REPUBLIQUE DU BENIN

=======

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU

=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation

Pour l'obtention du diplôme de

Licence Professionnelle en Hydrologie

OPTION : GEOHYDROLOGIE

==========

THEME :

CARACTERISATION DU RESEAU DE FRACTURE ET DES ZONES DE RECHARGE DES SYSTEMES AQUIFERES DANS LA PENEPLAINE CRISTALLINE DU BENIN

Réalisé par :

Jean De Dieu D. DENAKPO

Maître de Mémoire :

Dr Ringo Fernand AVAHOUNLIN

Maître assistant des universités de CAMES

Enseignant chercheur à l'UNSTIM

Maître de stage :

Dr Lucie KOUDERIN

Dr en hydrologie et gestion des ressources en eau option Agroclimatologie et Sécurité alimentaire

ANNEE ACADEMIQUE : 2022-2023

Dédicace

A mes parents pour leurs conseils continuels et leurs soutiens indéfectibles. Recevez, par ce travail, le témoignage de ma filiale reconnaissance. Puisse Dieu vous bénir.

Remerciements

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

- Au Docteur Ringo Fernand AVAHOUNLIN, maître assistant des universités CAMES, enseignant chercheur à l'UNSTIM pour son précieux encadrement, ses conseils et sa disponibilité ;
- Au Docteur KOUDERIN Lucie la chargée des stages au cabinet Hydrogéoclim Bénin pour nous avoir accueilli dans sa structure pour nos stages et pour sa bonne humeur et ses conseils avisés ;
- Au Professeur Abdoukarim ALASSANE, maître de conférences des universités de CAMES, enseignant chercheur à l'Institut National de l'Eau (INE) ;
- A tout le personnel de Hydrogéoclim Bénin pour la bonne ambiance pendant le temps passé à leur côté et pour leur conseil et leur contribution de près ou de loin à mon travail en occurrence Renaud MITCHOZOUNOU et Gilbert DANHOSSOU ;
- À nos aînés de la formation Professionnelle en Hydrologie en occurrence Etienne ZANOU, Soumeyath DAOUDA, Rodolphe Tchokponhoué, Bunel ICOUTCHIKA et Jimmy NATABOU, merci pour les encouragements, aides et conseils ;
- Mes camarades de promotion pour l'ambiance, la collaboration, l'entraide et les bons moments passés ensemble en particulier Fabrice HOUEDOU, Rodrigue HOUNDEGLA ;
- Au Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE) du département d'Hydrologie et Gestion des Ressources en Eau ;
- Au Professeur E. Flavien DOVONOU, Chef de département d'hydrologie et de gestion des ressources en eau (HGRE) ;
- Tous les responsables du Département d'Hydrologie et de Gestion des Ressources en Eau de l'Institut National de l'Eau (INE) ;
- À tout le corps professoral de l'institut national de l'eau ;

- À tous les Honorables membres du Jury qui apprécieront ce modeste travail ; merci pour le temps que vous sacrifierez au détriment de vos occupations pour l'analyse et l'amélioration de ce document ;
- À tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce document, qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

Listes des sigles et acronymes

ACP	:	Analyse en Composante Principale
AEP	:	Approvisionnement en Eau Potable
AEV	:	Adduction d'Eau Villageoise
ANC	:	Association National des communes
DG-Eau	:	Direction Générale de l'Eau
ESSOR	:	Etude Service Science Ouvrage Recherche
IGN	:	Institut Géographique National
INE	:	Institut National de l'Eau
INSAE	:	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
LANDSAT	:	Land Satellite
LHA	:	Laboratoire d'Hydrologie Appliquée
MNT	:	Modèles Numériques de Terrain
OLI	:	Operational Land Imager
PDC	:	Plan de Développement Communal
PEA	:	Poste d'Eau Autonome
RGPH	:	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
SNAEP	:	Stratégie Nationale d'Approvisionnement en Eau Potable
SONEB	:	Société Nationale des Eaux du Bénin
SRTM	:	Shuttle Radar Topography Mission
TIRS	:	Thermal Infrared Sensor
USGS	:	United States Geological Survery

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique 8

Figure 2 : Carte pédologique de la pénéplaine cristalline 11

Figure 3 : Carte du réseau hydrographique de la pénéplaine cristalline 14

Figure 4 : Profil de modèle conceptuel hydrogéologique de la zone de socle en milieu tropical : exemple du Bénin (ALLE ,2018) 15

Figure 5 : Carte géologique de la pénéplaine 17

Figure 6 : Carte de l'ACP 19

Figure 7 : Filtre directionnel de SOBEL (E-O et NE-SO) 19

Figure 8 : Rosace des linéaments et des fractures révélées dans la pénéplaine cristalline 28

Figure 9 : Carte des fractures 30

Figure 10 : Les cartes thématiques de trois paramètres (Pente, Densité de drainage et Densité de fracture). 31

Figure 11 : Les cartes thématiques de trois paramètres (lithologie, type de sol et occupation du sol) 32

Figure 12 : Carte des zones potentielles de recharge de la pénéplaine cristalline 33

Figure 13 : Carte des zones potentielles de recharge de la pénéplaine cristalline 33

Figure 14 : Pourcentages des localités desservies par PEA ou AEV en 2017 C

Figure 15 : Carte des fractures révélées de la pénéplaine cristalline (Institut Géographique National) D

Figure 16 : Relation entre débit et nature lithologique des roches ..... F

Figure 17 : Schéma synthétique montrant les relations d'interdépendance des paramètres influençant l'infiltration (Shaban et al. 2006, modifié) ..... G

Figure 18 : Carte géologique du socle s.s. du Bénin ..... H

Figure 19 : Carte des linéaments I

Liste des tableaux

Tableau I : Classification et Standardisation des paramètres..... 23

Tableau II : Expression quantitative et numérique de l'importance relative d'une paire de facteurs (El Morjani 2003) 25

Tableau III : Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des paramètres contrôlants la recharge des aquifères 25

Tableau IV : les caractéristiques (longueurs et densités) des linéaments suivant les différentes directions. 29

Tableau V : Résumé statistique des critères d'évaluation des indicateurs. 34

Tableau VI : Besoin en eau et taux de desserte ..... B

Tableau VII : Répartition des points d'eau fonctionnels ..... B

Tableau VIII : Récapitulatif des paramètres et leur influence ..... E

Tableau IX : Classification des débits (selon Lasm) ..... G

Tableau X : Caractéristiques hydrogéologiques des types d'occupation du sol ..... J

Table des matières

Dédicace ii
Remerciements iii
Listes des sigles et acronymes v
Liste des figures vi
Résumé x
Abstract xi
INTRODUCTION 1
CHAPITRE 1 : CADRE THEORIQUE ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE 3
1-1-CADRE THEORIQUE 3
1-1-1-Problématique 3
1-1-2-Clarification conceptuelle 5
1-1-3-Revue de littérature 5
1.2. PRESANTATION DE LA ZONE D'ETUDE 7
1.2.1. Situation géographique 7
1.2.2 Géomorphologie 8
1.2.3. Climat 9
1.2.4. Sols 10
1.2.5. Végétation 11
1.2.6 Hydrographie 12
1.2.7 Hydrogéologie 15
1.2.8 Géologie 16
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES 18
2-1. Nature et source des données utilisées 18
2-2. Méthode relative à la cartographie des linéaments 18
2-3. Méthode relative à l'identification des zones de recharge 20
2-4. Identification et description des paramètres de contrôle de la recharge des aquifères 20
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS 28
3.1 Caractérisation du réseau de linéament à l'échelle de la pénéplaine cristalline du Bénin 28
3.2 Identification des zones de potentiel recharge en eau à l'échelle de la pénéplaine cristalline 31
3.3 Validation des cartes thématiques 34

3.4 Discussions 36
CONCLUSION 38
Bibliographie 40
ANNEXE ..... A

Résumé

La présente étude, menée dans la pénéplaine cristalline du Bénin, a pour objectif d'identifier les zones potentielles de recharge des systèmes aquifères. Pour atteindre ce but, il est capital de caractériser le réseau de fracture de cette zone. Après le traitement des images satellitaires, le réseau linéamentaire obtenu a été validé en fracture par les travaux antérieurs. Ces fractures identifiées à l'échelle du secteur sont au nombre de 8 127, de longueurs correspondant à $2{,}9.10^{-2}$-3,5 Km et de densités égale représentant $3{,}87.10^{-7}$ à $3{,}05.10^{-4}$ Km/Km^2. La direction possédant un grand nombre de fractures (1918 soit 23,6%) est la direction ENE-OSO ayant des longueurs qui varient de 0,043 à 1,67 Km et des densités qui varient de $4{,}07.10^{-7}$ à $1{,}76.10^{-4}$ Km/Km^2 et la direction possédant un petit nombre de fractures (82 soit 1,01%) est la direction OSO-ENE ayant des longueurs qui varient entre 0,32 à 3,24 Km et des densités qui varient de $4{,}62.10^{-6}$ à $1{,}27.10^{-4}$ Km/Km^2.

La méthode relative à l'indentification des zones potentielles de recharge consiste en une analyse multicritère. Il faut d'abord étudier séparément et apprécier chaque paramètre selon leur rôle dans l'infiltration puis établir une carte thématique pour chaque paramètre. La compilation des cartes thématiques donne la carte de recharge en eau. Cette carte montre que les zones potentielles de mauvaise et médiocre recharge représentent respectivement 9,17% et 39,81% de la superficie globale de la zone d'étude. Ces zones ont de faible aptitude à l'infiltration. Au contraire, les zones de potentielles d'excellente recharge se sont localisées majoritairement au centre-nord et au sud de la zone. Ces endroits occupent 7,56% de la superficie totale et caractérisent les endroits de la zone d'étude possédant un taux élevé d'infiltration. Elles désignent également des zones de transmission rapide des contaminants. Cette carte a été validée par calcul d'incertitude. Le calcul d'incertitude a donné de plus ou moins 0,37 avec un niveau de confiance de 95% attestant la fiabilité de la carte de recharge en eau de la pénéplaine cristalline.

Mots clés : Réseau linéamentaire, zone de recharge, système aquifère, pénéplaine cristalline

Abstract

The aim of this study, carried out in the crystalline peneplain of Benin, is to identify potential recharge zones for aquifer systems. To achieve this goal, it is essential to characterize the lineament network in this area. After processing satellite images, the lineament network obtained was validated by previous work. The lineament network abounds in fractures. The crystalline peneplain has 31,350 lineaments of different lengths ($1.2.10^{-2}$-18.75 Km) and densities ($5.57.10^{-7}$ to $4.67.10^{-4}$ Km/Km^2). The direction with the most lineaments (7208 or 22.99%) is the ENE-WNW direction, with lengths ranging from 0.022 to 6.74 Km and densities from $5.57.10^{-7}$ to $1.68.10^{-4}$ Km/Km^2, and the direction with the fewest lineaments (255 or 0.81%) is the WNW-ESE direction, with lengths ranging from 0.012 to 6.78 Km and densities from $3.11.10^{-7}$ to $1.69.10^{-4}$ Km/Km^2.

The method used to identify potential recharge zones involves a multi-criteria analysis. First, each parameter is studied separately and assessed according to its role in infiltration, then a thematic map is drawn up for each parameter. Compilation of the thematic maps produces the water recharge map. This map shows that potential areas of poor and mediocre recharge represent 9.17% and 39.81% respectively of the overall surface area of the study zone. These areas have a low infiltration altitude. On the other hand, potential areas of excellent recharge are located mainly in the north-central and southern parts of the area. These areas cover 7.56% of the total surface area and characterize those parts of the study area with a high infiltration rate. They also indicate rapid transmission of contaminants. This map was validated by uncertainty calculation. The error calculation gave an uncertainty of plus or minus 0.37 with a 95% confidence level, attesting to the reliability of the water recharge map of the crystalline peneplain.

Keywords: lineament network, recharge zones, aquifer systems, crystalline peneplain.

INTRODUCTION

La gestion durable et la pérennité des ressources en eau nécessitent la connaissance et l'évaluation de trois processus fondamentaux dans un hydrosystème : la recharge, les écoulements et la décharge (Sékouba et al., 2017).

Dans certains pays, la quasi-totalité de l'eau potable se trouve en milieu de socle cristallin où la perméabilité résulte d'une part d'un réseau de fissures dans un horizon particulier du profil d'altération, d'autre part d'un réseau de fractures d'origine tectonique (Yao et al., 2012). La quantité de cette eau dépend nécessairement de la façon dont les systèmes aquifères du milieu se rechargent. Mais l'exploitation de l'eau souterraine est confrontée à des difficultés surtout dans les zones dites « de socle » où la géologie est constituée de roches cristallines et cristallophylliennes. La difficulté à capter l'eau souterraine s'aggrave à cause du caractère discontinu des aquifères de ce type de géologie.

Au Bénin, les roches du socle représentent 80% de la superficie (Alle, 2020) et la source principale d'approvisionnement en eau potable (AEP) est l'eau souterraine.

En effet, l'exploitation des eaux souterraines dans ces formations de socle se fait au moyen de deux types de réservoirs. Il s'agit des aquifères d'altérites plus superficiels et les aquifères du socle fracturé sous-jacents aux aquifères d'altérites. Mais l'existence d'un aquifère à un endroit n'est pas une garantie pour la disponibilité de l'eau en quantité suffisante. Les faibles débits d'exploitation souvent observés et le taux d'échec élevé lors de l'implantation des ouvrages dans ces aquifères du socle posent un véritable problème faute d'une meilleure connaissance des caractéristiques hydrogéologiques et de la potentialité en eau de ces milieux. Une des solutions à ces nombreux problèmes se trouve dans une meilleure connaissance des aquifères de fractures. L'une des approches fondamentales de nos jours dans l'étude de la fracturation est la télédétection (Akokponhoué et al.,2018). La télédétection constitue un bon outil dans l'étude des discontinuités tectoniques même les plus discrètes pour la prospection hydrogéologique et la recherche des eaux souterraines en milieux fracturés (Yao et al., 2011 ; Ouattara 2016 ; Akokponhoué et al., 2019).

La disponibilité des eaux souterraines dans une zone est régie par plusieurs facteurs tels que : la lithologie, le type de sol, la pente, le drainage, la fracture, l'utilisation et la couverture des terres et les relations entre ces facteurs. Plusieurs chercheurs (Kanohin al., 2012 ; Youan Ta al., 2015 ; Yao al., 2016 ; Koffi al., 2016 ; Sékouba al., 2017 ; Aké al., 2018 ; Djémin al., 2022) ont

utilisé les SIG et la télédétection pour délimiter les zones potentielles de recharge en eau. Cette rédaction débute par une introduction suivie de trois (3) chapitres et s'est achevée par une conclusion. Le premier chapitre aborde le cadre théorique et la présentation de la zone d'étude. Le deuxième chapitre décrit le matériel et les méthodes utilisés pour conduire l'étude. Ensuite le troisième chapitre fait l'analyse des résultats obtenus et les discussions.

CHAPITRE 1 : CADRE THEORIQUE ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1-1-CADRE THEORIQUE

1-1-1-Problématique

Au Bénin les eaux souterraines représentent 95 % des eaux exploitées pour l'AEP, et l'eau de surface 5 %. En zone de socle, faute de débits suffisants des forages dans certaines régions, 4 communes (villes) sur les 69 communes couvertes par la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB), sont alimentées par les eaux de surface à savoir : Parakou, Savalou (entièrement alimentées par les eaux de surface), Djougou et Natitingou (partiellement alimentées par les eaux de surface), ce qui augmente considérablement le coût de l'AEP en zone de socle (SONEB, 2014).

En effet, pour l'AEP en zone de socle à partir des eaux souterraines, deux types d'ouvrages sont généralement réalisés : le forage équipé de Pompe à Motricité Humaine (0,7 m^3/h de débit minimum, il est réalisé pour les villages et agglomérations d'un minimum de 250 hab.) ; le forage à gros débit équipé d'une pompe électrique pour lequel le débit minimum recherché est de 3,6 m^3 /h à la foration (il est réalisé pour l'alimentation d'un réseau d'Adduction d'Eau Villageoise-AEV pour une population minimum de 2.000 hab.). Tous les forages qui produisent un débit mesuré inférieur à 0,7 m^3/h sont considérés comme négatifs et donc abandonnés (Ministre de l'Energie de l'Eau et des Mines -République du Benin, 2017).

Le constat actuel est que la population est loin d'être approvisionnée. En effet, on note une desserte en eau potable limitée, peu adaptée et inégale (le pourcentage de localité desservie du socle par le Poste d'Eau Autonome (PEA) ou AEV en 2017 est compris entre 0 à 15.3% qui est inférieur au pourcentage de localité desservie par la population rurale (compris entre 15,3% à 24,3%) dans le bassin sédimentaire côtier (SAEPMR)). L'accroissement de la population entraine une augmentation de la demande en eau. Selon le document de Politique Nationale de l'Eau (MMEH, 2005), l'augmentation de la population réduit de manière drastique la quantité d'eau disponible par habitant tout en supposant cette ressource constante. En 1955 par exemple, la population du Bénin s'élevait à 2 111 000 habitants et la disponibilité en ressources en eau par habitant et par an était de 12 622 m^3. En 1990, cette population était de 4 622 000 habitants et la disponibilité en ressources en eau par habitant et par an n'était plus que 5 825 m^3 (MMEH, 2005). Dans l'hypothèse de base, la population du Bénin pourrait atteindre 11 337 000 habitants

en 2025, ce qui réduirait la quantité d'eau disponible par habitant et par an à 2 293 m^3. Dans l'hypothèse haute, ces chiffres sont respectivement de 13 243 000 habitants et 1 983 m^3, sans tenir compte qu'en réalité les ressources en eau totales du Bénin ne restent pas constantes. Elles diminuent pendant que la population augmente, du fait des aléas climatiques et de l'impact négatif des activités anthropiques. Ces derniers niveaux de disponibilité placeraient le Bénin dans la catégorie des pays à pénurie grave, voire catastrophique, d'eau (Boukari, 2007).

La réalisation d'un forage en zone de socle, exige au préalable une étude d'implantation pour définir le point où le forage sera réalisé à cause du caractère discontinu des aquifères de socle qui ne garantit pas la réussite d'un forage n'importe où. L'implantation d'un forage au Bénin et en général dans le monde, est réalisée en appliquant des méthodes de prospections géophysiques après une étude géomatique, hydrogéologique (analyse photo aérienne) et une reconnaissance de terrain.

A partir de la base de données des forages de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau) du Bénin (près de 8.000 forages renseignés jusqu'en 2015), les analyses statistiques montrent que : *(1)* le taux d'échec des forages (forages négatifs) en zone de socle est de 40 % avec 34 % représentant des forages à débits nuls (forages secs), et *(2)* les forages à gros débits ne représentent que 17 % des forages positifs (Vouillamoz *et al*., 2014).

