



**APPORT DU SIG ET DE L'ANALYSE
MULTICRITERE À L'ESTIMATION DES ZONES DE
RECHARGE PRÉFÉRENTIELLE EN ZONE DE SOCLE
(BURKINA FASO)**

**MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER**

**SPÉCIALITÉ : GÉNIE DE L'EAU, DE L'ASSAINISSEMENT ET DES
AMENAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES**

Présenté et soutenu publiquement le 31 Janvier 2022 par

Levy Stéphane BANDRE

(20160008)



**Directeur de mémoire : Dr. Mahamadou KOITA, Maître de Conférences, Enseignant-
Chercheur en Hydrogéologie**

**Encadrant 2iE : Dr. Mahamadou KOITA, Maître de Conférences, Enseignant-
Chercheur en Hydrogéologie**

**Maîtres de stage : Ing. Johan DEROUANE, Expert Senior en Hydrogéologie à
SHER**

**Dr. Elie Serge Gaëtan SAURET, Hydrogéologue et
environnementaliste, chargé de recherche à INERA/CNRST**

Structure d'accueil du stage : Société pour l'Hydraulique, l'Environnement et la Réhabilitation (SHER)

Jury d'évaluation du stage :

**Président : Pr. Hamma Yacouba, Professeur Titulaire, Enseignant-
Chercheur en Hydro-climatologie et en Agronomie (2iE)**

**Membres et correcteurs : Dr. Hamma Fabien Yonli, Enseignant-Chercheur en
Hydrogéologie à l'Ecole Supérieure d'Ingénierie, Université
de Fada N'gourma**

Mr. Sina Thiam, Expert en BD/SIG (2iE)



Promotion [2021/2022]

DEDICACES

*Au Seigneur Dieu Tout-Puissant, source de toute connaissance et origine du savoir,
l'auteur de ma réussite.*

*A mes très chers parents, pour leur amour inestimable, leurs sacrifices, leur soutien et
toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.*

A mes chers frères et à ma sœur, source de motivation et de joie.

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais tout d'abord remercier l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'environnement pour la qualité de la formation et les compétences que j'ai acquises à l'issue de ce cycle d'ingénieur. Je pense spécialement à tous les enseignants pour la qualité de l'enseignement qu'ils m'ont dispensé au cours de ces cinq années passées à l'Institut 2IE.

Mes remerciements vont ensuite à l'endroit du directeur de ce mémoire Dr. Mahamadou KOÏTA, pour son accompagnement, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Sa rigueur scientifique et ses remarques ont été utiles pour la qualité de ce travail.

J'adresse mes remerciements au Responsable et au personnel du groupement SHER/ARTELIA, Monsieur Johan DEROUANE, Monsieur Karim TRAORE, Monsieur Elie SAURET, Madame Aminata MASSEBE, Madame Martine KABORE ; pour cette opportunité qu'ils m'ont offert de passer le stage ainsi que pour le traitement dont j'ai bénéficié dans ses installations ; j'étais très à l'aise et tout le personnel s'est montré très coopératif à mon égard.

J'exprime ma profonde gratitude à Messieurs Johan DEROUANE et Elie SAURET, maitres de stage et encadreurs externes du présent mémoire pour la proposition du thème, la provision des données relatives à ce dernier. Leur rigueur scientifique, leurs critiques et suggestions très constructives m'ont été d'un grand atout pour mon expérience dans la recherche scientifique.

J'exprime aussi ma reconnaissance envers le président du jury de la soutenance de ce mémoire Pr. Hamma Yacouba ainsi qu'aux rapporteurs Dr. Hamma Fabien Yonli et Mr. Sina Thiam pour leurs remarques et suggestions en vue de l'amélioration du présent document.

Mes remerciements vont également à l'endroit du doctorant Succès F.M KUTANGILA pour avoir consacré son temps à réviser ce travail afin d'y apporter des remarques et suggestions très pertinentes.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers tous mes amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel.

Un grand merci à ma famille biologique : mon père, ma mère, ma sœur et mes frères pour leur amour, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel, à la fois moral et économique, qui m'ont permis de réaliser les études que je voulais et par conséquent ce mémoire.

RESUME

Au Burkina Faso, la gestion des ressources en eau est un enjeu environnemental et socio-économique majeur. La zone de socle, au Burkina Faso, souffre d'un manque d'informations fiables pour aider à la gestion des ressources en eau et à la prise de décision. La présente étude vise à délimiter et cartographier les zones de recharge préférentielle dans la zone de socle à l'aide des outils mathématiques et de SIG .

L'approche méthodologique a consisté dans un premier temps à sélectionner les facteurs influençant la recharge dans un aquifère du socle cristallin fracturé tels que le type de sol, l'occupation du sol, l'épaisseur d'altération, la densité de fracturation , la pente et la densité de drainage, l'eau utile. Des couches thématiques pour chaque facteur ont été intégrées dans le logiciel QGIS puis ont été rastérisées et rééchantillonnées à l'aide de la fonction de projection d'enveloppe de QGIS. Une reclassification dans QGIS a été effectuée pour réaligner les classes de facteurs sur une échelle cohérente, et un reclassement sur une échelle de 1 à 5 a été effectué pour harmoniser les résultats. Dans un second temps, ces données sont standardisées puis combinées à travers une analyse multicritère pour faciliter l'analyse spatiale et l'identification des zones de recharge préférentielle dans la zone de socle. Les zones de recharge préférentielle ont été classées en quatre classes, excellentes, bonnes, médiocres et mauvaises. La carte résultante a été vérifiée à l'aide des données des débits des forages et ont montré une relative cohérence avec les interprétations. Les résultats indiquent que les zones de recharge préférentielle excellentes et bonnes représentent respectivement environ 2,79% et 18,31% de la superficie totale de la zone d'étude. Elles sont localisées majoritairement au sud et à l'ouest et apparaissent de manière fragmentée à l'est de la zone d'étude.

