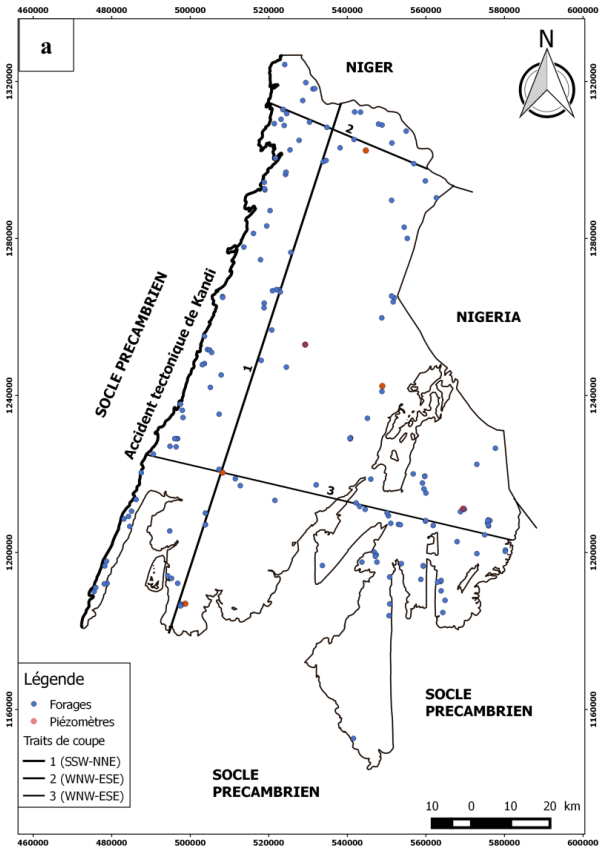
3.1.3.1 Relation entre la recharge potentielle et celle réelle 39
3.2 Discussion 42
3.2.1 Zones potentielles de recharge 42
3.2.2 Estimation de la recharge par MFP 43
3.2.3 Relation entre recharge potentielle et celle réelle 44
Conclusion et Perspectives 45
Références Bibliographiques 46
Tables des matières 50
Annexes 53

Annexes

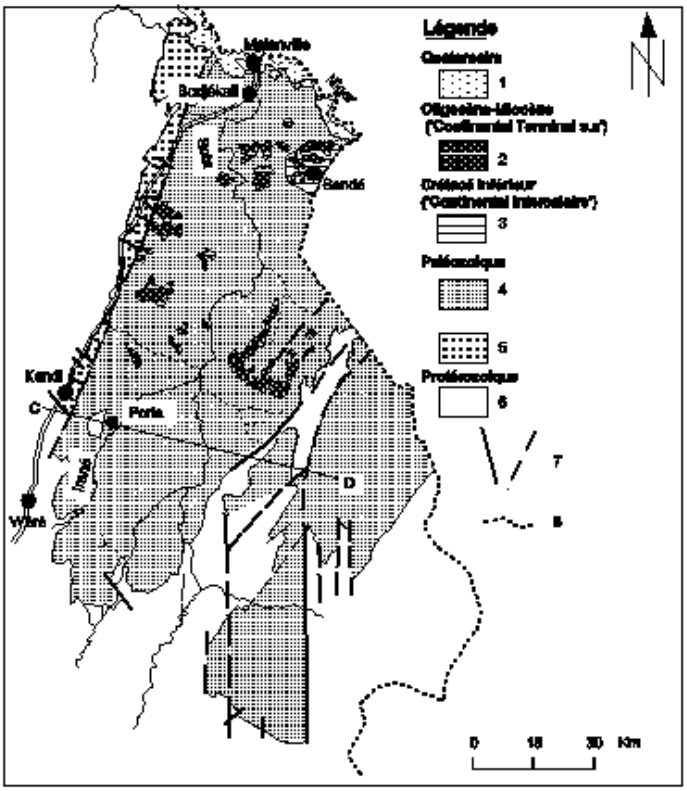
Annexe 1 : Carte montrant le positionnement de trait de coupe BB' au niveau du bassin sédimentaire de Kandi (BGR & ABN, 2019).