La pénéplaine cristalline est confrontée à ces différents problèmes d'AEP et c'est dans l'optique de pallier à ces insuffisances et aider à l'identification des zones potentielles de recharge en eau que cette étude a été menée dans cette partie du Bénin. Dans cette zone où l'eau se retrouve dans les fractures, une connaissance des fractures dans la zone sera nécessaire et la cartographie des potentielles de recharge des systèmes aquifères aideraient à connaitre l'infiltration de ces zones. Cela évitera la surexploitation des aquifères et favorisera une utilisation équilibrée et durable des ressources en eau dans la région de la pénéplaine cristalline.

C'est dans cette logique que le présent sujet aborde « **La caractérisation du réseau de fracture des zones de recharge des systèmes aquifères dans la pénéplaine cristalline du Bénin** ». L'objectif général est d'identifier les zones potentielles de recharge des eaux souterraines dans le but de mieux implanter les forages dans cette partie du pays.

Les objectifs spécifiques qui tournent autour de ce thème sont :

- caractériser le réseau de fracture dans la pénéplaine cristalline ;
- identifier les zones de recharge des systèmes aquifères dans la pénéplaine cristalline.

Les **hypothèses** qui découlent de ces objectifs spécifiques sont entre autres :

- l'extraction des fractures permet de connaitre les systèmes aquifères ;
- l'identification des zones de recharge est une condition suffisante pour l'implantation d'un forage.

1-1-2-Clarification conceptuelle

La pénéplaine cristalline : c'est une zone constituée des roches métamorphiques et magmatiques. Elle est caractérisée par une altitude variable de 200 m à 400 m sur laquelle on peut observer une série de collines isolées.

Un aquifère : c'est une formation géologique souterraine constituée de roches poreuses ou perméables, capable de stocker et de fournir de l'eau souterraine en exploitation dans des conditions au moins acceptables.

Recharge : c'est le processus par lequel l'eau s'infiltre dans un aquifère, augmentant ainsi son niveau d'eau. Cela se produit généralement lorsque les précipitations, telles que la pluie ou la fonte de neige, s'infiltre à travers le sol jusqu'à atteindre la zone saturée de l'aquifère. La recharge peut également se produire par l'infiltration provenant de cours d'eau, de lacs ou d'autres sources d'eau.

Fractures : elles sont de fissures ou des cassures dans les roches, généralement causées par la déformation tectonique, les mouvements des plaques terrestres ou des processus géologiques. Elles peuvent jouer un rôle important dans la perméabilité des roches et dans le stockage et l'écoulement des fluides tels que l'eau ou les hydrocarbures.

1-1-3-Revue de littérature

Dans le cadre de la réalisation de notre travail, la recherche documentaire a consisté en une collecte des informations dans les mémoires et les autres documents scientifiques qui abordent la problématique de caractérisation des fractures et des zones de recharge des systèmes aquifères. Elle a permis de faire la synthèse des connaissances et recherches antérieures déjà effectuées pour mieux aborder le sujet d'étude.

L'extraction des linéaments se fait par deux techniques. Il s'agit de l'extraction manuelle et l'extraction automatique. L'extraction manuelle des linéaments est un procédé qui consiste à repérer et relever par analyse visuelle sur un même fichier toutes les linéarités par des tracés linéaires en superposant à des images de différentes sources. L'extraction effectuée sur les images rehaussée et/ou filtrée abouti au repérage de tous les linéaments sur cette couche de

données géoréférencées. L'extraction automatique des linéaments se fait à l'aide de l'algorithme LINE et se compose de trois étapes principales : détection de bord, seuillage et extraction des linéaments. Plusieurs auteurs (Massoud et Kdike, 2011 ; Abdullah et al 2013 ; Adon et al., 2014 et Kouamé, 2016) ont utilisé l'extraction automatique pour extraire les linéaments. D'autres auteurs (Kanohin al 2012 ; Affoué et al 2016 ; Oussou et al 2019 ; Avy et al., 2021) Ont abordé l'extraction manuelle pour extraire les linéaments dans leur zone d'intérêt respectif. L'auteur Kouamé a abordé les deux techniques de cartographie linéamentaire (automatique et manuelle) et a révélé que la détection automatique des linéaments par le module LINE mise en œuvre en parallèle a donné des résultats qui ont permis d'appréhender ceux de la méthode d'extraction manuelle. Plus objective et marqué par sa rapidité d'exécution, la méthode d'exécution automatique des linéaments par le module LINE utilisée dans plusieurs travaux par certains auteurs s'avère efficace pour la cartographie litho structurale. Elle présente cependant quelques biais qui résident dans la difficulté du choix des paramètres à définir avant chaque itération. L'extraction des linéaments par la méthode abordée a donné des résultats probants. Dans notre travail, on s'est basé sur l'extraction manuelle pour extraire les linéaments comme l'a fait certains auteurs. La carte linéamentaire a été ensuite validée à partir des travaux antérieurs (Oussou et al.,2019 ; Avy et al.,2021).

La télédétection permet d'obtenir diverses sources de données sous formes de cartes thématiques à la caractérisation des zones de la recharge d'une zone. Nous avons entre autres les cartes d'occupation du sol, les cartes de pentes, la carte de densité de drainage, la carte du sol, la carte de densité de fracture et la carte de lithologie. La diversité des données nécessite l'intégration dans un SIG. La télédétection et les SIG se sont avérés efficace dans l'évaluation du potentiel de recharge des aquifères fracturés dans de nombreuses études hydrogéologiques à l'échelle régionale (Hsin-Fu et al., 2009 ; Sékouba et al,2017).cette approche a aussi l'avantage d'avoir les couts faibles pour les études portant sur des vastes superficies, comparativement aux méthodes expérimentales dont les couts sont très élevés pour des surfaces limitées(ex : méthodes isotopiques, hydrochimiques hydrauliques etc.). L'établissement de la carte thématique << potentialité en eau souterraine>> consiste à reporter dans l'espace, les différentes valeurs issues de la sommation des valeurs standardisées et pondérées de chaque indicateur intervenant dans l'élaboration de ladite carte. Une reclassification des facteurs conduira à des cartes thématiques à quatre classes. Le nombre de classe est fixé à quatre pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte résultante (Affoué et al. 2016). Dans son travail, il a déterminé les poids associés à chaque paramètre grâce à une méthode

approchée de calcul des vecteurs propres et ensuite des coefficients de pondération comme certains auteurs (Yan TA et al.,2011 ; Pinatibi et al., 2015 ; Aké et al., 2018 ; Cheikh Faye et al., 2021 ; Djémin et al., 2022). Mais certains auteurs : Sécouba et al., 2017, Ali et al., 2020 ont obtenu le poids de chaque paramètre sans effectuer des calculs. Ils se sont basés sur le schéma synthétique montrant les relations interdépendance des paramètres influençant la recharge (Shaban et al., 2006). Les cartes thématiques ont été validées par le calcul d'incertitude (Doumouya et al., 2012, Mangoua 2013 ; Yoan Ta et al., 2015 ; Affoué et al.,2016). En effet, le mode de validation des cartes thématiques utilisées dans les études antérieures (Koudou et al. 2010 ; Youan Ta et al., 2011) a montré d'insuffisances dans le fait qu'il est pratiquement impossible de trouver une classe de sensibilité réfectant à 100% la réalité du terrain car, à côté d'un forage à gros débit, il est possible d'avoir un forage à faible débit, voir nul.

1.2. PRESANTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1.2.1. Situation géographique

D'une superficie de 40.097 km^2 (soit 35% de la superficie du Bénin), la pénéplaine cristalline constituée du socle cristallin est limitée au Nord-Ouest par la chaine de l'Atacora, au Nord-Est par le bassin sédimentaire de Kandi, au Sud par le bassin sédimentaire côtier et est traversée par la faille de Kandi (suivant la direction SO-NE). Elle est localisée entre 7° 15' et 10° 36' de latitude Nord et entre 1° 36' et 3° 36' de longitude Est. Elle regroupe à peu près quelques communes du Nord à savoir Kalalé, N'Dali, Pèrèrè, Nikki, Sinendé, Bembèrèkè, Parakou et Tchaourou, les communes du centre ouest du Bénin à savoir : Dassa-Zoumè, Bantè, Savè, Savalou, Ouèssè, Glazoué et Djidja qui est une commune du zou.

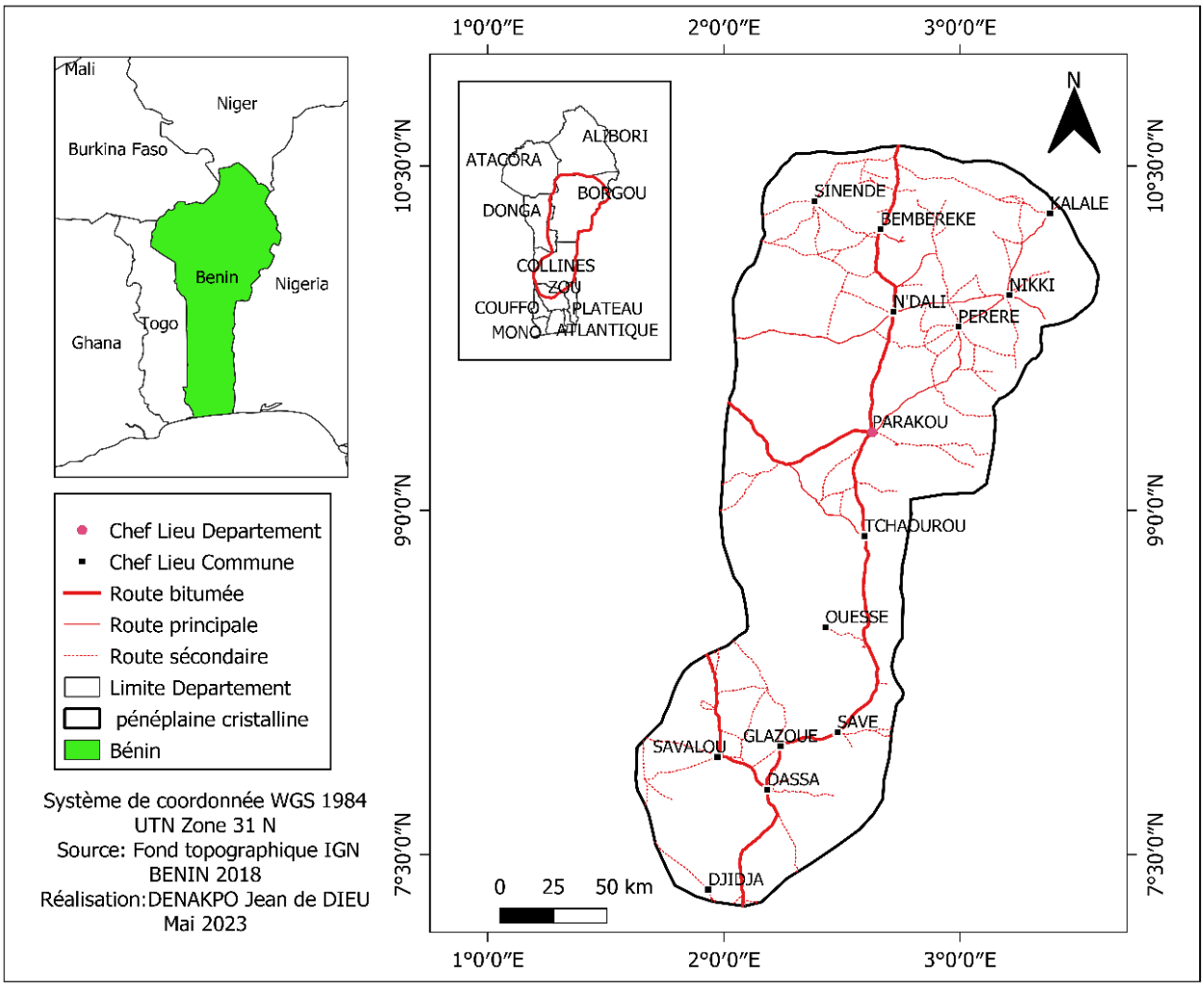


Figure 1 : Situation géographique

1.2.2 Géomorphologie

Le Nord de la pénéplaine cristalline est caractérisé par :

- une vaste pénéplaine granito-gnésique sur laquelle apparaissent des chaînons de collines à relief anguleux nord-sud « Mont de Bembèrèkè » qui forment la zone montagneuse du Borgou (491 m d'altitude) ;
- de plaines et de plateaux surmontés par endroit de monticules/collines culminant parfois à plus de 300 m d'altitudes (cas de massif de Wari-Maro) à Tchaourou ;
- de plateau et des collines sur le prolongement Ouest de mont de Bembèrèkè à Sinendé ;

- un relief plat et très peu accidenté avec des élévations par endroits dans la zone frontalière avec le Nigeria à Pèrèrè ;
- un relief accidenté et composé de plaines et de collines, comparé aux régions méridionales du Bénin qui varie entre 0 à 504 mètres d'altitude à Nikki. (PDC 2017-2021)

La partie du centre ouest du Bénin (sud de la pénéplaine cristalline) est assez homogène et couvre une pénéplaine modelée sur un socle et dominé par des collines de 300m en moyenne d'altitude.

1.2.3. Climat

Le Nord de la pénéplaine cristalline bénéficie d'un climat de type Soudanien avec une saison des pluies. La pluviométrie annuelle varie entre 900 à 1300 mm par an. Pendant la saison sèche, harmattan, vent sec et frais, souffle du Nord-Est et est responsable de la baisse brutale de l'humidité relative (Hr) dans le mois de Décembre (Monographie, 2006).

La température annuelle s'établit autour de 26°C avec un maximum de 35°C en mars et redescend aux environs de 23°C en décembre-janvier. L'humidité relative varie entre 30 et 70% (RGPH-4). La saison des pluies s'étend d'Avril à Octobre, et la saison sèche de Novembre à Mars. Pendant la saison sèche, harmattan, vent sec et frais, souffle du Nord-Est et est responsable de la baisse brutale de l'humidité relative (Hr) dans le mois de Décembre (Monographie, 2006).

Le climat du Sud de la pénéplaine cristalline appartient intégralement à la zone de climat soudano-guinéen à 2 saisons pluvieuses et deux saisons sèches avec des aléas. Le nombre total normal de jours de pluie dans l'année varie entre 80 et 110 (RGPH-4). Il en résulte quatre saisons :

- une saison des pluies principale : de mars à juillet ;
- une saison sèche mineure : d'août à septembre ;
- une saison des pluies mineure : d'octobre à novembre ;
- une saison sèche principale : de décembre à mars.

La hauteur de pluie et la température dans les collines varient respectivement entre 1100 mm à 1400 mm et 21°C à 36°C (Projet d'AEP des villes de Savè, Savalou, Glazoué, Dassa-Zoumè).

1.2.4. Sols

Les principaux types de sols rencontrés au Nord de la pénéplaine cristalline sont surtout les sols ferrugineux tropicaux, des sols ferralitiques, des sols sableux argileux ou argilo-sableux et les sols granito- gneissiques à caractère très variés selon les séquences topographiques :

- les sols ferrugineux tropicaux sont dominants dans la commune de N'Dali où ils sont profonds, non concrétionnés et soumis au lessivage ;
- les sols ferralitiques se retrouvent dans les communes de Sinendé, de Nikki, de Pèrèrè ;
- les sols sablo-argileux et granito-gneissiques de ce même groupe couvrent les communes de Bembèrèkè, de Kalalé où se rencontrent aussi des sols sableux ;
- les sols hydromorphes se retrouvent dans les vallées le long de l'Okpara et de l'Ouémé dans la commune de Tchaourou (RGPH-4, 2013).

Les principaux types de sols sont ferrugineux tropicaux. Les sols ferrugineux ont une profondeur plus ou moins importante : leur perméabilité et leur porosité sont généralement bonnes.

Par contre, ils ont des réserves minérales, une acidité forte et une saturation réduite. Ces sols apparaissent comme le résultat d'une altération intense et profonde ; presque partout, ils manifestent une grande homogénéité physique (Monographie, 2006).

Les sols du Sud de la pénéplaine cristalline plus précisément :

A Savè, les sols qu'on y rencontre sont des sols ferrugineux tropicaux qui font place par endroits à des sols latéritiques devenus infertiles sous l'action des activités humaines. On retrouve aussi des sols hydromorphes dans les bas-fonds et les vallées des cours d'eau. L'ensemble des sols de la zone est relativement fertile (Projet d'AEP dans les villes de Savè, Dassa-Zoumè, Savalou à partir des eaux de surface).

A Savalou, les sols les plus répandus sont les sols ferrugineux tropicaux avec par endroits des étendus de concrétion. On distingue aussi des sols hydromorphes et des vertisols ;

A Ouèssè, les sols sont pratiquement des sols ferrugineux. On note par ailleurs, le long des divers cours d'eau, quelques bas-fonds aux sols hydromorphes propices à la riziculture et au maraichage (Monographie, 2006).