Mots Clés :

- 1 – Analyse multicritère**
- 2 – Hydrogéologie**
- 3 – Système d'information géographique**
- 4 – Zones de recharge préférentielle**
- 5 – Zone de socle**

ABSTRACT

In Burkina Faso, water resource management is a major environmental and socio-economic issue. The basement zone in Burkina Faso suffers from a lack of reliable information to assist in water resource management and decision making. The present study aims to delineate and map the preferential recharge areas in the basement zone using mathematical and GIS tools.

The methodological approach consisted in first selecting the factors influencing recharge in a fractured crystalline basement aquifer such as soil type, land use, alteration thickness, fracture density, slope and drainage density, useful water. Thematic layers for each factor were integrated into QGIS and then rasterized and resampled using the QGIS envelope projection function. A reclassification in QGIS was performed to realign the factor classes to a consistent scale, and a reclassification to a scale of 1 to 5 was performed to harmonize the results. In a second step, these data are standardized and then combined through a multi-criteria analysis to facilitate spatial analysis and identification of preferential recharge areas in the basement area. Preferential recharge areas were classified into four classes, excellent, good, mediocre and poor. The resulting map was verified with borehole flow data and showed relative consistency with the interpretations. The results indicate that the areas of excellent and good preferential recharge represent about 2.79% and 18.31% of the total area of the study area respectively. They are mostly located to the south and west and appear fragmented to the east of the study area.

Keys words :

- 1 – Basement area**
- 2 – Hydrogeology**
- 3 – Geographic information system**
- 4 – Multi-criteria analysis**
- 5 – Preferential recharge zones**

LISTE DES ABBREVIATIONS ET SIGLES

AHP	Analytical Hierarchy Process
ANAM	Agence Nationale de la Météorologie
BF	Burkina Faso
BUMIGEB	Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso
CEFIGRE	Centre de Formation International à la Gestion des Ressources en Eau
DEIE	Direction des Études et de l'Information sur l'Eau
FAO	Food and Agriculture Organisation
FLDAS	Famine Land Data Assimilation System
HWSD	Harmonized World Soil Database
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OMES	Ouvrages de Mobilisation d'Eau Souterraine
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
ONU	Organisation des Nations Unies
PAEA	Programme d'Approvisionnement en Eau et d'Assainissement
PADSEM	Projet d'Appui au Développement du Secteur Minier
PAGIRE	Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PIB	Produit Intérieur Brut
QGIS	Quantum Geographic Information System
SIG	Système d'Information Géographique
UTM	Universal Transverse Mercator

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION	5
II.	OBJECTIFS DU TRAVAIL.....	7
III.	MATERIELS ET METHODES.....	8
III.1	Cadre général de la zone d'étude.....	8
III.1.1	Situation géographique.....	8
III.1.2	Relief et végétation.....	9
III.1.3	Contexte climatique.....	9
III.1.4	Contexte géologique.....	10
III.1.5	Contexte hydrogéologique	11
III.1.6	Réseau hydrographique	13
III.1.7	Vie socio-économique.....	13
III.1.8	Alimentation en eau des populations	13
III.2	Données et matériels.....	14
III.2.1	Acquisition des données.....	14
III.2.2	Logiciels et matériels informatiques utilisés	16
III.3	Méthodes	16
III.3.1	Identification et élaboration des critères de décisions.....	16
III.3.2	Cartographie des zones de recharge préférentielle à l'aide des techniques de l'analyse multicritère.....	22
III.3.3	Validation de la carte des zones de recharge préférentielle	28
IV.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	31
IV.1	Identification et élaboration des critères de décisions	31
IV.2	Cartographie des zones de recharge préférentielle à l'aide des techniques de l'analyse multicritère	40
IV.2.1	Standardisation des critères	40
IV.2.2	Pondération des critères	45

IV.2.3	Combinaison et production de la carte résultante.	49
IV.2.4	Comparaison des trois cartes résultantes.....	53
IV.3	Validation de la carte des zones de recharge préférentielle.....	54
IV.3.1	Résultats de la méthode de superposition par les débits de forage	54
IV.3.2	Résultats de la méthode de l'analyse de l'incertitude	55
IV.4	Discussion des résultats obtenus.....	56
V.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	58
VI.	RECOMMANDATIONS.....	60
VII.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
	ANNEXES	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone d'étude	8
Figure 2: Zones climatiques du Burkina Faso (Ibrahim, 2012).	10
Figure 3: Grands ensembles géologiques du Burkina Faso	11
Figure 4: Modèle conceptuel stratiforme de la structure hydrogéologique des aquifères de socle (Wyns et al, 2002)	12
Figure 5: Comparaison du poids des critères les plus élevés en fonction des auteurs	25
Figure 6: Synthèse méthodologique de la réalisation de la carte des zones de recharge préférentielle en zone de socle	30
Figure 7: Carte de la densité de fracturation de la zone de socle	32
Figure 8: Carte de la densité de drainage de la zone de socle	33
Figure 9: Carte de l'occupation du sol de la zone de socle.....	35
Figure 10: Carte de la pente de la zone de socle	36
Figure 11: Carte de l'épaisseur d'altération de la zone de socle	37
Figure 12: Carte du type de sol de la zone de socle	39
Figure 13: Carte de l'eau utile de la zone de socle	40
Figure 14: Débits d'exploitation en fonction de l'épaisseur d'altération.....	42
Figure 15: Variation des débits moyens par classe d'épaisseur d'altération	43
Figure 16: Carte des zones de recharge préférentielle	51
Figure 17: Carte des zones de recharge liée intrinsèquement au milieu biophysique.....	52
Figure 18: Carte des zones de recharge liés intrinsèquement au milieu biophysique combinée à la carte de l'eau utile	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Revue documentaire pour la sélection des facteurs	18
Tableau 2: Échelle d'évaluation des différents paramètres vis-à-vis de l'infiltration (HAOUCHINE et al., 2010).....	23
Tableau 3: Echelle numérique de comparaison binaire (Saaty, 1984).....	24
Tableau 4: Valeur de l'Indice Aléatoire (IA) (Saaty, 1990).....	27
Tableau 5: Récapitulatif de la standardisation des critères	44
Tableau 6: Matrice de comparaison par paire	45
Tableau 7: Valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération	45
Tableau 8: Première étape du calcul du ratio de cohérence	46
Tableau 9: Deuxième étape du calcul du ratio de cohérence	47
Tableau 10: Troisième étape du calcul du ratio de cohérence	47
Tableau 11: Tableau récapitulatif du calcul des poids des critères	48
Tableau 12: Tableau récapitulatif du calcul du ratio de cohérence	49
Tableau 13: Nombre de forages par classe de sensibilité.....	54
Tableau 14: Pourcentage d'une classe de débit se superposant à une classe de sensibilité	55
Tableau 15: Récapitulatif des calculs des paramètres de l'analyse de l'incertitude.....	55