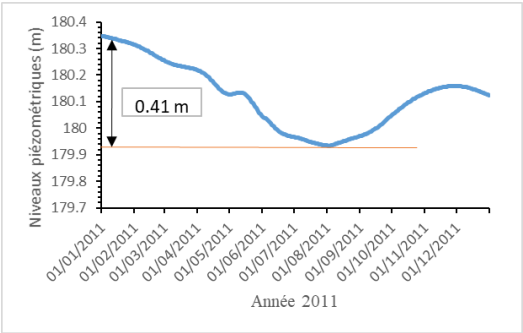
Annexe 2 : Carte montrant le positionnement de trait de coupe (1) de direction SSW-NNE (Gbewezoun, 2017).



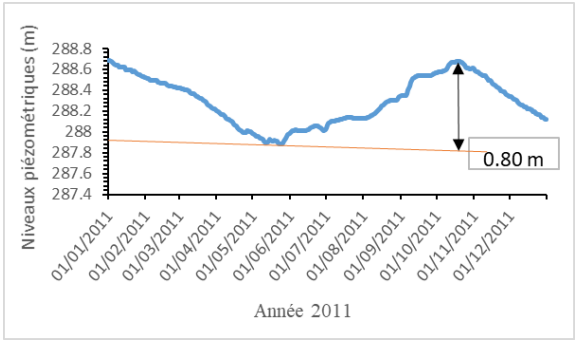
Annexe 3 : Carte montrant le positionnement de trait de coupe de direction WE de la coupe géologique interprétative du Bassin Kandi (Boukari 2007, d'après Konaté 1996).



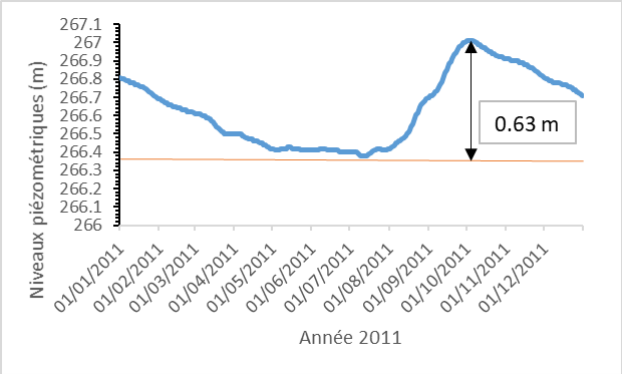
Annexe 4 : Détermination de l'amplitude des variations piézométrique de l'année 2011du piézomètre P1 (Malanville)



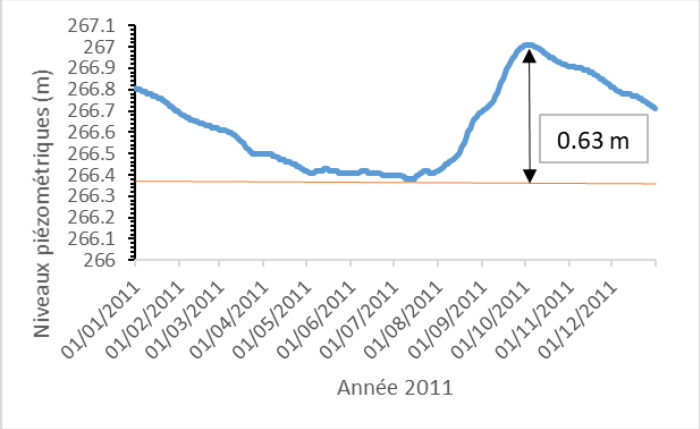
Annexe 5 : Détermination de l'amplitude des variations piézométrique de l'année 2011du piézomètre P2 (Gogounou)



Annexe 6 : Détermination de l'amplitude des variations piézométrique de l'année 2011du piézomètre P3 (Segbana)



Annexe 7 : Détermination de l'amplitude des variations piézométrique de l'année 2011du piézomètre P4 (Segbana)



Annexe 8 : Détermination de l'amplitude des variations piézométrique de l'année 2011du piézomètre P6 (Segbana)