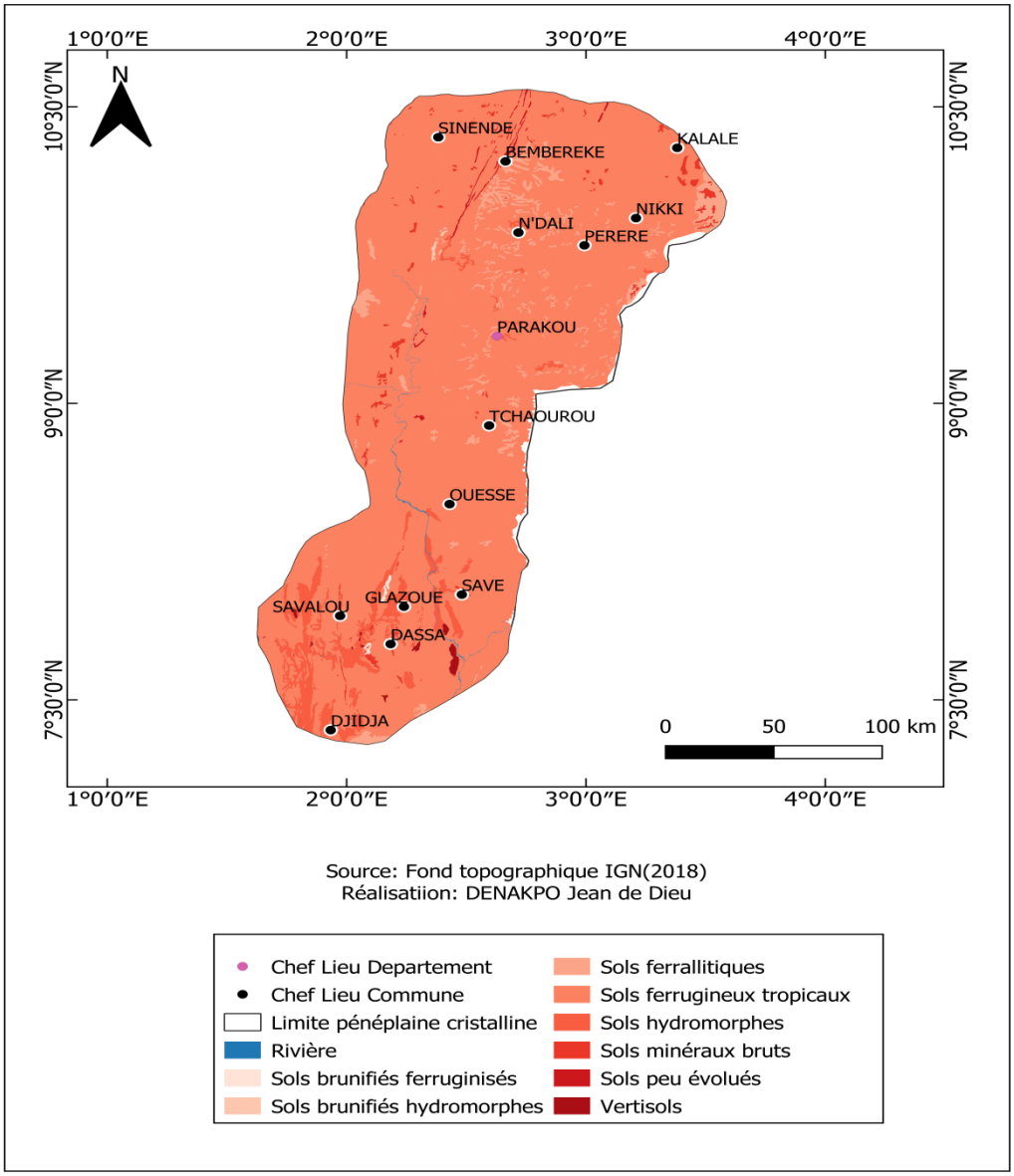


Figure 2 : Carte pédologique de la pénéplaine cristalline

1.2.5. Végétation

La végétation au Nord de la pénéplaine cristalline est une savane à physionomie diversifiée où la densité des arbres diminue vers le Nord. On y distingue quatre (4) types de végétation qui se rencontre dans toutes les communes :

- la savane herbeuse où les bois se font rares à cause des feux de brousse rencontrés dans les communes de Kalalé, de Bembèrèkè et de Sinendé, et dans les dépressions dominées par les Hyparhénia, les Loudetia, les Andropogon, les Pennisetum et de nombreuses Papilionacées, Rubiacées etc.. ;
- la savane arborée et arbustive se rencontre dans les communes de Nikki, de N'Dali, de Pèrèrè où la densité des arbres est plus élevée ;

- la forêt galerie longue les fleuves et rivières et renferme les espèces comme Anogéissusleiocarpus, Bombax costatum, Andasoniadigitata avec des herbes plus ou moins sciaphyles et discorea (PGPH-4,2013).
- des forêts claires s'observent par endroits, mais l'avancée de la déforestation pendant ces dernières années par suite d'exploitations anarchiques diverses dues aux actions des hommes caractérise la disparition de nombreuses ligneuses et des ressources fauniques. Cette savane est dégradée du fait de la pratique d'une agriculture itinérante sur brûlis et des feux de brousse tardifs et répétés.
- Les sols quoique peu profonds sont souvent très riches en éléments minéraux et sont favorables aux cultures telles que l'igname, le sorgho, le coton, le maïs, le manioc, le soja ; diverses essences naturelles composent cette végétation, la majorité constituée de karité et de néré est exploitée pour la cueillette et le reste comme bois d'œuvre dont le Lingué, le Cailcédrat, l'Iroko (Monographie 2006 et PDC 2017-2021).

Le centre-ouest du Bénin (sud de la pénéplaine cristalline du Bénin) est dominé par :

- une savane parsemée d'arbres et d'arbustes, ilots de forets dont la forêt classée de l'ouémé-Boukou vaste de 20500 ha et des forêts galeries le long du fleuve Ouémé dans la commune de Savè ;
- des forêts naturelles (forets riveraines, forets galléries, forêts denses sèches, forets claires, savanes boisées arborées et arbustives et savanes saxicoles) et des plantations de tecks dans les communes de A Glazoué et à Savalou ;
- une savane arborée dominée par des espèces ci-après : Butyropermum paradoxum (Karité-èmin), mospyos mespilliformus(ébène-atakpa) dans la commune de Bantè. Quelques forêts soumises à une exploitation abusive dont la forêt classée et savane dans la commune de Ouèssè ;
- une forêt est savane claire et très couvertes et quelques ilots sur de foret sur les interfluves d'altitude élevée dans la commune de Dassa-Zoumè (Association National des communes).

1.2.6 Hydrographie

Le Nord de la pénéplaine cristalline comporte la ligne de séparation des deux principaux bassins qui arrosent le Bénin. Le bassin du nord (les affluents du Niger : Alibori, sota), qui arrose le nord du département et celui du sud (l'Ouémé et ses affluents) qui arrose le sud du

département. Cette partie dispose d'un réseau hydrographique faisant partie intégrante du bassin principal du fleuve Ouémé avec son affluent Okpara qui prend sa source à Daroukpara dans la commune de Nikki. Les affluents que sont l'Okpara et Apro traversent N'dali. L'unique fleuve passant par Pèrèrè et Parakou est l'Okpara. Il existe, en outre, plusieurs petits affluents de l'Okpara mais qui sont saisonniers.

Le centre du Bénin (le sud de la pénéplaine cristalline) dispose d'un réseau hydrographique peu important. Néanmoins, quelques rivières permettent d'assurer partiellement la couverture en eau des populations. Le réseau hydrographique de cette partie est constitué à Savè de nombreuses rivières dont les eaux tombent dans le fleuve Ouémé et son principal affluent l'Okpara. Le réseau hydrographique de Glazoué est constitué d'une part des cours d'eau qu'est le fleuve Ouémé et d'autre part, de petits cours d'eau locaux. Les cours d'eau principaux qui traversent la commune de Dassa-Zoumè sont le Zou et l'Agbado. Ils sont orientés Nord-Sud puis Nord-ouest et rejoignent l'Ouémé à environ 107 km au Nord-ouest des collines quartziques de Badagba. Parmi les affluents du Zou on peut compter l'Otio, la Bogui, le Kouffo et l'Agla. Le réseau hydrographique de Savalou est assez bien alimenté par des cours d'eau saisonniers dont les principaux sont : Agbado, Klou, Gbogui, Azokan, longs d'environ 161km. La commune de Ouessè est largement drainée avec ses 292 km de cours d'eau. Toutes ces rivières d'origines diverses, se jettent dans le fleuve de Ouémé (Monographie, 2006). Dans la commune de Bantè, à la seule rivière Odjouro s'ajoutent quelques affluents du fleuve de zou tels que omimi qui prend sa source dans les régions de Kagoulé et se jette dans le Zou au Sud de Koko près des communes de Tobé où il est connu sous le nom de Odon' la ; Otcho, second bras du Zou qui arrose les régions de Banon, et celles de Bantè, de Malomi et de Kafègnigbé.

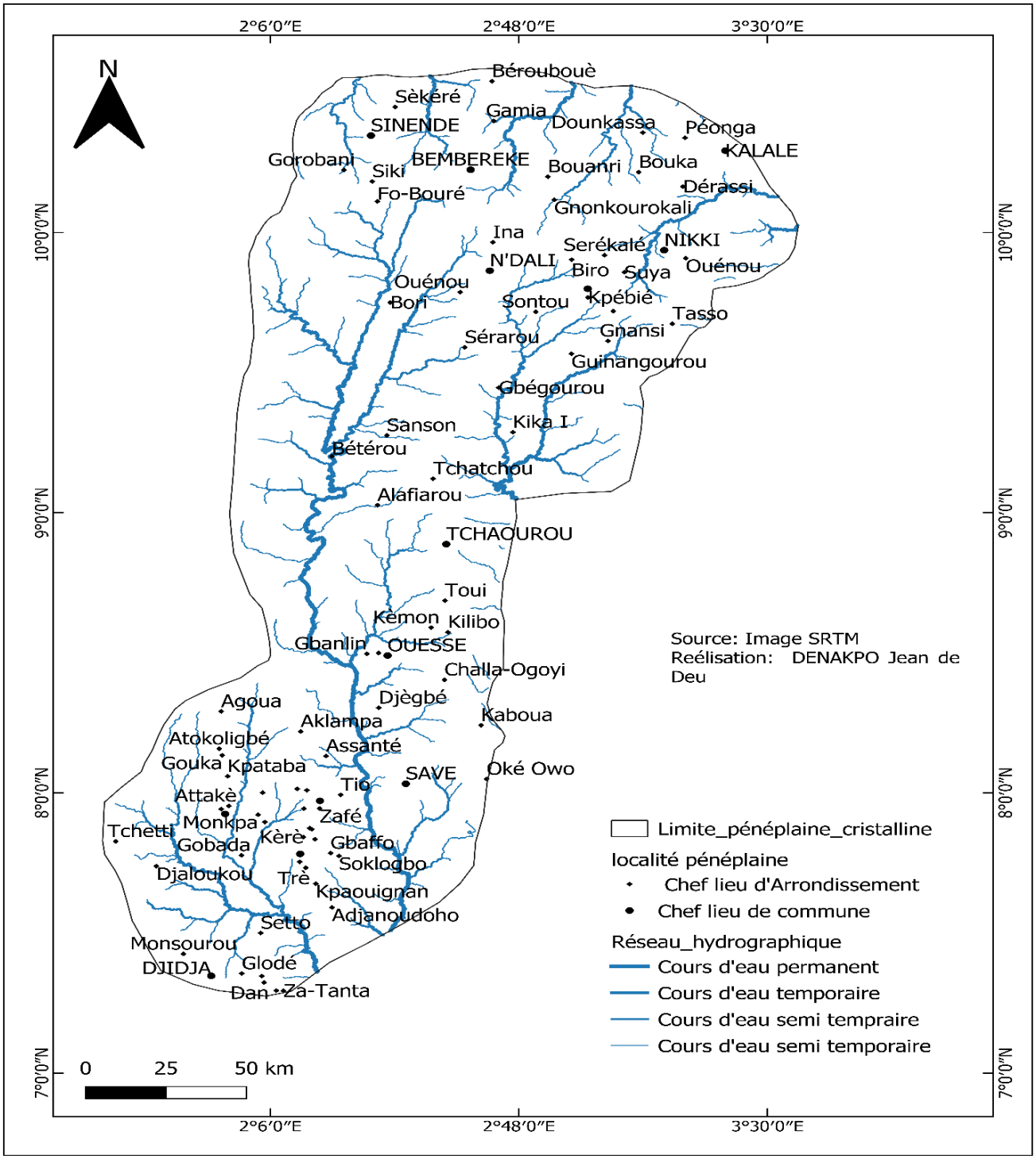


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique de la pénéplaine cristalline

1.2.7 Hydrogéologie

La pénéplaine cristalline constituée du socle cristallin est composée de roches magmatiques et métamorphiques. Ces roches résistantes sont recouvertes par des produits de leur altération. La ressource en eau est principalement contenue dans la couche d'altérites qui recouvre la roche saine. Elle circule à la faveur des fractures au niveau des roches. Un aquifère de socle est donc une superposition d'horizons avec en surface la couche des altérites, en dessous l'horizon fracturé ou fissuré et en profondeur la roche saine qui peut contenir parfois des fractures ou fissures profondes pouvant être aussi conductrices. Le socle et son recouvrement forment un système aquifère bicouche comprenant un réservoir supérieur continu et un réservoir inférieur discontinu transmissif. La couche d'altérites très peu perméable, composée majoritairement de sables et d'argile, constitue le réservoir supérieur en continuité hydraulique avec le socle du fait de sa très bonne porosité assurée par la fonction de stockage (pouvoir capacitif). Elle ne constitue pas une zone de captage mais elle assure la pérennité des débits captés dans le socle. Le socle constitue le réservoir inférieur dont la fonction est transmissive du fait de la présence de fractures (développées à la suite de phénomènes tectoniques et d'altération) interconnectées qui forment les aquifères discontinus. Ces aquifères sont assez productifs et sont les plus sollicités pour l'approvisionnement en eau potable des populations en milieu rural (Brunelle, 2020).

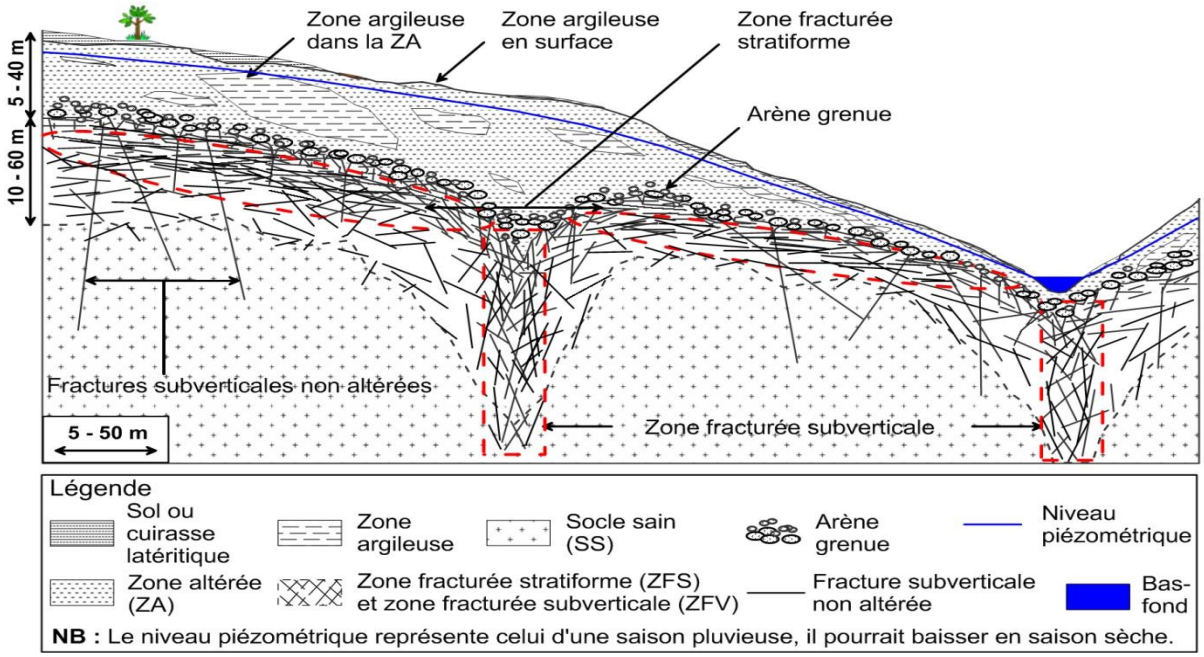


Figure 4 : Profil de modèle conceptuel hydrogéologique de la zone de socle en milieu tropical : exemple du Bénin (ALLE ,2018)

1.2.8 Géologie

La pénéplaine cristalline est constituée de divers groupes pétrographiques tous très métamorphiques, comprenant essentiellement des migmatites et des gneiss.

Le groupe de Pira

Il s'agit de migmatites formées aux dépens des gneiss. Ce groupe est formé :

- d'embréchites : 2 micas (région de Ouari et de l'Okpara), à biotite (région de pira) et à amphiboles (monts de ouari Maro),
- d'anatexites plus localisées (massif de Bantè, par exemple) ;
- les **intrusions panafricaines**, constituées de granites intrusifs ou porphyroïdes, sont beaucoup plus axées dans la commune de Nikki ; on les retrouve aussi aux environs de Pèrèrè et de N'Dali. On y rencontre aussi des granites à grains fins ou moyens précisément à Alafiarou dans Pèrèrè. (Affaton et al., 1984)

Le groupe de kouandé

Ce sont des orthogneiss formés à partir de batholites, de granites, de granodiorites ou de diorites. Les roches sont localisées dans des massifs peu étendus et sont constituées de gneiss à biotite et de gneiss à amphibole.

Le groupe de Kandi

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

Le groupe de Djougou

Ce groupe couvre également de grandes surfaces. Il est constitué essentiellement de roches claires : gneiss muscovite, gneiss à deux micas. Il faut signaler cependant l'existence de petits massifs d'amphibolites intercalés dans ces formations.

Le groupe de Badagba

Ce groupe est constitué de quartzites et forme les collines qui s'échelonnent selon une direction NNE-SSO Abomey et Gogounou.

La pénéplaine cristalline est constituée aussi des **roches éruptives** à savoir :

Les granites syntectoniques

Très étendus, ils sont concordants ou sub-concordants avec les séries du Dahoméen. Les granites sont caractérisés par une grande hétérogénéité pétrographique à l'intérieur d'un même massif.

Les granites post-tectoniques

Ils se présentent sous forme de batholites de faibles étendues discordantes avec les roches encaissantes. On peut distinguer les granites porphyroïdes des granites grenus ou microgrenus. Les premiers forment les batholites alignés suivant une direction NNE-SSO le long de la vallée de l'Alibori et celui de Gobada au sud de Savalou. Les batholites forment des reliefs assez mous. Les seconds forment massifs alignés également suivant une direction NNE-SSO à l'ouest de Dassa. Ces granites très compacts et durs formes des reliefs assez marqués.