I. INTRODUCTION

Les ressources en eau jouent un rôle indispensable pour les activités de l'Homme. Les eaux souterraines jouent un rôle clé en tant que partie intégrante des stratégies nationales de gestion de l'eau dans de nombreux pays du monde. C'est une ressource importante pour la sécurité alimentaire, la santé humaine, la prospérité économique et sociale de l'humanité. C'est la plus grande source d'eau douce disponible située sous le sol (Gleeson et al. 2016). Dans les régions sèches du monde, les eaux souterraines sont un élément clé des plans et stratégies de gestion durable de l'eau, car les ressources en eau sont très rares dans ces régions. Pays sahélien situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest, le Burkina Faso est un pays enclavé et en voie de développement. Il connaît un problème d'eau persistant. Environ 80% du pays est couvert par le socle cristallin.

La connaissance des ressources en eau souterraine est primordiale dans la gestion durable des ressources en eau, car elle permet d'identifier les zones d'un aquifère qui sont vulnérables à la contamination, de déterminer son potentiel d'exploitation et d'évaluer la pérennité de la ressource en eau (Scanlon, et al., 2002). Cependant, la recharge demeure sans doute la composante de l'écoulement souterrain la plus difficile à quantifier, à la fois dans l'espace et dans le temps en raison de sa variabilité (Lerner et al, 1990). Les mécanismes de recharge de la plupart des aquifères restent mal compris, y compris les zones de recharge potentielles de la plupart des aquifères. De plus, la connaissance de l'étendue et des facteurs de contrôle de la recharge des eaux souterraines dans la plupart des aquifères est très spécifique à la zone. A ce jour il n'existe aucune méthode universelle applicable pour estimer la recharge des aquifères. En effet, plusieurs méthodes d'estimation de la recharge sont disponibles dans la littérature. Elles sont basées sur des approches hydrauliques, isotopiques, thermiques, numériques, etc. (Sharma et al. 1980 ; Allison, 1988 ; Lerner et al. 1990 ; Solomon et al, 1993 ; Lerner, 1997 ; Simmers, 1997 ; 2002 ; Healy et Cook, 2002).

La détermination des zones de recharge des eaux souterraines est donc au centre des efforts visant à trouver des solutions adéquates à la pénurie d'eau, à la gestion des ressources en eau souterraine et à la gouvernance pour le développement durable. Toute prise de décision nécessitera une connaissance suffisante et fiable de la localisation et de la quantité des ressources en eau de surface et souterraines disponibles. Face à cette situation, et pour apporter une réponse à cette problématique majeure, le Gouvernement du Burkina Faso a mis en place, avec l'appui de la Banque Mondiale, le Programme d'Approvisionnement en Eau et

d'Assainissement (PAEA). L'objectif du PAEA est d'améliorer l'accès aux services d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement au BF dont l'amélioration de l'accès à des informations fiables sur les ressources en eau. Il vient en appui aux priorités nationales en termes de ressources en eau définies dans le Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PN)-GIRE 2016-2030. Ce Programme vise d'une part à renforcer la GIRE en termes de connaissances et de suivi des eaux de surface et souterraine, et d'autre part à opérationnaliser le Système National d'Information sur l'Eau.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de ces travaux préliminaires. L'objectif de cette étude est de coupler les outils d'analyse SIG et mathématiques applicable à l'hydrogéologie afin d'identifier et cartographier les zones de recharge préférentielle en zone de socle au Burkina Faso. En effet, les techniques spatiales ont l'avantage de couvrir des superficies de plusieurs centaines ou milliers de km² pour des coûts faibles, permettant ainsi d'appréhender la variabilité spatiale de la recharge contrairement aux approches expérimentales (hydrauliques, isotopiques et thermiques) qui sont des études locales et très onéreuses. Ces techniques s'adaptent parfaitement à notre zone d'étude qui a une superficie d'environ 219 000 km². Cette approche permet d'accéder aux informations importantes sur la distribution spatiale de la recharge dans la zone d'étude. En dehors du Burkina Faso, des techniques de SIG ont été utilisées pour intégrer diverses données géologiques, hydrogéologiques, topographiques et météorologiques afin de délimiter les zones potentielles de recharge des eaux souterraines (Kuruppath, et Kannan 2017; Ahmed, Alrajhi, et Alquwaizany 2021; Al-Djazouli et al. 2021 ; Benjmel et al. 2020; Kumar, Mondal, et Ahmed 2020; Lentswe et Molwalefhe 2020; Mokadem et al. 2018; Mussa, Mjemah, et Machunda 2020; Oularé et al. 2017 ; Ranasinghe-Arachchilage, Alrajhi, et Hewa 2021; Siddi Raju, Sudarsana Raju, et Rajasekhar 2019). Dans ces études précédentes, les techniques de SIG se sont avérées utiles pour l'évaluation et la surveillance des ressources en eau. Il est clair que les techniques de SIG couplées à l'analyse multicritère sont capables de fournir des tendances à la fois spatiales et temporelles des changements dans les zones de recharge. La méthodologie est essentiellement basée sur la description, la classification et la combinaison des principaux facteurs influençant la recharge en milieu de socle fracturé.

II. OBJECTIFS DU TRAVAIL

L'objectif général de cette étude est de coupler les outils d'analyse SIG et mathématiques applicable à l'hydrogéologie afin d'identifier et cartographier les zones recharge préférentielle en zone de socle au Burkina Faso.

Spécifiquement, elle consistera à :

- Identifier et élaborer les facteurs expliquant/contrôlant la recharge en zone de socle,
- Cartographier les zones de recharge préférentielle en zone de socle à l'aide des techniques de l'analyse multicritère,
- Valider la carte des zones de recharge préférentielle

Ce travail se subdivise en deux grandes parties :

- La première partie portera sur les généralités de la zone d'étude, le matériel utilisé ainsi que la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs fixés ;
- La deuxième partie consistera à mener une analyse des résultats obtenus ainsi qu'une discussion sur ces derniers.

III. MATERIELS ET METHODES

III.1 Cadre général de la zone d'étude

III.1.1 Situation géographique

La zone d'étude est la zone de socle du Burkina Faso. Elle a une superficie d'environ 219 000 km², soit 80% de la superficie totale du pays. Cette zone traverse plusieurs régions du pays notamment le Centre-Nord, le Sud-Ouest, les Cascades, le Sud-Ouest, le Centre-Ouest, le Centre-Est ; le Plateau Central, une partie du Sahel, de la Boucle du Mouhoun, des Hauts-Bassins et de l'Est. (Figure 1)

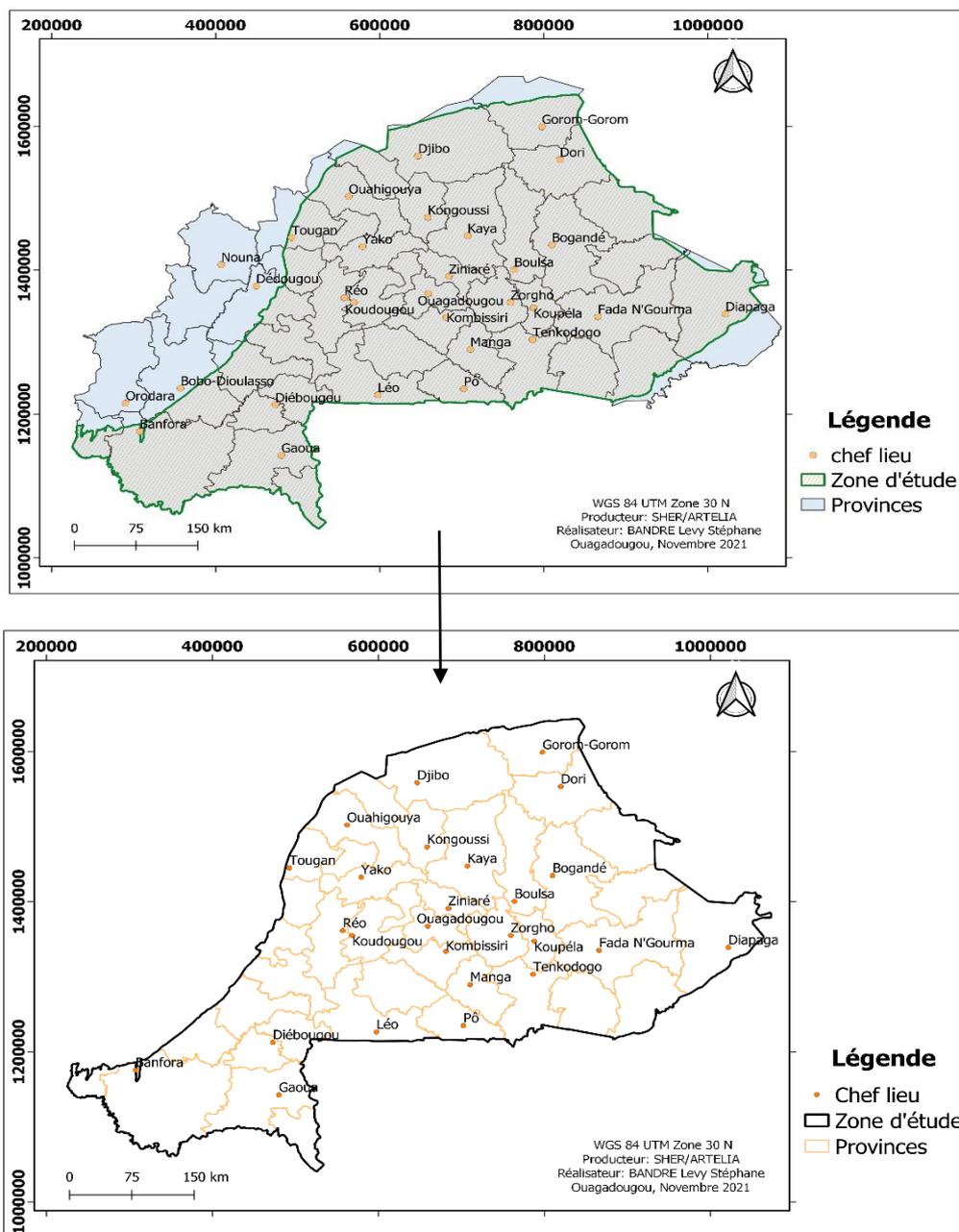


Figure 1: Localisation de la zone d'étude

III.1.2 Relief et végétation

Le relief du Burkina Faso est essentiellement plat. Une pénéplaine est observée au nord et à l'est, à la limite du Sahel. Par ailleurs, un relief de massifs montagneux coupés de falaises est identifié vers le sud-ouest.