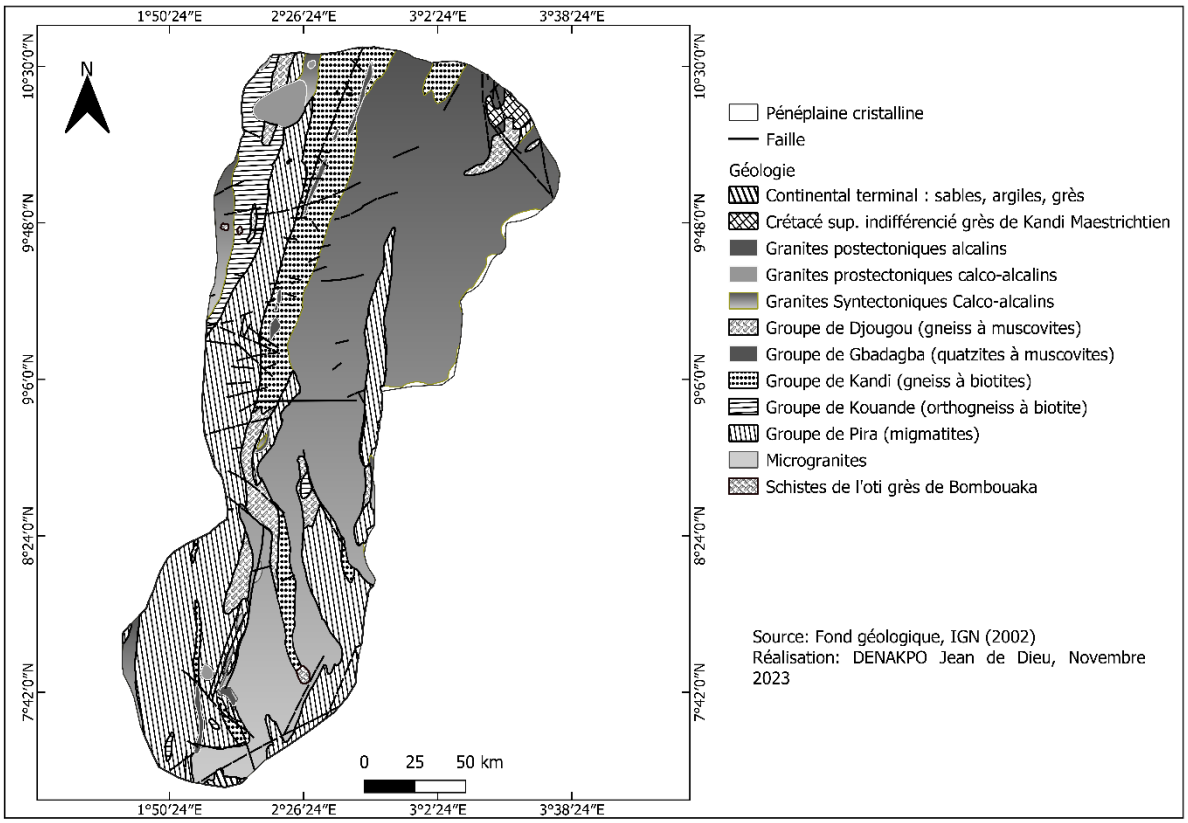


Figure 5 : Carte géologique de la pénéplaine

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

2-1. Nature et source des données utilisées

Les données utilisées au cours de cette étude sont de type planimétrique il s'agit essentiellement des fonds topographiques issus de la base des données de l'Institut Géographiques National (IGN), des images Landsat 9 OLI Tirs des scènes 191-053,192-053, 192-054 et 192-055 de Janvier 2023 issues du site de l'usgs earth explorer (https://earthplorer.ugs.gov.). Ces images ont été traitées sous le logiciel ENVI 5.2 et les cartes sont habillées sous le logiciel Qgis 3.16.

2-2. Méthode relative à la cartographie des linéaments

Le réseau de linéaments est cartographié à partir du traitement des images. Les étapes du processus de traitement des images sont : le prétraitement ; l'Analyse en Composante Principale (ACP), l'application du filtre directionnel de SOBEL. La phase du prétraitement consiste à l'empilement des bandes (de 1 à 7) et à la mosaïque des scènes, ensuite nous avons appliqué des corrections radiométriques sur les images avec l'outil Radiometric correction et Dark substraction sous ENVI 5.2. Après la phase de prétraitement vient l'Analyse en Composante Principale (ACP) figure 6, elle consiste à rehausser l'image en supprimant les informations redondantes et à compiler les bandes. L'information contenue dans les 7 bandes Landsat OLI Tirs est regroupée dans un nombre restreint de néo bandes (composante principale 1). Ensuite il y a le filtrage par la méthode de SOBEL de type (7x7) pour mieux extraire les linéaments. Le filtre de SOBEL accentue les discontinuités lithologique et structurale dans les quatre directions : N-S, E-O, NE-SO, NO-SE. Les auteurs (Kouamé et al.,2009 ; Yao et al.,2011) par leurs travaux nous indiquent que les images filtrées, les linéaments sont matérialisés par les limites formées par les zones sombres et claires. Les discontinuités et les changements brusques de tonalité observés sur les images réhaussées sont représentés par des segments de droite(figure7).

La superposition des données de forages aux linéaments nous permis d'identifier les fractures.

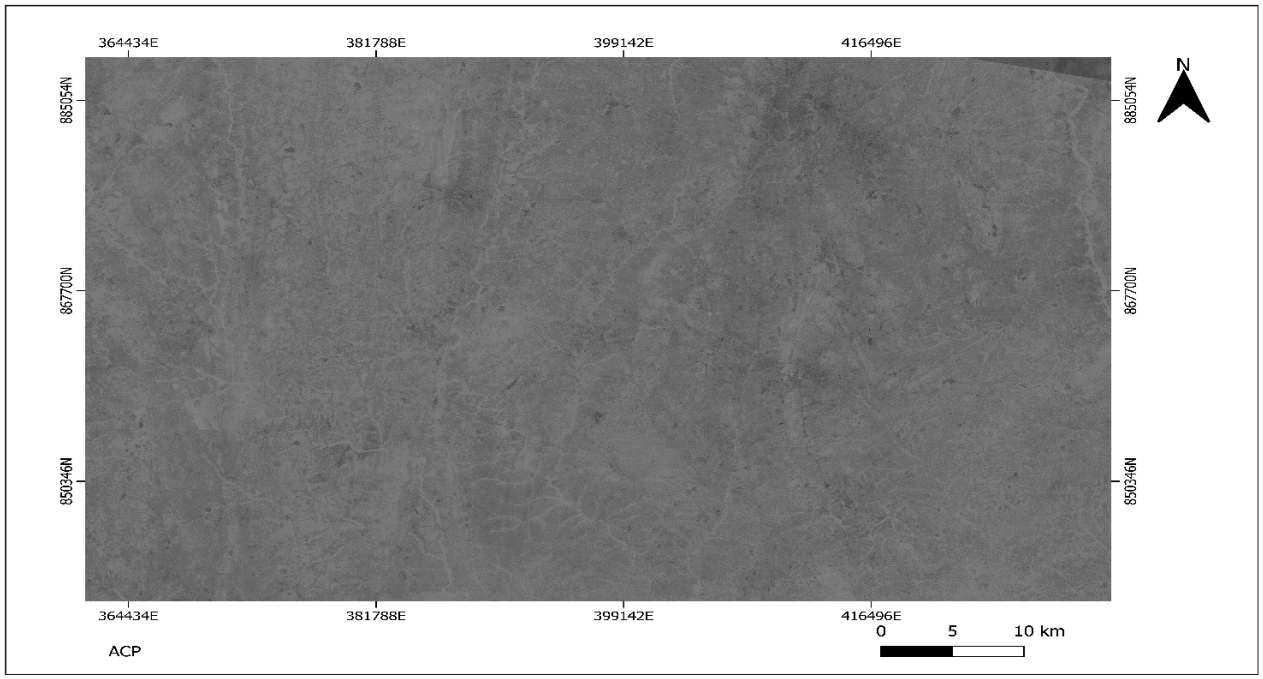


Figure 6 : Carte de l'ACP

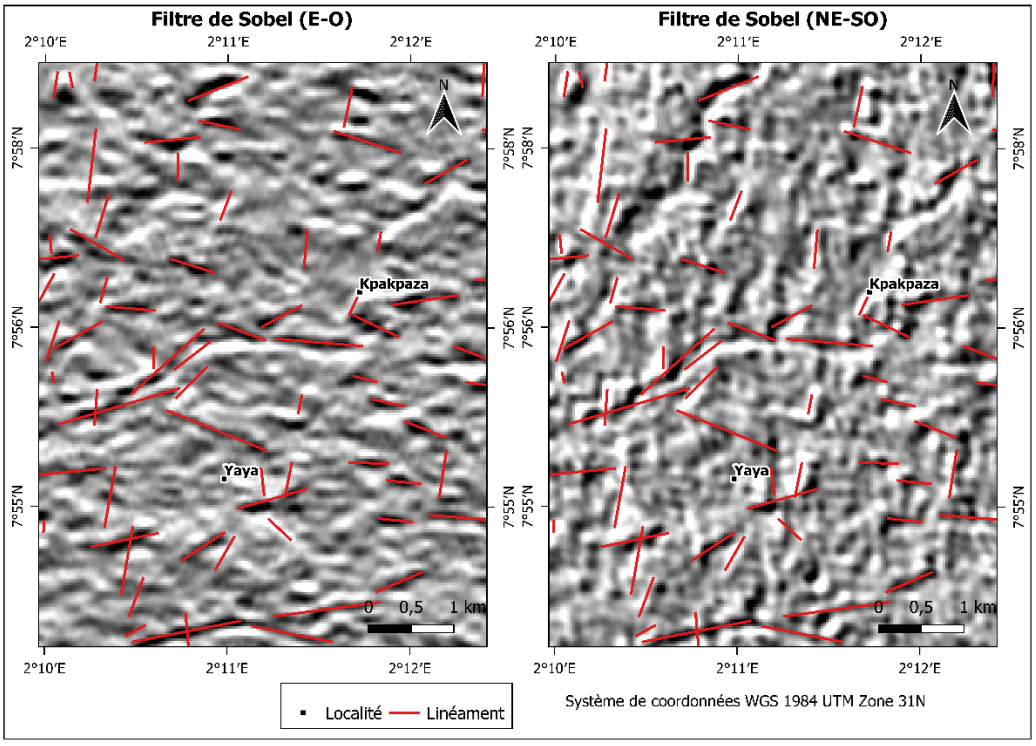


Figure 7 : Filtre directionnel de SOBEL (E-O et NE-SO)

2-3. Méthode relative à l'identification des zones de recharge

L'utilisation des techniques de télédétection, pour la détermination des états de surface dans cette zone, a été combinée à l'analyse multicritère pour réaliser la cartographie des zones potentielles de recharge des eaux (Shaban et al., 2004 ; Sikdar et al., 2004 ; Gaura et al., 2011 ; Abdalla, 2012). Pour identifier les zones de recharge il faut d'abord étudier séparément et apprécier chaque facteur (pente, occupation du sol, type de sol, densité de fracture, densité de drainage, nature lithologique) selon leur rôle dans l'infiltration puis établir une carte thématique pour chaque facteur. Par la suite il faut croiser les informations spatiales relatives aux différents facteurs cités ci-dessous. Une classification est ainsi définie pour chacun de ces paramètres et une côte est affectée à chaque classe. Par la suite, des poids sont attribués aux paramètres selon leur degré d'implication dans le processus d'infiltration. Cette technique a été utilisée dans divers domaines par plusieurs auteurs à savoir : Jourda et al., 2006 ; Youan Ta et al., 2015 ; Affoué et al., 2016 ; Dieng 2017 ; Emvoutou, 2018.

2-3-1. Identification et description des paramètres de contrôle de la recharge des aquifères

Les paramètres contrôlants la recharge des aquifères sont : pente, occupation du sol, type de sol, densité de fracture, densité de drainage et nature lithologique. Les caractéristiques physiques de ces paramètres donnent des informations importantes sur la capacité d'infiltration des formations. Une description des caractéristiques physiques est effectuée pour chaque paramètre.

- **Lithologie**

Les caractéristiques lithologiques jouent un rôle important dans le processus de recharge des aquifères fracturés à cause de la compacité et l'état d'altération de la roche, la présence de diaclase et de joint sur les roches sub-affleurantes ou affleurantes (Bhuiyan et al. 2009 ; Sékouba et al.,2017 ; Aké et al.,2017). Ces caractéristiques physiques donnent des informations importantes sur la capacité d'infiltration des formations géologiques.

❖ **Densité de fractures**

La densité des fractures exprimée en longueur cumulée totale ou en nombre de fractures par unité de surface donne des indications sur le degré de fracturation des roches, permettant ainsi d'identifier les zones hautement fracturées qui sont les endroits perméables à travers lesquels l'eau s'infiltre à condition que les autres paramètres (la pente, le type de sol, la lithologie, la densité de drainage et l'occupation du sol) soient favorables à l'infiltration. La cartographie de la densité de fracturation est par conséquent très utile dans l'identification des zones potentielles de recharge en milieu de socle fracturé (Sener et al. 2005, Youan Ta et al. 2015, Koffi K.M. et al 2016, Affoué et al... 2016, Abdou 2020). Les zones à forte densité de fractures indiquent une forte porosité secondaire et donc une zone de recharge élevée.

La formule de **la densité de fracture** est :

$$\mathbf{Df} = \frac{\sum \boldsymbol{li}}{\boldsymbol{a}} \qquad \mathbf{(1)}$$

Où D_f : est la densité de fracture [km/km²] ;

Li : la longueur totale des fractures en km ;

a la surface occupée par les fractures en km².

❖ **Densité de drainage**

En hydrogéologie, plus le réseau de drainage est dense, plus le ruissellement est important et par conséquent il y a moins d'eau disponible pour la recharge des aquifères.

La formule de la **densité de drainage** est :

$$\mathbf{Dd} = \frac{\sum \boldsymbol{Li}}{\boldsymbol{A}} \ \mathbf{(2)}$$

Avec

Dd : la densité de drainage en Km/Km^2 ;

Li : la longueur totale du réseau hydrographie en Km ;

A : la surface considérée en Km^2.

❖ **Occupation du sol**

L'occupation du sol désigne un grand nombre de paramètres présents à la surface du sol qui influence la recharge. Les plus importants sur le plan hydrogéologique sont la couverture

végétale et les surfaces imperméables. Les surfaces imperméables (bâtiments, routes, etc.) retardent considérablement le processus de recharge (Bou Kheir et al. in Sékouba al., 2017). La couverture végétale, par contre améliore la recharge, car elle favorise le confinement de l'eau dans le sol empêchant ainsi l'évaporation directe (Bou Kheir et al. in Sékouba al., 2017).

- **Type de sol**

La pénétration de l'eau dans les couches souterraines profondes dépend du type des sols. Lorsque la teneur en argile est élevée, les sols sont favorables plutôt à la rétention de l'eau en surface qu'à l'infiltration. Par ailleurs, si ces sols sont riches en éléments sableux, le temps de percolation est contrôlé par leur épaisseur (Gleeson, 2009 in Sékouba al., 2017).

- **Pentes**

Les pentes sont inversement proportionnelles au potentiel de recharge des aquifères. Lorsque les pentes sont fortes, le ruissellement des eaux est accéléré ce qui entraîne une diminution considérable de l'eau disponible pour la percolation. A l'inverse les conditions de pentes faibles sont favorables à l'accumulation et à l'infiltration des eaux (Krishnamurthy et al., 1996 ; 2000 ; Aké, 2018).

2.3.2. Pondération des critères

Les critères de décision sont pondérés grâce à la méthode de combinaison linéaire basée sur la technique de comparaison par paire selon le processus d'analyse hiérarchique (Analytical Hierachy Process, AHP) de Saaty (1997) utilisé par Doumouya et al. (2012) in Affoué et al. (2016). Elle permet de produire des pondérations standardisées dont la somme est égale à 1. La procédure se présente comme suit :

***Tableau I** : Classification et Standardisation des paramètres (Yao,et al.,2016)*

Paramètres	Classe	Appréciation des classes	Notes
Pente	>4	Très faible	1
	3-4	Faible	3
	2-3	Moyen	5
	1-2	Fort	7
	0-1	Très fort	9
Densité de Drainage	>20	Très faible	1
	15-20	Faible	3
	10-15	Moyen	5
	5-10	Fort	7
	<5	Très fort	9
Densité de fracture	0-5	Très faible	1
	5-10	Faible	3
	10-15	Moyen	5
	15-20	Fort	7
	>20	Très fort	9
Lithologie	Migmatite, Quartzite, Schiste	Faible	1
	Gneiss	Moyen	5
	Granite, Microgranite	Fort	7
	Continental terminal, crétacé supérieur	Très fort	9
Occupation du Sol	Savanes, Surface rocheuse, sols érodés et dénudés, Habitation	Très faible	1

	Forêt dense	Faible	3
	Forêt claire	Moyen	5
	Culture	Fort	7
	Plan d'eau	Très fort	9
Type de Sol	Vertisols	Très faible	1
	Sols minéraux	Faible	3
	Sols peu évolués	Moyen	5
	Sols ferrallitiques, Sols ferrugineux	Fort	7
	Sols hydromorphes	Très fort	9

- Comparer l'importance relative de tous les éléments appartenant à un même niveau de la hiérarchie pris deux par deux, par rapport à l'élément du niveau immédiatement supérieur ; cette comparaison s'est appuyée sur l'échelle numérique proposée par Saaty (tableau1) ;
- Configurer une matrice carrée réciproque formée par les évaluations des rapports des (K x K), K étant le nombre d'éléments comparés, on obtient de cette façon : a = aij avec ajj=1 et aji=1/aij (valeur inverse), où a est la valeur de chaque facteur ; et i et j constituent respectivement les lignes et les colonnes (Saaty 1997) ; et
- Déterminer les poids associés à chaque critère grâce à une méthode approchée de calcul des vecteurs propres (Vpi). Les valeurs de ces vecteurs sont déterminées en calculant la moyenne géométrique par ligne (Yao et al., 2016). Cela se traduit par la formule suivante :

$$\mathbf{Vpi} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} Ni} \quad \mathbf{(3)}$$

où Vpi vecteur de chaque facteur ; Ni est la valeur de chaque facteur.

- Le coefficient de pondération (Wi) de chaque facteur est déterminé comme suit :

$$\mathbf{Wi} = \frac{Vpi}{\sum_{i=1}^{n} Vpi} \quad \mathbf{(4)}$$

***Tableau II** : Expression quantitative et numérique de l'importance relative d'une paire de facteurs (El Morjani 2003)*

	Notes
Même importance	1
Modérément important	3
Fortement important	5
Très important	7
Extrêmement important	9
Modérément moins important	1/3
Moins important	1/5
Fortement important	1/7
Extrêmement moins important	1/9

***Tableau III** : Matrice de comparaison par paire et coefficient de pondération des paramètres contrôlants la recharge des aquifères*

	S	P	OS	Dd	Df	Litho	Vp	Wp
S	1	3	3	5	7	7	3,6	0,42
P	1/3	1	3	3	5	7	2,17	0,25
O S	1/3	1/3	1	3	3	5	1,3	0,15
Dd	1/5	1/3	1/3	1	3	3	0,76	0,089
Df	1/7	1/5	1/3	1/3	1	3	0,46	0,054
Litho	1/7	1/7	1/5	1/3	1/3	1	0,28	0,033
Total	-	-	-	-	-	-	8,59	1

S : Sol, P : Pentes, OS : Occupation du Sol, Dd : Densité de drainage, Df : Densité de fracture, Litho : Lithologie, Vp : Vecteur de pondération, Wp : coefficient de pondération.