La végétation de la zone d'étude est caractérisée par la prédominance de steppes, savanes et forêts claires (Akoudjin et al. 2016).

- Au nord le domaine sahélien se caractérise par une végétation arbustive plus ou moins rabougrie. L'extrême nord est dominé par la brousse tigrée et les baobabs.
- Le domaine soudanien constitue le principal couvert végétal de la zone d'étude. On y retrouve une savane arborée qui va en s'éclaircissant et en diminuant vers le nord. Les arbres ont moins de 10 mètres de hauteur.
- Le domaine soudano-guinéen est localisé dans le sud-ouest du pays et bénéficie des précipitations les plus abondantes. On y retrouve une forêt claire avec des arbres d'une hauteur de 15 à 20 mètres. Près des cours d'eau se développent les forêts-galeries.

III.1.3 Contexte climatique

Le climat de la zone d'étude est caractérisé par des variations pluviométriques considérables allant d'une moyenne de 350 mm au nord à une moyenne de plus de 1000 mm au sud-ouest. Il est distingué deux saisons : sèche de 8 à 9 mois (octobre à avril) et humide de 3 à 4 mois (mai à septembre).

Du Nord au Sud, on distingue trois zones climatiques (Zones climatiques du Burkina Faso (Ibrahim, 2012). (Figure 2) (Dipama, 2005).

- La zone sahélienne, située au-dessus du parallèle 14°N, avec une pluviométrie annuelle moyenne inférieure à 600 mm. Les pluies y durent environ 3 mois.
- La zone soudano-sahélienne, située entre les parallèles 11°30' et 14°N, avec une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 600 et 900 mm. Les pluies y durent 4 à 5 mois.
- La zone soudanienne, située au sud du parallèle 11°30'N, avec une pluviométrie annuelle moyenne supérieure à 900 mm. Les pluies y durent 6 à 7 mois.

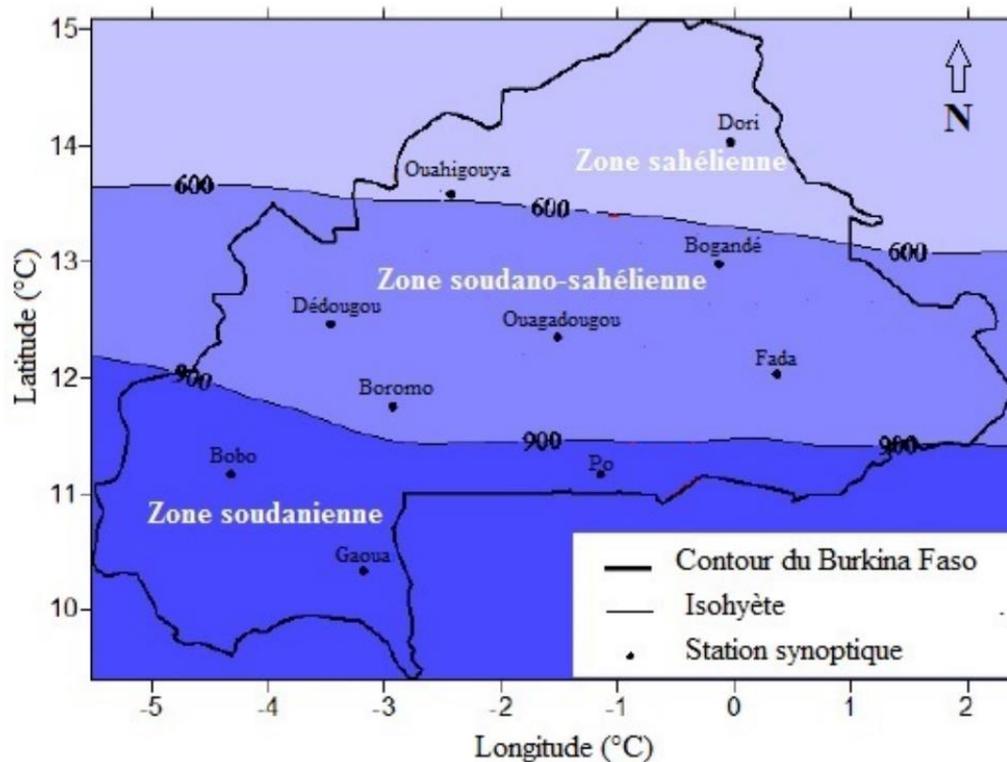


Figure 2: Zones climatiques du Burkina Faso (Ibrahim, 2012).

III.1.4 Contexte géologique

Au Burkina Faso, l'occurrence des eaux souterraines reste intrinsèquement liée à la géologie, laquelle est constituée de deux ensembles géologiques : la zone de socle et la zone sédimentaire. La géologie de la zone d'étude représente la zone de socle (Sauret, 2008).