- **Agrégation des facteurs**

Il existe diverses méthodes pour évaluer l'analyse multicritère ou l'agrégation des facteurs. Dans cette étude le choix s'est porté sur la méthode d'agrégation complète par pondération utilisée par Saley (2003), Martin et al. (2004) et Jourda (2005). Cette méthode consiste à

multiplier chaque facteur ou indicateur par son coefficient de pondération respectif et ensuite en additionnant ces résultats pour produire un indice d'aptitude selon :

$$S = \sum_{i=1}^{n} WiXi \quad (5)$$

où S est le résultat final ; Wi le poids du critère i ; et Xi est la valeur standardisée du critère i.

Une reclassification des facteurs conduira à quatre classes qui sont : la classe Mauvaise ; la classe Médiocre ; la classe bonne ; la classe Excellente. Le nombre de classe est fixé à quatre pour une meilleure visibilité et une meilleure interprétation de la carte résultante.

2.3.3. Méthodes de validation de la carte du potentiel de recharge : analyse de l'incertitude

La carte de recharge a été validée par le calcul d'incertitude (Doumouya et al., 2012, Mangoua 2013, Affoué et al.,2016). En effet, le mode de validation (superposition des donnés de forage à carte du potentiel de recharge) utilisée dans les études antérieures (Jourda et al.,2006, Youan Ta et al.,2011, Koffi K.M.et al.,2016, Cheikh Faye et al., 2021) a montré des insuffisances dans le fait qu'il est pratiquement impossible de trouver une classe de sensibilité reflétant à 100 % la réalité du terrain car, à côté d'un forage à gros débit, il est possible d'avoir un autre forage à débit faible, voire nul. Ainsi, le calcul des incertitudes sur les moyennes des divers paramètres des principaux indicateurs est donné par l'équation suivante :

$$\Delta\overline{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \quad (6)$$

Où $\Delta\overline{X}$ est l'incertitude sur la moyenne de la série de données ; σ est l'écart type ; et m est le nombre de données.

Un facteur d'expansion (K) est alors calculé afin de déterminer le niveau de confiance. La détermination de ce paramètre est basée sur le principe statistique de calcul de l'incertitude étendue. Le facteur K permet la définition d'un intervalle ayant pour but d'avoir dans les résultats une grande confiance. L'expression de ce facteur est :

$$K = \frac{|E - \Delta\overline{X}|}{\sigma} \quad (7)$$

Où K est le facteur d'expansion ; E la valeur extrême de la série statistique qui peut être le maximum ou le minimum de cette série (Affoué et al., 2016).

.

Les niveaux de confiance des différents paramètres ont été déduits des différentes valeurs de K. Ainsi K =1 pour un niveau de confiance de 68% ; K=2 pour un niveau de confiance de 95% ; et K=3 pour une confiance de 99%.

2.3.4. EVALUATION QUANTITATIVE DES VOLUMES DE RECHARGE

La carte révèle les zones majeures d'infiltration. Ainsi, cinq (05) niveaux descriptifs ont été mis en évidence. La projection de ces niveaux sur l'échelle proposée par la FAO (1967), montre des classes de recharge à valeurs similaires qui vont de très faible à forte recharge potentielle, regroupées dans le tableau suivant :

Tableau : le taux de pourcentage lié à chaque classe de recharge (proposé par la FAO,1967)

Classe de recharge	Très forte	Forte	Moyenne à forte	Moyenne	Faible	Très faible
Taux Déterminée	----------	30-35%	20-30%	10-20%	5-10%	<3%
Taux Moyen	----------	**32.5%**	**25%**	**15%**	**7.5%**	**1 %**
FAO (1967)	45-50%	30-35%	----------	10-20%	5-10%	< 5%

Ces classes révèlent des valeurs optimistes quant à la recharge potentielle. La question à laquelle on devrait répondre est : comment peut-on calculer la quantité globale et zonale de la recharge ? Pour calculer la quantité d'eau réellement infiltrée, un calcul simplifié est proposé par la FAO (1967) :

Volume infiltré (V_{inf}) = ***volume précipité*** $x \sum$ ***taux de recharge x % de la surface (8)***

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Caractérisation du réseau de fracture à l'échelle de la pénéplaine cristalline du Bénin

L'utilisation des filtres de SOBEL de dimension 7x7 sur les APC a permis d'obtenir les linéaments situés dans la pénéplaine cristalline du Bénin. Ces linéaments sont validés en des fractures (figure) par les travaux antérieurs. La validation du réseau de linéaments cartographiés au cours de l'étude est basée sur la comparaison des directions des grandes familles des linéaments issus du traitement d'images et de fractures révélées dans la zone (figure 8). La direction des différents linéaments identifiés et celle des fractures révélées sur la carte géologique ont été déterminées à la base des rosaces directionnelles. Après une comparaison minutieuse des directions, nous constatons que les directions NNO-SSE, ESE-ONO et NNE-SSO sont des directions qui sont majeures à la fois sur la rosace directionnelle du réseau de linéament et des fractures révélées (figure 8). Cette similarité expliquera une appartenance d'un réseau de fracture au sein du réseau de linéament.

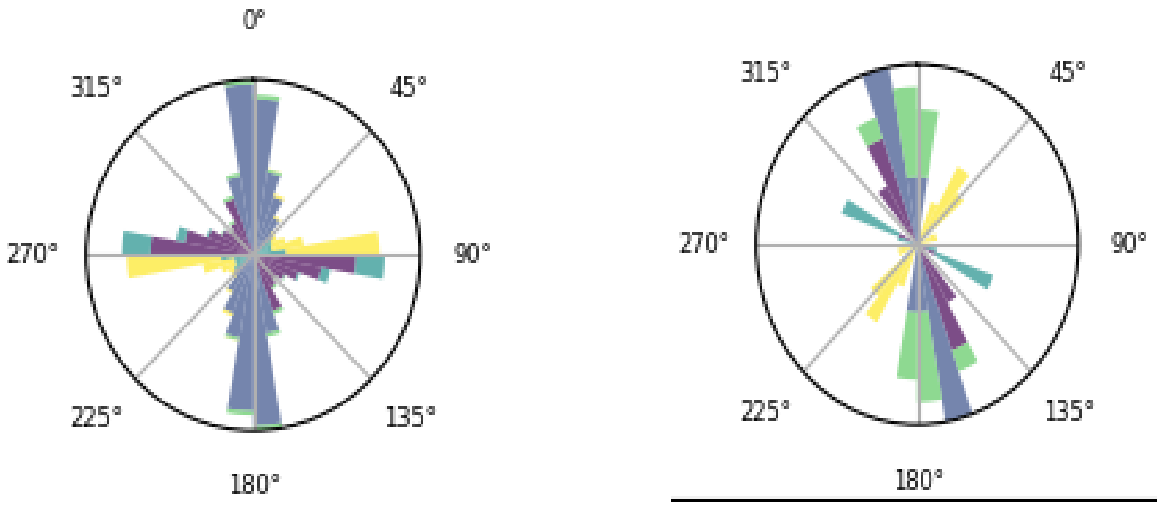


Figure 8 : Rosace des linéaments et des fractures révélées dans la pénéplaine cristalline

La superposition des données de forages aux linéaments nous permis d'identifier les fractures. Les fractures identifiées à l'échelle du secteur sont au nombre de 8127, de longueurs ($2{,}9.10^{-2}$-3,5 Km) et de densités ($3{,}87.10^{-7}$ à $3{,}05.10^{-4}$ Km/Km^2). La direction possédant un grand nombre (1918 soit 23,6%) de fractures est la direction ENE-OSO ayant des longueurs qui varient de 0,043 à 1,67 Km et des densités qui varient de $4{,}07.10^{-7}$ à $1{,}76.10^{-4}$ Km/Km^2 et la direction possédant un petit nombre (82 soit 1,01%) de fractures est la direction OSO-ENE ayant des

longueurs qui varient de 0,32 à 3,24 Km et des densités qui varient de $4{,}62.10^{-6}$ à $1{,}27.10^{-4}$ Km/Km^2. Le tableau IV ci-dessous présente les caractéristiques de longueurs et densités suivant les différentes directions.

***Tableau IV** : les caractéristiques des fractures (longueurs et densités) suivant les différentes directions.*

Direction	Angle	Nombre	Pourcentage (%)	Longueur (Km)	Densité de fracture (Km/Km^2)
NNE-SSO	0°-30°	1289	15,86	0,057-3,5	$1{,}01.10^{-6}$-$3{,}05.10^{-4}$
NE-SO	30°-60°	593	7,3	0,086-1,02	$1{,}43.10^{-6}$-$2{,}47.10^{-4}$
ENE-OSO	60°-90°	1918	23,6	0,043-1,67	$4{,}07.10^{-7}$-$1{,}76.10^{-4}$
ESE-ONO	90°-120°	1791	22,03	0,063-1,98	$1{,}85.10^{-6}$-$2{,}31.10^{-4}$
SE-NO	120°-150°	593	7,28	0,079-2,37	$1{,}76.10^{-6}$-$1{,}18.10^{-4}$
SSE-NNO	150°-180°	548	6,74	0,061-1,45	$1{,}17.10^{-6}$-$2{,}27.10^{-4}$
SSO-NNE	180°-210°	266	3,27	0,029-1,54	$1{,}56.10^{-6}$-$2{,}03.10^{-4}$
SO-NE	210°-240°	134	1,65	0,24-1,58	$3{,}53.10^{-6}$-$2{,}12.10^{-4}$
OSO-ENE	240°-270°	82	1,01	0,32-3,24	$4{,}62.10^{-6}$-$1{,}27.10^{-4}$
ONO-ESE	270°-300°	285	3,5	0,072-2,78	$3{,}84.10^{-7}$-$1{,}39.10^{-4}$
NO-SE	300°-330°	169	2,07	0,034-1,31	$3{,}07.10^{-6}$-$1{,}40.10^{-4}$
NNO-SSE	330°-360°	459	5,64	0,061-1,72	$6{,}45.10^{-7}$-$2{,}08.10^{-4}$

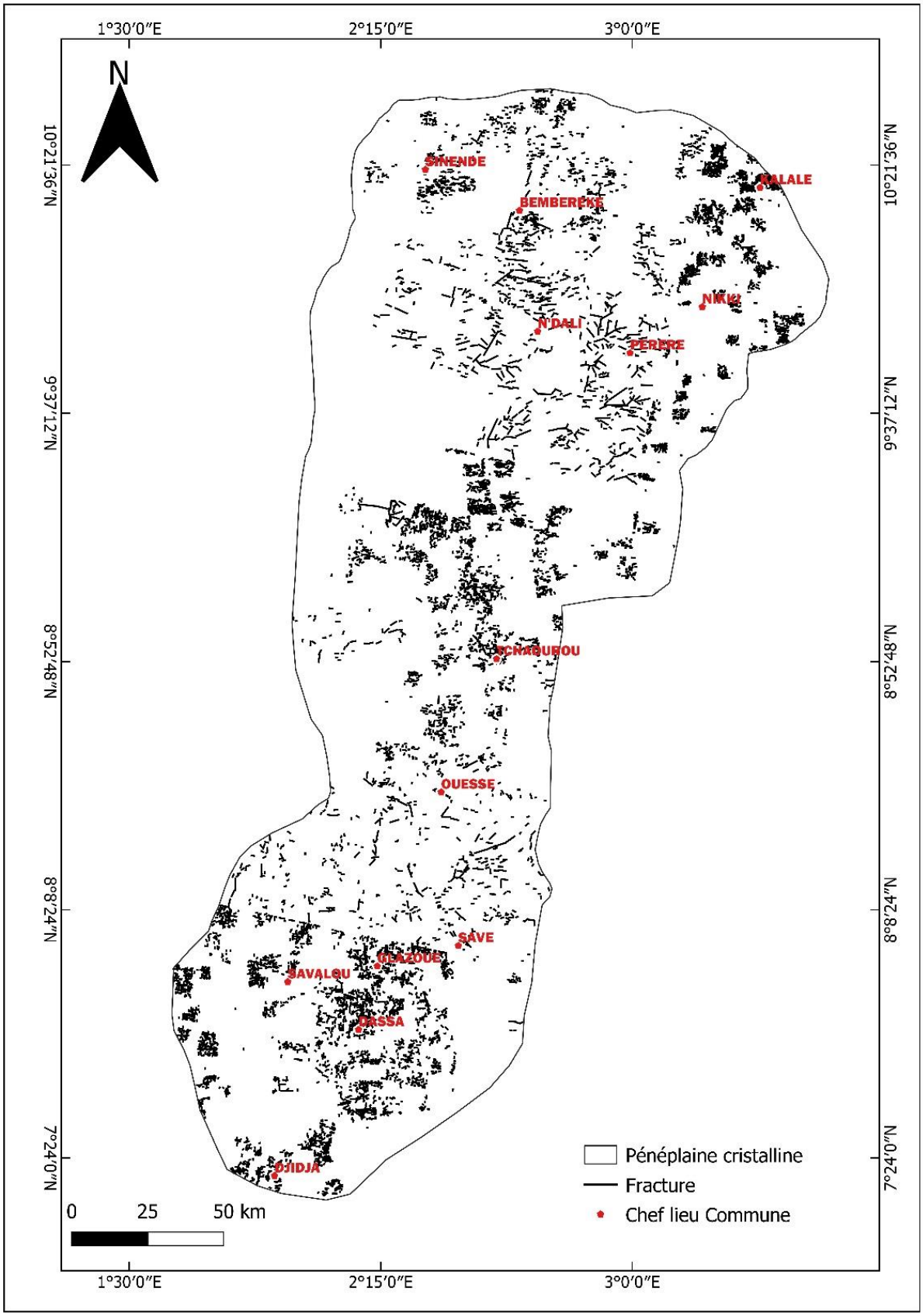


Figure 9 : Carte des fractures

3.2 Identification des zones potentielles de recharge en eau à l'échelle de la pénéplaine cristalline

Les figures 10 et 11 présentent les cartes thématiques des facteurs régissant le processus de la recharge à l'échelle de la pénéplaine cristalline du Bénin. Ces différentes cartes thématiques ont été obtenues après une reclassification au niveau de chaque paramètre. Cette reclassification est basée sur l'interprétation hydrogéologique ou l'aptitude d'infiltration des différentes unités cartographiques. Ces cartes nous montrent les endroits qui sont très faibles, faibles, moyens, forts ou très forts à l'aptitude d'infiltration, représenter par différentes couleurs sur chacune des cartes.

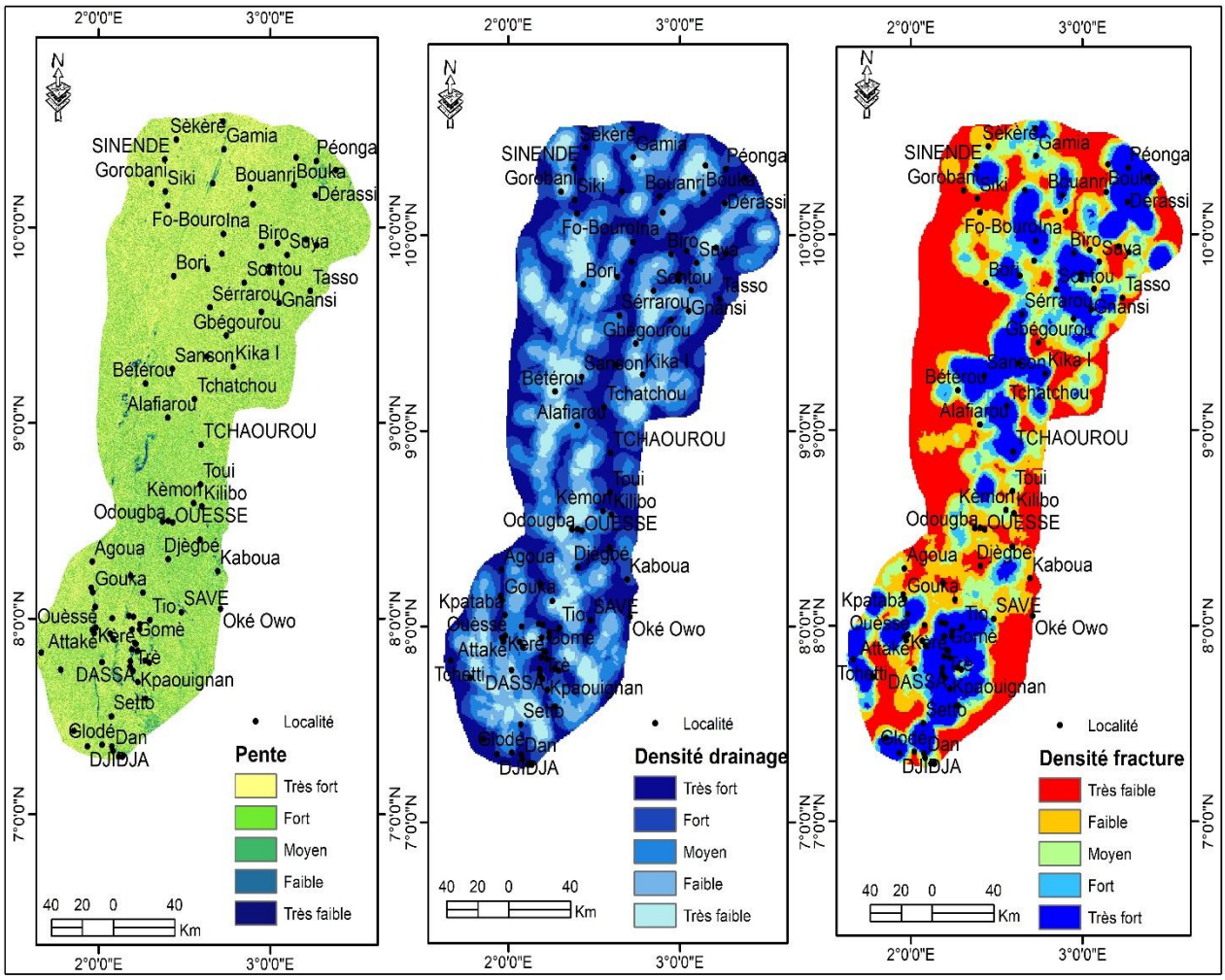


Figure 10 : Les cartes thématiques de trois paramètres (Pente, Densité de drainage et Densité de fracture).

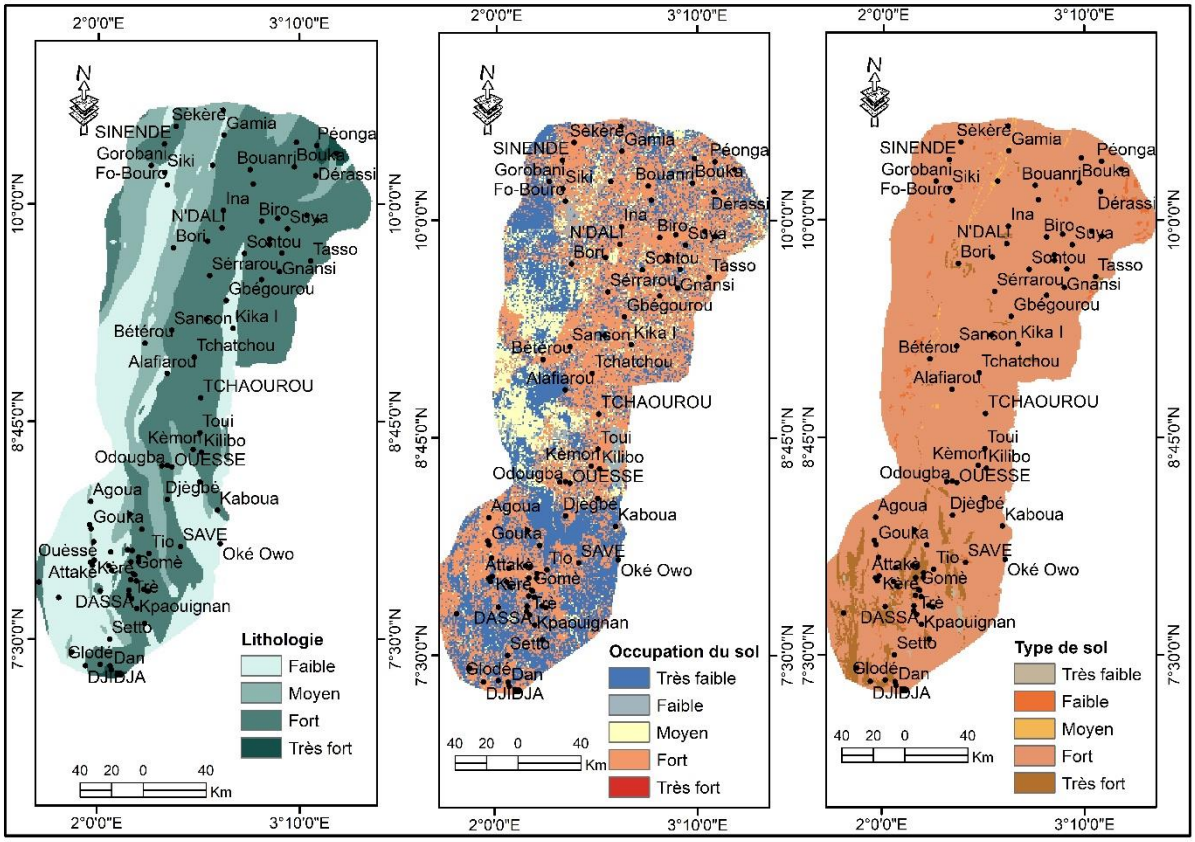


Figure 11 : Les cartes thématiques de trois paramètres (lithologie, type de sol et occupation du sol)

La figure 12 présente la carte de synthèse obtenue après l'intégration des cartes thématiques. Les zones potentielles de recharge identifiées dans la pénéplaine cristalline sont classées selon leur importance. Elles varient de mauvaise à excellente. Les zones de mauvaise et de médiocre recharge représentent respectivement 9,17% et 39,81 de la superficie globale de la zone d'étude. Elles se sont concentrées plus au centre-ouest et au nord-ouest de la zone d'étude. Ces zones ont de faible aptitude à l'infiltration. Les zones d'excellente recharge se sont localisées majoritairement au centre-nord et au sud de la zone d'étude. Ces endroits occupent 5,56% de la superficie totale et caractérisent les endroits de la zone d'étude possédant un taux élevé d'infiltration. Elles désignent également une zone de transmission rapide des contaminants. Enfin, les zones de bonnes potentielles de recharge occupant 43,44% de la superficie globale sont beaucoup plus au Nord-Est de la zone d'étude.

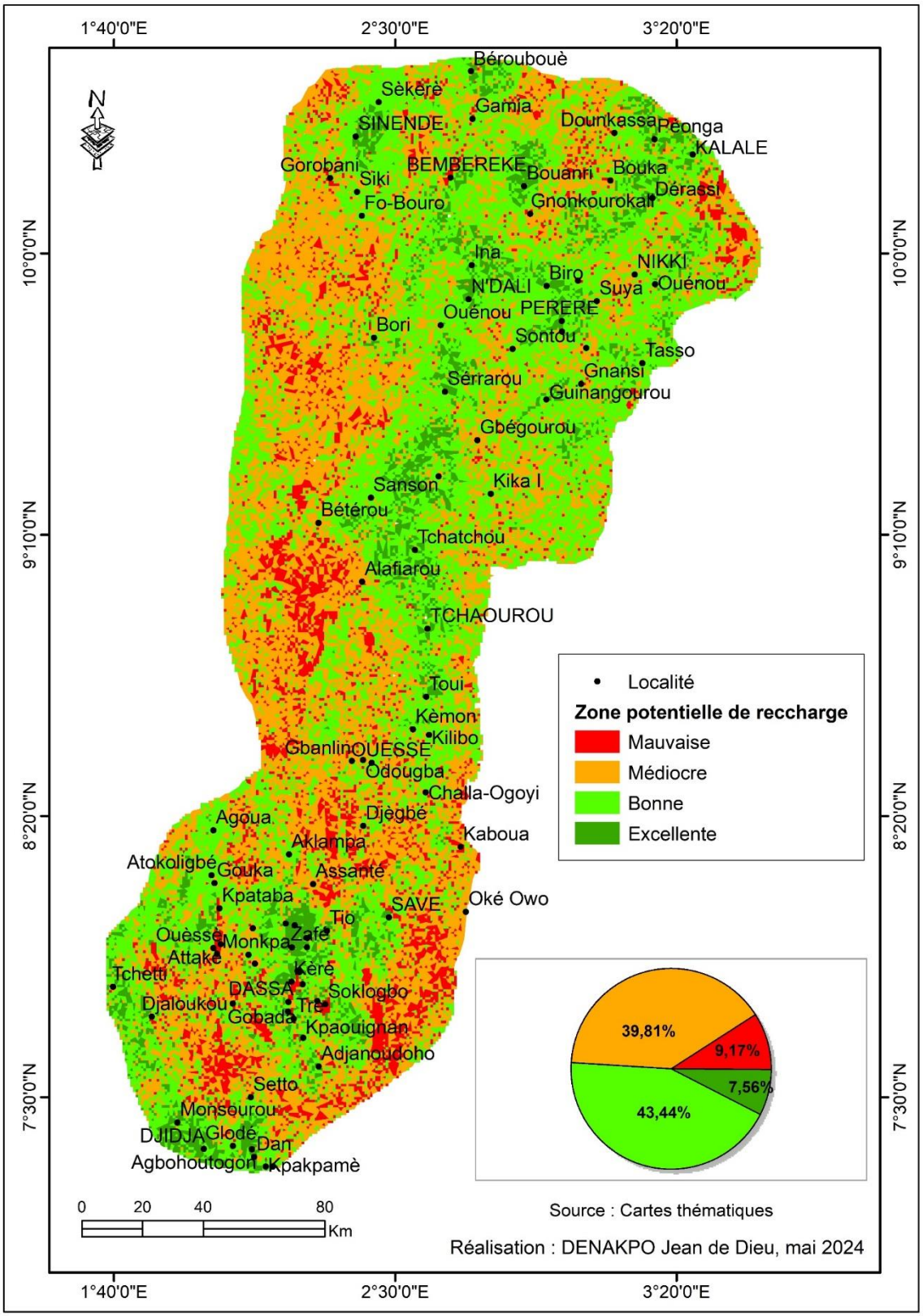


Figure 13 : Carte des zones potentielles de recharge de la pénéplaine cristalline

3.3 Validation des cartes thématiques

La validation des cartes thématiques a été réalisée par l'analyse statistique de l'erreur ou l'incertitude associée à chaque unité de la carte (Tableau v).

Les incertitudes calculées sur les paramètres varient plus ou moins de 0,157 à plus ou moins 0,609.

La carte des zones potentielles de recharge en eau a été également validée. Le calcul de l'incertitude a donné plus ou moins 0,37 avec un niveau de confiance de 95%. Cette faible valeur de l'incertitude obtenue au niveau de la carte des zones potentielles de recharge atteste la fiabilité de la carte de recharge en eau de la pénéplaine cristalline.

***Tableau V** : Résumé statistique des critères d'évaluation des indicateurs.*

Paramètres	Min	Max	Moy	Ecart-type	Incertitude	K	NC (%)
Pentes	1	5	1,67	0,73	0,33	1	68%
Dl	1	5	2,38	1,21	0,54	1	68%
Dd	1	5	2,67	1,31	0,58	1	68%
Sol	1	5	4,01	0,35	0,16	2	95%
OCS	1	5	2,77	1,36	0,61	3	99%
Lithologie	1	4	2,22	0,88	0,39	2	95%
Disponibilité	1	4	2,44	0,74	0,37	2	95%

Avec :

Min : Minimum,

Max : Maximum,

Moy : Moyenne,

NC : Niveau de Confiance

3.4. EVALUATION QUANTITATIVE DES VOLUMES DE RECHARGE

Le tableau ci-dessous présente la superficie de chaque niveau de recharge

Niveau	**Superficie m^2**	**Pourcentage %**
Mauvaise	$3{,}76.10^8$	9,17
Médiocre	$1{,}63.10^9$	39,81
Bonne	$1{,}78.10^9$	43,44
Excellente	$3{,}09.10^8$	7,56

Superficie totale = $4{,}097.10^9$ m^2

Volume infiltré (V_{inf}) = ***volume précipité*** x $\sum$ ***taux de recharge*** x ***% de la surface***

Calcul du volume précipité

Volume précipité=précipitation moyenne x surface

P=965,6mm = 0,9656m

Volume précipité = $0{,}9656 x 4{,}097.10^9$

Volume précipité = $3{,}96.10^9$ m^3

Soient V_1 , V_2 ,V_3 et V_4 les volumes d'infiltration respectifs de mauvaise, médiocre, fort et excellente de recharge.

$V_1 = 3{,}96.10^9 \times 0{,}075 \times 0{,}0917 = 27{,}23.10^6$

$V_2 = 3{,}96.10^9 \times 0{,}15 \times 0{,}398 = 2{,}36.10^8$

$V_3 = 3{,}96.10^9 \times 0{,}25 \times 0{,}4344 = 4{,}3.10^8$

$V_4 = 3{,}96.10^9 \times 0{,}325 \times 0{,}0756 = 9{,}72.10^7$

3.4 Discussions

La caractérisation du réseau de linéament nécessite au préalable un traitement des images satellitaires. Au cours du traitement des images satellitaires, le filtre de SOBEL accentue les discontinuités lithologique et structurale dans les quatre directions : N-S ; E-O ; NE-SO ; NO-SE. Les auteurs Kouamé et al.,2009 ; Yao et al.,2011 ; Coulibaly et al.,2014) par leurs travaux antérieurs nous indiquent que les images filtrées, les linéaments sont réalisés par les limites formées par les zones sombre et claire. Les discontinuités et les changements de tonalité observés sur les images réhaussées sont représentés par les segments de droite. La carte linéamentaire résultante a été validée à partir des travaux antérieurs réalisés dans la même zone. En effet, la comparaison de la rosace directionnelle du réseau linéamentaire à la rosace directionnelle des fractures révélées de la zone montre que les familles directionnelles NNO-SSE, NNE-SSO et ESE-ONO sont les plus représentatives des deux côtés. Cette similarité confirme que les linéaments regorgent des fractures. Les travaux de Boukari (1982) ont reconnu à Dassa-zoumè à l'aide des photographies aériennes des directions principales : NNE-SSO et ESE-ONO. Ainsi, la carte de linéaments de la pénéplaine cristalline obtenue et validée nous renseigne que les linéaments possèdent des fractures. L'utilisation de l'extraction manuelle et de l'extraction automatique par Kouamé (2016) montre une grande différence au niveau du nombre de linéaments obtenus (80 965 linéaments obtenus lors de l'extraction automatique contre 12 596 lors de l'extraction manuelle). Le nombre de linéaments obtenus dépend en général des méthodes d'interprétation et de l'expérience de l'opérateur.

La télédétection et l'analyse multicritère nous ont permis d'obtenir diverses sources de données sous formes de cartes thématiques qui sont indispensables à la caractérisation des zones de recharge à l'échelle de la pénéplaine cristalline du Bénin. Nous avons entre autres la carte d'occupation du sol, la cartes des pentes, la carte du réseau de drainage, la carte de linéaments, la carte de lithologie et la carte du type de sol. L'occupation du sol contribue au calcul de la carte de recharge à 15%, les pentes à 25%, la densité de drainage à 8,9%, la densité des linéaments à 5,4%, la lithologie à 3,3% et le type de sol à 42%. La diversité des données nécessite leur intégration dans un SIG. En effet, les zones de mauvaise et de médiocre recharge représentent respectivement 9,17% et 39,81% de la superficie globale de zone d'étude. Ces zones ont de faible aptitude à l'infiltration. Les zones d'excellente recharge se sont localisées majoritairement au centre-nord et au sud de la zone d'étude et les zones de bonnes potentielles de recharge occupant 43,44% de la superficie globale et beaucoup plus au Nord de la zone

d'étude. Ces zones ont un taux élevé d'infiltration. La localité de Glazoué et les localités de Savalou et Dassa-Zoumè appartiennent respectivement à la zone de mauvaise et de bonne de recharge (Oussou et al.,2019). La localité de Djidja présente une dissemblance. Cette dissemblance pourrait être due aux différents facteurs utilisés.

La télédétection et les SIG se sont avérés efficaces dans l'identification du potentiel de recharge des aquifères fracturés dans de nombreuses études hydrologiques à l'échelle régionale (Salama et al., 1994 ; Shaban et al. 2006 ; Hsin-Fu et al., 2009 ; Yan TA et al., 2011 ; Pinatibi et al., 2015 ; Aké et al., 2018 ; Cheikh Faye et al., 2021 ; Djémin et al., 2022). Cette approche a aussi l'avantage d'avoir les coûts faibles pour les études portant sur des vastes superficies allant de plusieurs centaines de km^2 à quelques milliers de km^2, comparativement aux méthodes expérimentales dont les coûts sont très élevés pour des surfaces limitées (ex : méthodes isotopiques, hydrochimiques, hydrauliques, etc.). Certains auteurs ont déterminé les poids associés à chaque paramètre grâce à une méthode approchée de calcul des vecteurs propres et ensuite des coefficients de pondération comme certains auteurs (Yan TA et al., 2011 ; Pinatibi et al.,2015 ; Aké et al.,2018 ; Cheikh Faye et al.,2021 ; Djémin et al., 2022). Mais d'autres auteurs : Sécouba et al., 2017 ; Ali et al.,2020 ont obtenu le poids de chaque paramètre sans effectuer des calculs. Ils se sont basés sur le schéma synthétique montrant les relations interdépendance des paramètres influençant la recharge (Shaban et al., 2006).

Cependant, l'utilisation des SIG dans l'intégration de diverses sources de données connait aussi des limites. La principale difficulté réside dans la définition des limites de classes et des poids qui sont assignées aux différents paramètres entrant dans la réalisation du SIG. Le choix des limites de classe s'opère le plus souvent en fonction de la faculté de discernement de l'opérateur et de son sens de jugement (Jourda *et al.,* 2006). Il faut par ailleurs noter que les limites des différentes classes définies pour les critères et les indicateurs ne doivent pas être perçus comme des barrières tangibles mais plutôt comme des zones de transition entre les différentes classes. Ce même jugement est fait lors de l'assignation des côtes aux différentes classes définies.

CONCLUSION

La pénéplaine cristalline est confrontée à des différents problèmes d'AEP. Ces problèmes sont dus à l'augmentation de la population, aux types de roches rencontrées dans ces zones et aussi à la non maitrise des propriétés hydrogéologiques du milieu. C'est dans l'optique de pallier à ces insuffisances et aider à l'identification des zones potentielles en eau que cette étude a été menée dans cette partie du Bénin. Dans le but d'atteindre cet objectif, il est nécessaire de caractériser le réseau de linéaments dans la pénéplaine cristalline. Le réseau de linéaments est cartographié à partir du traitement des images Landsat 9 OLI Tirs extraites de la base de l'USGS earth explorer (https://earthplorer.ugs.gov.). Les étapes du processus de traitement des images sont : le prétraitement ; l'Analyse en Composante Principale (ACP), l'application du filtre directionnel de SOBEL. Ces images ont été traitées sous le logiciel ENVI 5.2 et les cartes habillées sous le logiciel Qgis 3.16. La carte linéamentaire a été validée en fracture en se basant sur les travaux antérieurs. Ces fractures (8 127) identifiées à l'échelle du secteur sont de longueurs ($2{,}9.10^{-2}$-3,5 Km) et de densités ($3{,}87.10^{-7}$ à $3{,}05.10^{-4}$ Km/Km^2). La direction possédant un grand nombre (1918 soit 23,6%) de fractures est la direction ENE-OSO ayant des longueurs qui varient de 0,043 à 1,67 Km et des densités qui sont comprises entre $4{,}07.10^{-7}$ et $1{,}76.10^{-4}$ Km/Km^2 et la direction possédant un petit nombre (82 soit 1,01%) de fractures est la direction OSO-ENE ayant des longueurs qui comprises entre 0,32 et 3,24 Km et des densités qui varient de $4{,}62.10^{-6}$ à $1{,}27.10^{-4}$ Km/Km^2.

La télédétection a permis d'obtenir diverses sources de données sous formes de cartes thématiques qui sont indispensables à la caractérisation des zones de recharge à l'échelle de la pénéplaine cristalline du Bénin. Nous avons entre autres la carte d'occupation du sol, la carte de pentes, la carte du réseau de drainage et la carte de linéaments. En effet pour identifier les zones de recharge il faut d'abord étudier séparément et apprécier chaque paramètre selon leur rôle dans l'infiltration puis établir une carte thématique pour chaque paramètre. Par la suite il faut croiser les informations spatiales relatives aux différents facteurs régissant la recharge des aquifères. Une classification est ainsi définie pour chacun de ces paramètres et une côte est affectée à chaque classe. Par la suite des poids sont attribués aux paramètres selon leur degré d'implication dans le processus d'infiltration. La télédétection et les SIG se sont avérés efficaces dans l'identification des zones potentielles de recharge de la pénéplaine cristalline. Les zones potentielles de mauvaise et médiocre recharge représentent respectivement 9,17% et 39,81% de la superficie globale de la zone d'étude. Elles se sont concentrées plus au centre-

ouest et au nord-ouest. Ces zones ont de faible aptitude à l'infiltration. Les zones potentielles d'excellente recharge se sont localisées majoritairement au centre-nord et au sud de la zone. Ces endroits occupent 5,56% de la superficie totale et caractérisent les endroits de la zone d'étude possédant un taux élevé d'infiltration. Elles désignent également des zones de transmission rapide des contaminants. Enfin, les zones de bonnes potentielles de recharge occupent 43,44% de la superficie globale et beaucoup plus au Nord de la zone d'étude. La carte des zones potentielles de recharge a été validée par le calcul d'incertitude. Le calcul de l' incertitude a donné plus ou moins 0,37 avec un niveau de confiance de 95%. Cette faible valeur de l'incertitude obtenue au niveau de la carte des zones potentielles de recharge atteste la fiabilité de la carte de recharge en eau de la pénéplaine cristalline. Pour mieux en savoir sur les systèmes aquifères nous suggérons le calcul des paramètres hydrodynamiques des zones de bonne et excellente recharge.