La zone de socle est constituée de formations cristallines d'âge du Précambrien C (Birrimien) et D (Antébirrimien) qui recouvrent plus de 80 % de la superficie du pays. A l'Est, ces formations sont recouvertes par les dépôts du Continental Terminal, tandis qu'au Sud-Ouest et au Sud, elles s'intègrent aux formations du Précambrien C et D du Ghana, de la Côte d'Ivoire et du Libéria.

Les formations d'âge du Précambrien D, ou Antébirrimiennes constituées de granites, migmatites et gneiss sont l'ossature de la majeure partie de la zone d'étude.

Les formations d'âge Précambrien C, ou Birrimiennes représentent les parties non érodées du remplissage de sillons ultracratoniques d'origine volcanique, pyroclastique et sédimentaire. Ces roches pendant leur mise en place ont subi plusieurs transformations rendant ainsi très complexes leurs compositions physico-chimiques d'où l'appellation volcano-sédimentaire. (Figure 3)

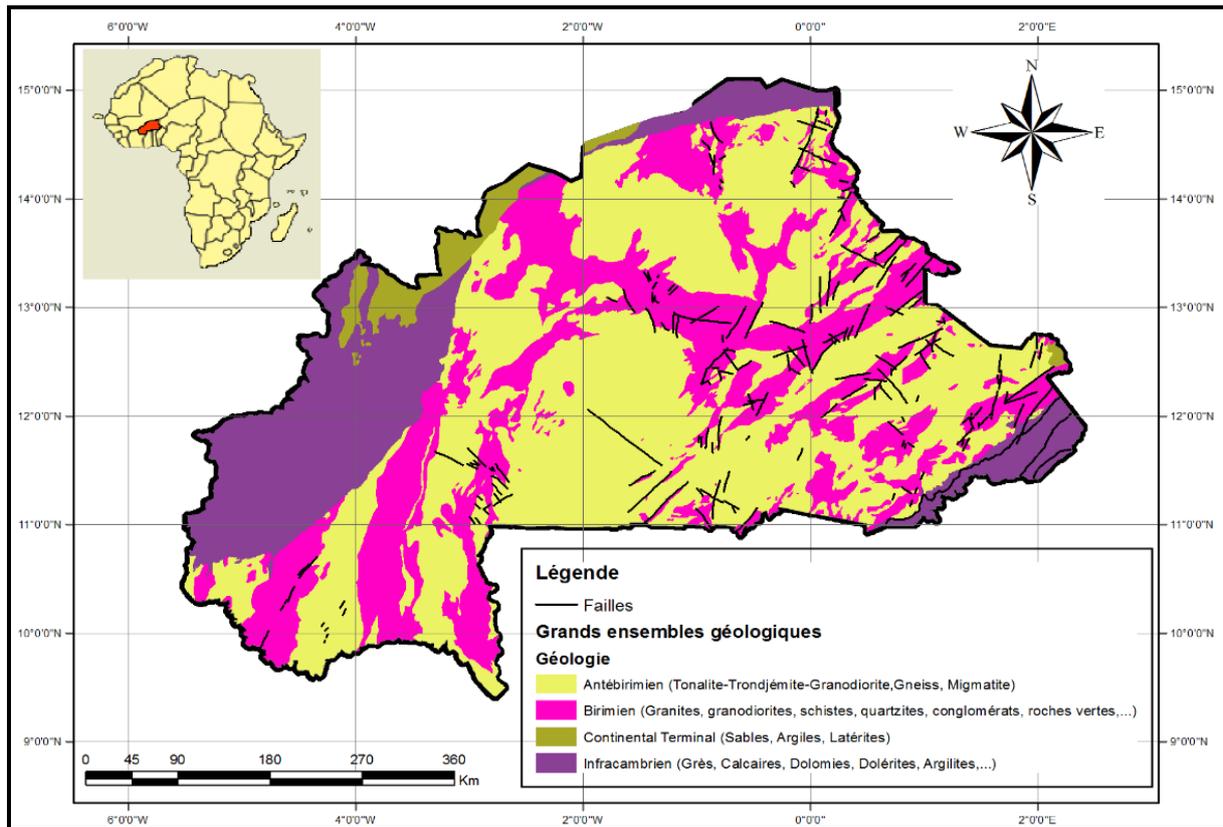


Figure 3: Grands ensembles géologiques du Burkina Faso (modifiée de Castaing et al., 2003)

III.1.5 Contexte hydrogéologique

La zone de socle du Burkina Faso est constituée d'un système aquifère fracturé. Un aquifère est une formation géologique qui peut contenir de l'eau puis la transmettre. Les aquifères du socle sont ceux des milieux fissurés, ceux de la zone altérée et ceux des altérites. Dans la quasi-totalité le socle est couvert d'environ 10 à 30 m d'altération et les débits varient de 0,5 à 5 m³/h en moyenne (Sanogo, 1997).

Les aquifères de socle se rencontrent dans les roches cristallines et métamorphiques. En suivant le profil vertical, on distingue les réservoirs des altérites et les réservoirs de fissures et/ou de fractures. Le modèle stratiforme de la structure hydrogéologique des aquifères de socle se présente selon la figure ci-dessous (Figure 4)