Les résultats obtenus dans cette étude, aident à connaitre les zones de potentielle recharge des systèmes aquifères de la pénéplaine cristalline. Par conséquent, les acquis de ces travaux guideront les campagnes de prospections hydrogéologiques futures dans cette partie du pays en vue de l'approvisionnement en eau potable.

Bibliographie

1. Acte de la journée d'études (2004) « Les territoires de l'eau », Université d'Artois, Arras.
2. Akokponhoué Y. Nesny, Yalo Nicaise, Akokponhoué H. Bertrand, Youan Ta Marc, Agbahoungba George (2019). Apport de la télédétection et de la géophysique dans la cartographie des fractures hydrauliquement actives en zone de socle au centre -Ouest du Bénin
3. Allé I. (2019). Evaluation de l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical (Bénin, Afrique de l'ouest) : apport à la tomographie de résistivité électrique pour la caractérisation de la cible hydrogéologique. P 12 à 13 introductions à relire.
4. Armel K. (2016). Analyses des réseaux de fractures et de la productivité des aquifères du socle : Cas du bassin de la volta noire en côte d'ivoire (Nord-Est). P 26 à 27 et p 62.
5. Assoma, T.V., Adiaffi, B. et Koudou, A., 2012. Contribution of Remote Sensing, Multicriteria Analysis and GIS for Mapping Recharge Areas of the Coastal Aquifers in Southeast Ivory Coast. American Journal of Scientific Research, 80: 112-125.
6. Association National des Communes (ANC).
7. Avy Stéphane, Koffi Kouassi Éric Germain, Kouakou | and | Yenipoho Onésiphore, Tuo (2020) : extraction par la télédétection du réseau de fractures
8. Affoué Berthe Yao, Bi Tié Albert Goula, Alioune Kane, Oi Mangoua Jules Mangoua & Kouamé Auguste Kouassi (2016). Cartographie du potentiel en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère, Hydrological Sciences Journal, 61 :5, 856-867.
9. Bhuiyan C, Ramesh P. Singh Flugel W.A. (2009) in Oularé Sécouba. et al. Modelling of ground water recharge potential in the hard -rock Aravalli terrain, India: a GIS approach. Environ Earth Sci (2009) 59: 929-938.
10. Bou Kheir R, Shaban A., Girard M-C, Khawlie M, Abdalla C (2003). Caractérisation morpho-pédologique des zones karstiques Liban sensibilité des sols à l'érosion hydrique. in Oularé Sécouba. et al.
11. Brunelle E. Ticoutchika (2020). Etude de la productivité et détermination des paramètres hydrodynamiques des aquifères de socle des communes de NIKKI, PERERE et N'DALI.

12. Cheikh Faye, Boubacar Sollar, Sidy Dièye, Ababacar Fall (2021). Evaluation des zones potentielles d'eaux souterraines avec l'utilisation des SIG et de la télédétection : cas du sous-bassin de la sandougou (bassin de Gambie).
13. Doumouya, I. (2012). Modelling of favourable zone for the establishment of water points by geographical information system (GIS) multicriteria analysis (MCA) in the Aboisso area (South-east of Côte d'Ivoire). Environnemental Earth Sciences. doi :10.1007/s12665-011-16622-2.
14. Dieng, N. M. (2017). Etude de la relation eaux de surface-eaux souterraines dans l'estuaire inverse de Saloum (Sénégal) : apports des outils géochimiques, isotopiques, de la télédétection, des SIG et de la modélisation. Thèse de PhD. Université et UCAD Dakar. 229 p+ annexes. in Ibrahim Abdou Ali et al. (2020).
15. El Morjani, Z. (2003). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de Doctorat, Université de Genève.
16. Etienne Ake, Jean Kouame, Affoué Bénédicte et Patrice Jourda (2018). Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (sud-est de la Côte d'Ivoire) : Cartography of potential recharge areas of the Bonoua aquifer (Southeastern Côte d'Ivoire)
17. Envoutou, H. C. (2018). Fonctionnement hydrodynamique du système aquifère du bassin sédimentaire côtier de la ville de Douala / Cameroun. Apport des outils géochimiques, géostatistiques et isotopiques. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar-Université de Douala,
18. Francis O., Joseph O., Nicaise Y., Moussa B (2019). Analyse spatiale du potentiel en souterraine dans le Bassin du Zou au Sud du Bénin (Afrique de l'ouest). P 4 à 5 et p 13 à 14
19. Gleeson T. (2009). *Groundwater recharge, flow and discharge in large crystalline watershed*. PhD Thesis, Civil Engineering Department, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada 23. pp. 9-45 in Oularé Sécouba et al. P 200.
20. Hsin-Fu Yeh, Cheng-Haw Lee, Kuo-Chin Hsu, Po-Sun Chang (2009). GIS for assessment of groundwater recharge potential zone. *Environ Geol* (2009) 58 : 185-195

21. Ibrahim Abdou Ali et Moussa Konaté (2020). Identification et cartographie des zones potentielles de recharge des eaux dans la région de Dosso (Sud-Ouest, Niger) par analyse multicritère. P 222 et 228.
22. Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, 2013. Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH-4) de la République du Bénin : Cahier des villages et quartiers de la ville (Départements des collines et du Borgou).
23. Jean Bosco K., Vodounou et Yvette Onibon Doubogan (2016). Agriculture paysanne et stratégies d'adaptation au changement climatique au Nord-Bénin : European journal of geography.
24. Jourda J.P (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'Hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la côte d'ivoire. Thèse de doctorat ès Sciences
25. *Kanohin fulvie épse Otchoumou, Saley Mahaman Bachir, Aké Gabriel Etienne, and Savané Issiaka (2012) :* Apport de la télédétection et des SIG dans l'identification des ressources en eau souterraine dans la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte D'Ivoire)
26. Koffi K.M, Yao K, Mobio A. et Oga Y. M. S. (2016). Apport de l'analyse multicritère à la cartographie des zones favorables à l'implantation des zones forages dans la région de Gagnoa (Centre-Ouest de le Côte-d'Ivoire) : p 327-344
27. Kouamé, K. F., Lasm, T., Saley, M. B., Tonyé, E., Bernier, M. et Wade, S. (2009) Extraction linéamentaire par morphologie mathématique sur une image RSO de RADARSAT-1 : application au socle archéen de la Côte d'Ivoire, in Journée d'Animation scientifique (JAS09) de l'AUF, Alger, p. 7. In Yao K. et al.2011.
28. Krishnamurthy J, Venkatesa Kumar N, Jayaraman V, Manivel M (1996). An approach to demarcate groundwater potential zones through remote sensing and a geographical information system. *Int J Remote Sensing* 7 :1867–1884 Oularé S. et al. P 200.
29. Lachassagne P. et Wyns R. et al. (2005). Nouveaux outils et méthodes pour gérer et protéger les ressources en eau souterraine des régions du socle. Hydroplus,150.
30. Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistiques et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de côte d'ivoire (domaine archéen). Thèse de l'Université de Poitiers France, p 274.

31. (Le Barbé et al., 1993). Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin.
32. Mangoua, M.J. (2013). Evaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé.
33. Marc Yoan Ta, Kan Jean Kouamé, Théophile Lasm, Jean Patrice J. Jurda, Mahaman Bachir Saley, Germain Adja Miessan et Jean Biémi (2011). Cartographie des eaux souterraines en milieux fissurés par analyse multicritère. Cas de Bondoukou (côte d'ivoire).
34. Martin, J.L., et al 2004. Proposition d'outils de gestion et de l'aide à la décision dans une moyenne collective locale : Application à l'exploitation des ressources en eaux souterraines.
35. MMEH, 2005. Document de politique nationale de l'eau : La gouvernance de l'eau au service de développement du Bénin. Rapport, 19 p. MMEH, Cotonou, Bénin in M. Boukari
36. Ministère de l'énergie de l'eau et des Mines- République du Bénin, 2017-2030.
37. Oularé Sécouba.et al. Identification des zones des potentielles de recharge des aquifères fracturés du bassin versant du N'zo (Ouest de la Côte-d'Ivoire) : Contribution du SIG et de la télédétection. (2017)
38. Pinatibi Hyann, Coulibaly Naga et Coulibaly Talnan Jean Honoré (2015) : cartographie des potentialites en eaux souterraines par l'utilisation de l'analyse multicritère et les SIG : cas du district du denguele (nord-ouest de la côte d'ivoire) Pinatibi Hyann, Coulibaly Naga et Coulibaly Talnan Jean Honoré (2015).
39. M. Boukari (2007). Hydrogéologie de la république du Bénin (Afrique de l'Ouest). P 303 -325. File:///D:/Hydrogéologie du Bénin- Media wikki le 23/08/2023 à 10h 49'.
40. Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, côte d'ivoire, 4290p.
41. N'ganon Husseyn Ouattara (2016). Cartographie de linéaments pour détermination de sites productifs de forages dans la zone de Ouagadougou : Master en ingénierie de l'eau et de l'environnement
42. Plan de Développement communal
43. Politique Nationale de l'Eau (PNE) (2008).
44. Rodhe, A., and N. Bockgard (2006). Groundwater recharge in a hard rock aquifer: a conceptual model including surface-loading effects, *Journal of Hydrology*, 330, 389-401 in Oularé Sécouba et al. P 200.

45. Saley, T.L., 2003. Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo-image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Cocody in Affoué et al.2016.
46. Sener E, Davraz A, Ozcelick M (2005). An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: a case study in Burdur, Turkey. Hydrogeology 13 :826 in Oularé Sécouba. et al. P 200.
47. Shaban A, Khawlie M, Abdallah C (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zone: the case of occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal* 14: 433-443 in Sécouba et al.2017
48. Sharma, M. L., G. A. Gander, and C. G. Hunt (1980), Spatial variability of infiltration in a watershed, *Journal of Hydrology*, *45*, 101-122. in Sécouba et al.2017 Sener E, Davraz A, Ozcelick M (2005). An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: a case study in Burdur, Turkey. Hydrogeology 13 :826 in Oularé Sécouba. et al. P 200.
49. Source : Site officiel de l'UEMOA, www.uemoa.int/indexhtm ,rapport sur le développement en Afrique 2000, Intégration régionale en Afrique (WOLDU GABRE M., 2000).
50. Stratégie Nationale en Eau Potable en milieu rural 2017-2030, Mai 2017… P 5 et Ulrich Affouda. Projet d'AEP des villes de Savè, Dassa-Zoumè, Glazoué et Savalou à partir des eaux de surface (2008/2009). P 14-22.
51. Théophile Yao, Olivier Fouché-Grobla. et al. Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des Biais induits, en milieu du socle précambrien métamorphosé (2011).
52. Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, Descloitres, 2014. The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: The example of Benin. J. Appl. Geophys. 107, 16-24.
53. *Youan ta m., Yao k.a.f., bakar d., de Lasm z. o., Lasm t., adja m.g., Kouakou s., Onetie z.o., Jourda j.p.r., Biemi j. (2015) :* cartographie des zones potentielles à l'implantation des forages a gros débits en milieu fissure par analyse multicritères cas du département d'Oumé (centre-ouest de la cote d'ivoire)

ANNEXE

Annexe 1 : Synthèse des principaux résultats du RGPH-4 du Borgou

REPUBLIQUE DU BENIN

MINISTERE DU PLAN ET DU DEVELOPPEMENT

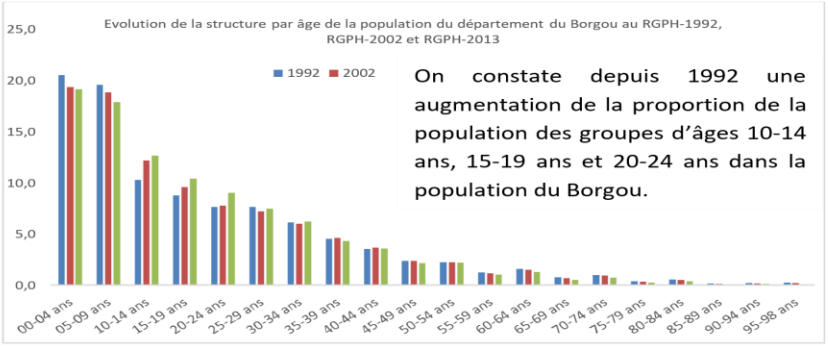
Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique

Synthèse des principaux résultats du RGPH-4 du BORGOU

1- Etat et structure de la population du Borgou

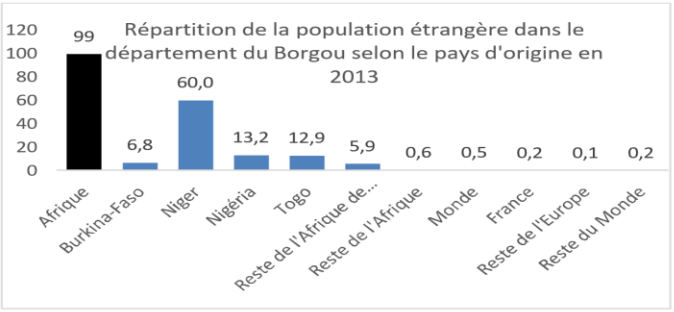
DIVISIONS ADMINISTRATIVES	RGPH4-2013			RGPH3-2002			Taux d'accroissement intercensitaire en % (2002-2013)	Poids démographique en % en 2013
	Total	Masculin	Féminin	Total	Masculin	Féminin		
BENIN	**10 008 749**	**4 887 820**	**5 120 929**	**6 769 914**	**3 284 119**	**3 485 795**	**3,52**	
BORGOU	**1 214 249**	**607 013**	**607 236**	**724 171**	**361 336**	**362 835**	**4,68**	**12,1**
Bembèrèkè	131 255	66 270	64 985	94 580	46 944	47 636	2,94	10,8
Kalalé	168 882	84 078	84 804	100 026	49 649	50 377	4,74	13,9
N'Dali	113 604	57 643	55 961	67 379	33 895	33 484	4,73	9,4
Nikki	151 232	75 339	75 893	99 251	49 632	49 619	3,80	12,5
Parakou	255 478	127 328	128 150	149 819	75 080	74 739	4,84	21,0
Pèrèrè	78 988	39 139	39 849	42 891	21 307	21 584	5,55	6,5
Sinendé	91 672	45 640	46 032	63 373	31 666	31 707	3,32	7,5
Tchaourou	223 138	111 576	111 562	106 852	53 163	53 689	6,73	18,4

En 2013, le département du Borgou compte 1 214 249 habitants soit 12,1% de la population béninoise. Le taux d'accroissement intercensitaire de 4,68% est supérieur à la moyenne nationale. Trois communes d'importances démographiques : Parakou (21,0%), Tchaourou (18,4%) et Kalalé (13,9%) de la population du département.
Depuis 1992, on constate une baisse de la proportion de la population des groupes d'âges 0-4 ans et 5-9 ans dans la population du Borgou.



On constate depuis 1992 une augmentation de la proportion de la population des groupes d'âges 10-14 ans, 15-19 ans et 20-24 ans dans la population du Borgou.

2- Population étrangère dans le Borgou



La proportion de la population étrangère dans le Borgou est de 1,9%. Les communes de Parakou (3,5%) et de Bembèrèkè (2,1%) présentent les proportions les plus élevées d'étrangers dans la population de la commune.
La quasi-totalité de la population étrangère dans le département du Borgou provient de l'Afrique. Les trois principaux pays de provenance des étrangers sont : Niger (60,0%), Nigéria (13,2%) et le Togo (12,9%).