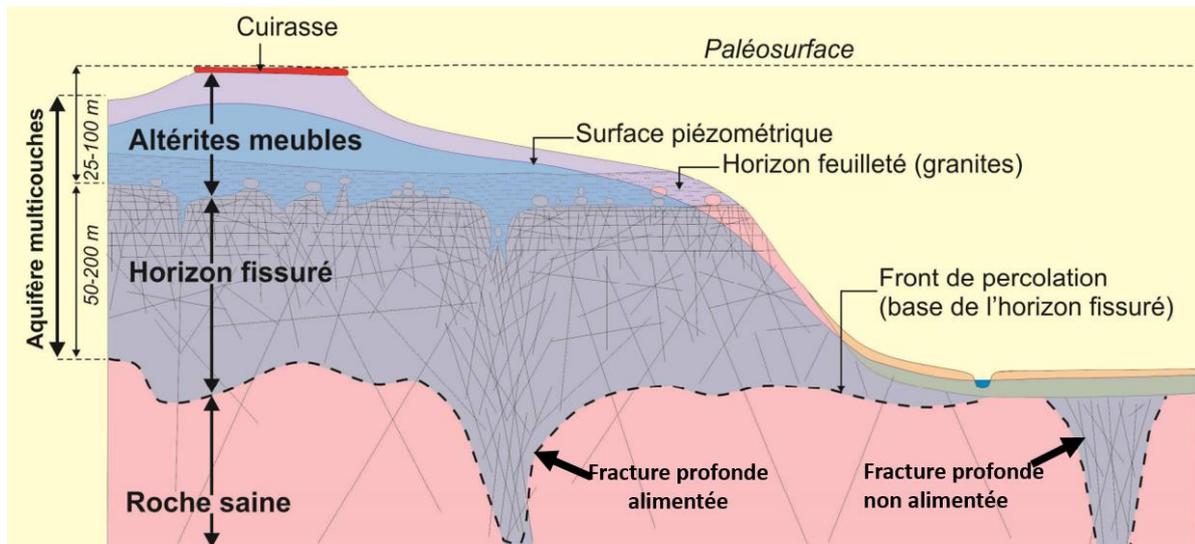


Figure 4: Modèle conceptuel stratiforme de la structure hydrogéologique des aquifères de socle (Wyns et al, 2002)

- **Les réservoirs des altérites**

Ils sont les mieux connus car ils servent d'alimentation en eau potable à travers les puits villageois. Les altérites constituent les produits d'altération de la roche mère et forment un épais manteau d'altération kaolinique (Tastet, 1979) recouvrant la majeure partie du socle sain. Les niveaux les plus productifs sont ceux qui sont situés le plus près de la roche saine. Leur importance et leur capacité de production dépendent de la nature lithologique sous-jacente. Les nappes latéritiques sur les granitoïdes sont moins développées que celles dérivant des formations schisteuses (Boukari et al., 1984). Les réserves d'eaux souterraines sont emmagasinées dans la partie supérieure altérée mais sont drainées par les fractures sous-jacentes ouvertes parfois sur de grandes profondeurs (Boukari et al., 1984). En saison sèche les puits superficiels au niveau de ces nappes tarissent par baisse du niveau piézométrique et seuls les puits profonds demeurent souvent productifs du fait de l'effet du drainage permanent sous-jacent.

- **Les réservoirs de fractures**

Ce sont des aquifères que l'on rencontre dans l'horizon fissuré du socle sain. Ils sont généralement parcourus par des réseaux de fractures kilométriques. Le socle peut être jalonné par des zones broyées qui ont une extension de quelques centaines de mètres. Ainsi ils deviennent le siège de circulation d'eau souterraine et d'eau de surface (CEFIGRE, 1992). Les débits d'exploitations sont souvent plus faibles que ceux des fractures ouvertes qui présentent une porosité verticale et latérale très grande. La plupart des forages dans les zones de socle au Burkina Faso, captent les aquifères de fracture. Les forages traversent la couche des altérites et

pénètrent dans la roche saine émaillée de fractures tectoniques profondes ou de fissures. Les fractures sont généralement très denses dans les premiers mètres ; elles sont subhorizontales et subverticales mais diminuent avec la profondeur (Cho *et al.* 2003, Maréchal *et al.*, Wyns *et al.* 2004). Les eaux de ces réservoirs contrairement à celles des réservoirs d'altérites sont souvent à l'abri de toute pollution et sont moins sensibles aux baisses de niveau piézométrique : ce qui les rend très importantes dans l'alimentation en eau potable.

III.1.6 Réseau hydrographique

La zone d'étude a un réseau hydrographique important malgré un climat sec. Les cours d'eau se rattachent à trois bassins internationaux qui sont les bassins de la Volta, de la Comoé et du Niger. Ces trois bassins sont eux-mêmes subdivisés en 4 bassins versants nationaux : le Nakanbé, le Mouhoun, le Niger et la Comoé. Enfin, à un niveau inférieur, ces 4 bassins nationaux sont subdivisés en 17 sous-bassins versants.

III.1.7 Vie socio-économique

Le Burkina Faso est un pays sahélien francophone et enclavé. Après l'indépendance en 1960 et changement du nom de la République de Haute-Volta en 1984, le pays est engagé dans un ambitieux programme d'amélioration socio-économique avec un agenda autonomiste.

Le Burkina Faso a une croissance démographique rapide de 5,2% en 2020. L'agriculture est l'occupation principale de la majeure partie de la population, mais ne représente plus qu'environ un tiers du PIB. L'élevage est important dans tout le pays. Les exportations de minéraux constituent désormais la principale exportation, remplaçant le coton qui dominait auparavant, notamment l'or, le cuivre, le fer et d'autres métaux.

III.1.8 Alimentation en eau des populations

Les eaux souterraines au Burkina Faso sont principalement utilisées pour l'approvisionnement en eau potable, en particulier pour les petits approvisionnements dans les zones rurales et les petites villes. La deuxième ville du pays, Bobo Dioulasso, située sur un aquifère sédimentaire modérément productif, dépend pour son approvisionnement des eaux souterraines. La capitale Ouagadougou, située sur l'aquifère à faible productivité du socle, dépend largement des eaux de surface, mais environ 15% de son approvisionnement en eau provient des eaux souterraines, ce qui est particulièrement important pendant la saison sèche (Obuobie et Barry, 2012).