Annexe 2 : Besoin en eau et taux de desserte au Bénin

***Tableau VI** : Besoin en eau et taux de desserte*

N°	DEPARTEMENTS	POPULATION TOTALE	BESOINS EN EAU	POINTS D'EAU EQUIPES	POINTS D'EAU FONCTIONNELS	TAUX DE DESSERTE
1	ATACORA	672 508	2690	2048	1786	66.4%
2	ALIBORI	667 015	2668	2352	1738	65.1%
3	BORGOU	950 295	3801	2477	1671	44%
4	DONGA	429 588	1718	1358	1001	58.3%
5	COLLINES	715 129	2861	2435	1830	64%
6	ZOU	681 810	2727	1968	1773	65%
7	ATLANTIQUE	1 123 630	4495	2166	1932	43%
8	COUFFO	626 844	2507	1767	1401	55.9%
9	MONO	416 842	1667	1435	1172	70.3%
10	OUEME	856 815	3427	1205	1075	31.4%
11	PLATEAU	493 954	1976	1590	1398	59.8%

Annexe 3 : La répartition par type d'ouvrages exécutés au Bénin

***Tableau VII** : Répartition des points d'eau fonctionnels*

N°	**DEPARTEMENTS**	**POPULATION TOTALE**	**FPM**	**PM**	**BF**	**SA**	**PEA**	**AEV**	**FCP**
1	ATACORA	672 508	1246	344	85	10	4	11	--
2	ALIBORI	667 015	1005	473	98	--	12	17	16
3	BORGOU	950 295	1051	286	141	3	6	20	25
4	DONGA	429 588	433	261	145	1	4	13	--
5	COLLINES	715 129	1003	141	327	--	10	26	--
6	ZOU	681 810	880	55	347	8	34	58	--
7	ATLANTIQUE	1 123 630	241	448	497	13	59	53	--
8	COUFFO	626 844	451	137	398	1	4	47	--

9	MONO	416 842	249	113	341	--	32	32	--
10	OUEME	856 815	455	31	245	71	7	23	--
11	PLATEAU	493 954	463	63	390	--	23	36	--
TOTAL		**7 634 430**	**7477**	**235 2**	**301 4**	**10 7**	**343**	**343**	**41**

B.F : Bornes fontaines ; PEA : Poste d'Eau Autonome ; P.M : Puits Modernes ; S.A : Source Aménagée ; F.P.M : Forages équipés de pompe manuelle ; A.E.V : Adduction d'Eau Villageoise ; F.C.P : Forages contre puits (étude de faisabilité des forages manuels p 17-18)

Annexe 4 : Pourcentages des localités desservies par PEA ou AEV en 2017



Figure 14 : Pourcentages des localités desservies par PEA ou AEV en 2017

Annexe 5 *: Rosace directionnelle des fractures révélées de la pénéplaine cristalline*

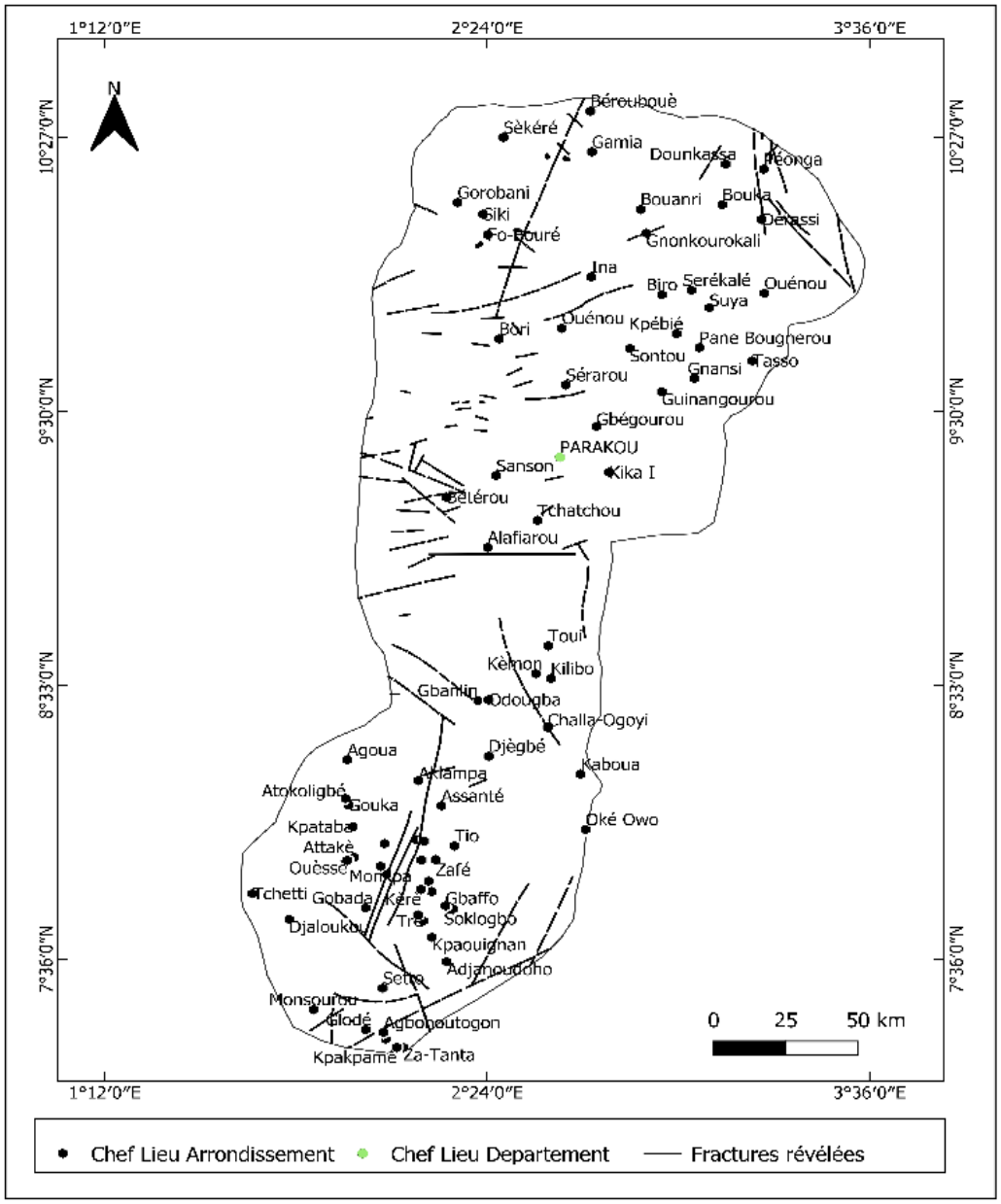


Figure 15 : Carte des fractures révélées de la pénéplaine cristalline (Institut Géographique National)

Annexe 6 : Quelques paramètres géologiques et leur influence

Le pourcentage d'influence de chaque paramètre est obtenu en multipliant le coefficient de pondération de chaque paramètre par 100%.

***Tableau VIII** : Récapitulatif des paramètres et leur influence*

Paramètres	Classe	Appréciation des classes	Notes	% d'influence
Pente	>4	Très faible	1	25%
	3-4	Faible	3	
	2-3	Moyen	5	
	1-2	Fort	7	
	0-1	Très fort	9	
Densité de Drainage	>20	Très faible	1	8 ,9%
	15-20	Faible	3	
	10-15	Moyen	5	
	5-10	Fort	7	
	<5	Très fort	9	
Densité de fracture	0-5	Très faible	1	5,4%
	5-10	Faible	3	
	10-15	Moyen	5	
	15-20	Fort	7	
	>20	Très fort	9	
Lithologie	Migmatite, Quartzite, Schiste	Faible	1	3,3%
	Gneiss	Moyen	5	
	Granite, Microgranite	fort	7	
	Continental terminal, crétacé supérieur	Très fort	9	

Occupation du Sol	Savanes, Surface rocheuse, sols érodés et dénudés, Habitation	Très faible	1	15%
	Forêt dense	Faible	3	
	Forêt claire	Moyen	5	
	Culture	fort	7	
	Plan d'eau	Très fort	9	
Type de Sol	Vertisols	Très faible	1	42%
	Sols minéraux	Faible	3	
	Sols peu évolués	Moyen	5	
	Sols ferrallitiques, Sols ferrugineux	Fort	7	
	Sols hydromorphes	Très fort	9	

Annexe 7 : Relation entre débits et nature lithologique des roches et classification des débits selon Lasm.

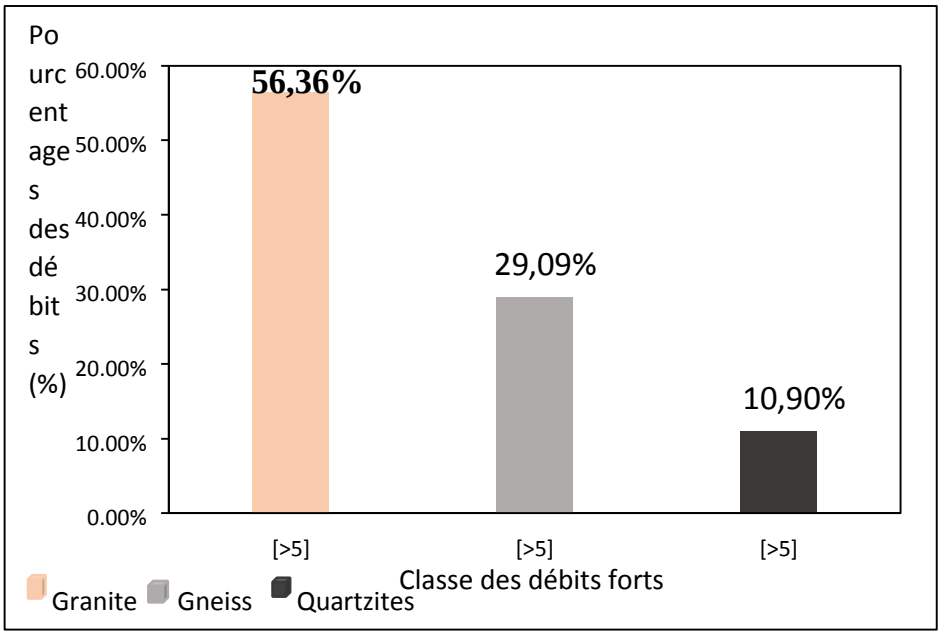


Figure 16 : Relation entre débit et nature lithologique des roches

***Tableau IX** : Classification des débits (selon Lasm)*

Débit	Classes
0 à 1 m^3/h	Très faible
1 à 2,5 m^3/h	Faible
2,5 à 5 m^3/h	Moyen
>5 m^3/h	Fort

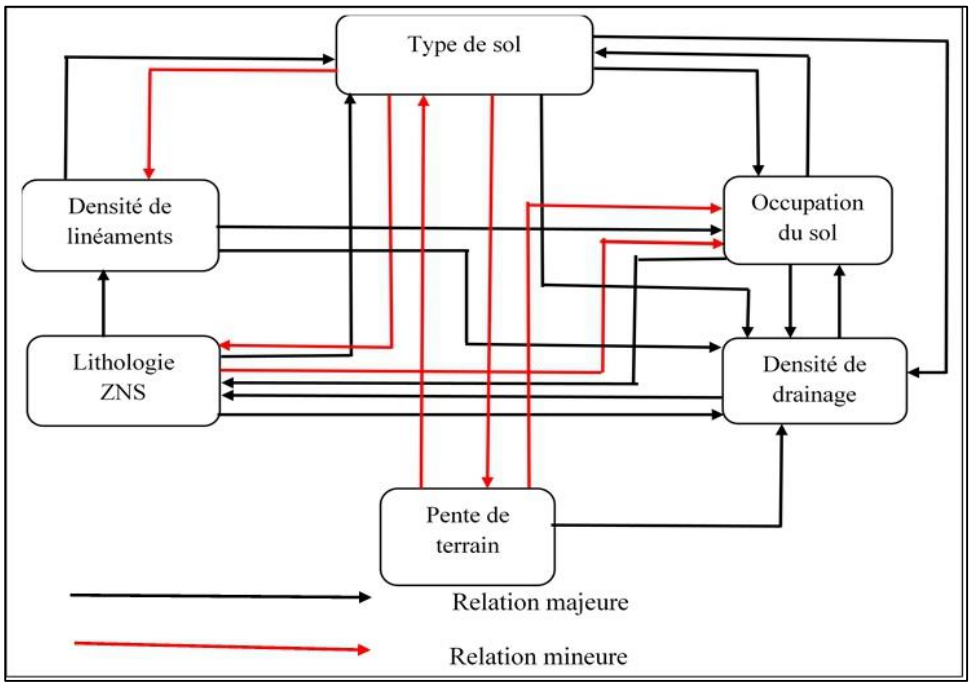


Figure 17 : Schéma synthétique montrant les relations d'interdépendance des paramètres influençant l'infiltration (Shaban et al. 2006, modifié)

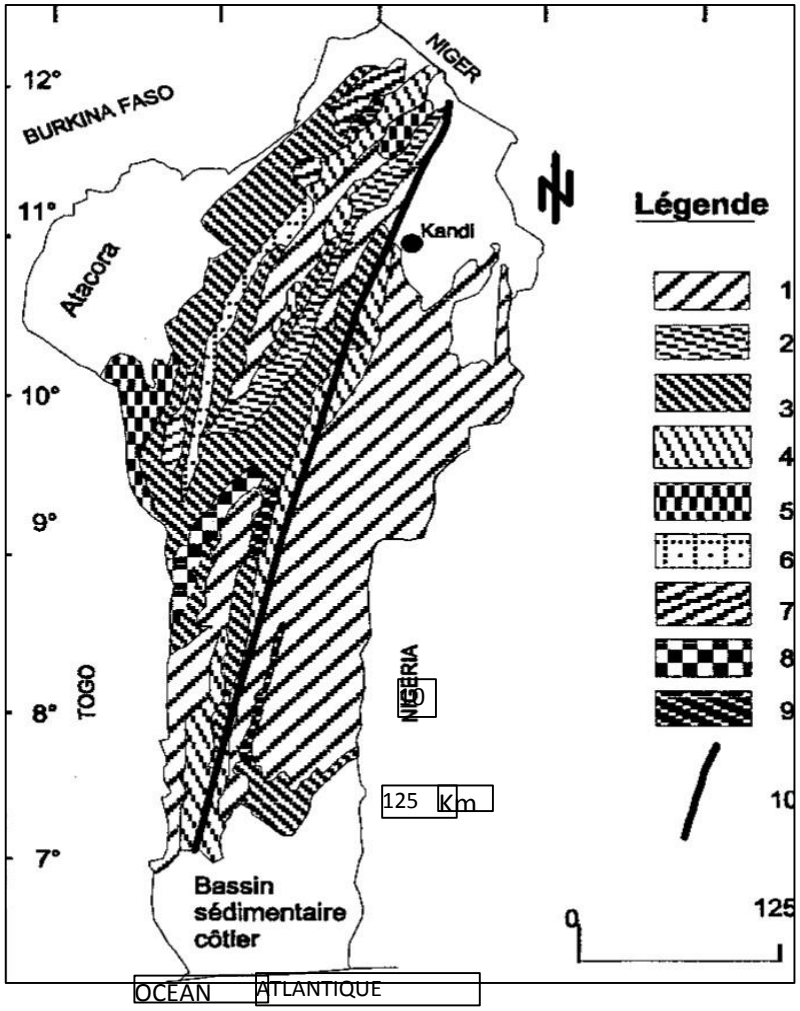


Figure 18 : Carte géologique du socle s.s. du Bénin

Carte géologique du socle s.s. du Bénin (Unité structurale de la plaine du Bénin). Socohou, inédit (d'après les travaux de Pougnet, 1955, Affaton, 1975, Boussari, 1975, TECHNOEXPORT, 1980 et 1984, BRGM, 1978, IRB, 1982 et 1987): 1- Migmatite indifférenciée ; 2- Paragneiss mylonitique de l'Alibori ; 3- Gneiss à grenat, biotite et sillimanite ; 4- Paragneiss à amphibole et biotite ; 5- Orthogneiss de Kara ; 6- Gneiss basal (Kabyè-Dérovarou) ; 7- C h arn. oindifférenciées ; 8- Migmatite de la zone axiale ; 9- Séries volcano-sédimentaires. 10- Grande faille de Kandi.

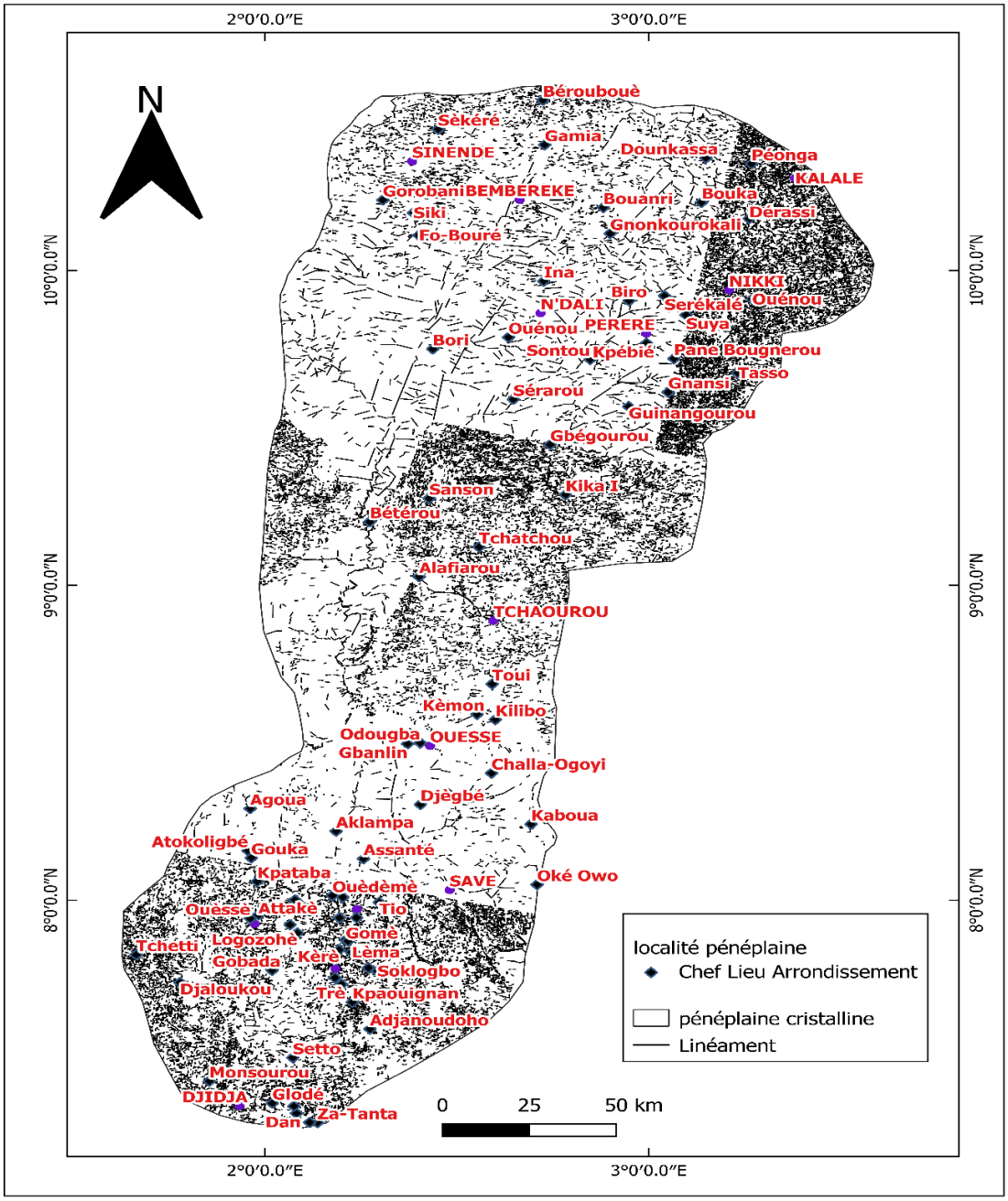


Figure 19 : Carte des linéaments

Annexe 8 : Classification hydrogéologique des types d'occupation du sol

***Tableau X** : Caractéristiques hydrogéologiques des types d'occupation du sol*

Unités	Description	Propriété hydrogéologique
Forêt dense	La forêt dense favorise l'infiltration de par le confinement de l'eau dans la zone végétale Cependant une grande partie de cette eau est perdue par évapotranspiration, son rôle est donc limité dans le processus de recharge des aquifères	Bonne
Forêt claire	Cette unité est caractérise par une forte dispersion de la couverture végétale, elle est plus favorable au processus de recharge des aquifères en raison d'une perte limitée de l'eau par évapotranspiration	Très bonne
Cultures	Les cultures lorsqu'elles ne sont pas intensives améliorent la recharge des aquifères en raison de la perte limitée par évapotranspiration. Dans la zone d'étude, les cultures sont très dispersées, ces zones sont donc favorables aux processus de recharge de même que la forêt claire.	Très bonne
Sols-nus_ zones_habi-tées	Cette unité représente les surfaces imperméables (routes, habitats, zones industrielles, affleurements, etc.) qui retardent considérablement la recharge des aquifères en raison de la prépondérance du ruissellement.	Mauvaise
eau	Cette unité représente les cours d'eau permanents (rivières et fleuves), ces cours d'eau alimentent les aquifères (en fonction des saisons).	Excellente