Certaines eaux souterraines sont utilisées pour l'irrigation à petite échelle, par exemple en soutenant la culture de la saison sèche dans le sud. Elles sont également utilisées pour l'abreuvement du bétail. Le secteur d'industrie est le moindre utilisateur des eaux souterraines du pays (Obuobie et Barry, 2012).

Les prélèvements d'eau souterraine proviennent principalement de forages et de puits creusés à la main. Le nombre total estimé de forages au Burkina Faso était de 48 800 en 2015. La plupart des forages sont équipés de pompes : généralement mécanisées dans les zones urbaines et des pompes à main dans les zones rurales.

Les précipitations sont très variables, annuellement et spatialement. La plupart des besoins en eau sont satisfaits par les réservoirs de surface et l'irrigation par des barrages est encouragée par le gouvernement depuis 1973. La majeure partie du Burkina Faso repose sur des aquifères à faible productivité et l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation est minime. Bien que de nombreux problèmes subsistent dans les services d'approvisionnement en eau, le service public d'approvisionnement en eau (ONEA) a considérablement progressé au cours des dernières décennies : plus de 97% de la population urbaine ont accès à de l'eau potable.

La flambée des prix des produits alimentaires en 2008 a eu des répercussions à long terme sur les activités agricoles et, par conséquent, sur l'utilisation de l'eau, notamment en incitant le gouvernement à rétablir les subventions aux engrais et à contrôler les prix de certains produits.

III.2 Données et matériels

III.2.1 Acquisition des données

Une étude hydrogéologique des aquifères reflétant la réalité du terrain nécessite des données justes et fiables. Pour la réalisation de cette recherche, un recours à trois principaux types de données a été utilisé : les données hydrauliques, les données climatiques et les données cartographiques.

III.2.1.1 Données hydrauliques

Les paramètres des forages ont été recueillis auprès de la base de données OMES (Ouvrages de mobilisation d'Eau Souterraine) fourni la DEIE. Nous avons disposé de données complètes sur environ 19 000 ouvrages (forages). Les données recueillies pour chaque forage sont : la province, le département, le village, la nature de l'ouvrage (forage ou puits), ses coordonnées géographiques, la profondeur totale, l'épaisseur d'altération, le débit d'exploitation, le niveau statique.

III.2.1.2 Fonds cartographiques

Les cartes exploitées dans cette étude sont :

- La carte géologique et les failles/fractures du Burkina Faso obtenues auprès du BUMIGEB (Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso) réalisées respectivement aux échelles 1/1 000 000 et 1/200 000. La carte des fractures a été réalisée en 2018 dans le cadre du Projet d'Appui au Développement du Secteur minier (PADSEM).
- Les données climatiques sont utilisées pour l'évaluation de l'eau utile. Il s'agit de rasters de la pluviométrie et de l'évapotranspiration réelle (ETR) de FLDAS (Famine Land Data Assimilation System) de la période 1991 à 2020. FLDAS est un système d'assimilation des données terrestres de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et accessible au public via le lien (LIS ; <http://lis.gsfc.nasa.gov>). C'est un système qui permet de générer des ensembles d'humidité du sol, d'évapotranspiration et d'autres variables sur la base de plusieurs entrées météorologiques ou de modèles de surface. FLDAS couramment utilisé dans les régions semi-arides est conçu pour être utilisé dans les études hydro climatiques.
- La carte de types de sol fournie par la FAO HWSD (Harmonized World Soil Database) ; HWSD est une base de données mondiale sur les sols encadrée dans un système d'information géographique (SIG) et contient des informations à jour sur les ressources mondiales en sols. Cette base de données de pointe a été créée en juillet 2008 par l'IIASA (Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués) et la FAO (Food and Agriculture Organisation). Le HWSD est déjà largement utilisé comme ressource académique dans les universités et comme information de base dans les organisations internationales comme, l'ONU et la Banque mondiale pour améliorer les mesures de soutien technique aux pays en développement.
- La carte d'occupation de sol est obtenue à partir de la base de données de Copernicus Global Land Service via Google Earth Engine (GEE). Le produit Global Land Cover de Copernicus vise à fournir des couches d'occupation du sol qui permettent de créer des cartes personnalisées qui répondent aux besoins des différents utilisateurs de cartes. Il s'agit d'un raster de résolution 300 m de 2020 Sa fiabilité est entièrement démontrée dans les travaux à grande échelle (Buchhorn et al. 2020)
- Les données (y compris cartographiques) de base : limites administratives, localités, réseau hydrographique (tous plans d'eau y sont indiqués) ;

- L'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) obtenue sur le site Earth Explorer (USGS,) : son traitement a permis d'établir un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 30 m

III.2.2 Logiciels et matériels informatiques utilisés

L'essentiel du présent travail a été exécuté à l'aide d'un outil informatique et des logiciels. Tous les travaux de traitement des données ayant abouti à l'établissement des cartes et de l'analyse multicritère furent réalisés avec les logiciels QGIS 3.16 ; Excel 2019. Mais le logiciel QGIS 3.16 est le principal outil possédant les fonctions de croisement ou de combinaison de données à l'aide de ces programmes « interpolation » et « calculatrice raster » pour la production des cartes thématiques décrivant les zones aquifères préférentielles.

III.3 Méthodes

III.3.1 Identification et élaboration des critères de décisions

III.3.1.1 Identification des critères de décisions

La sélection des facteurs influençant les zones de recharge préférentielle est une phase décisive et délicate qui conditionne la qualité des informations générées en vue de la prise de décision. En fonction de la disponibilité des données et compte tenu du contexte climatique et géologique de la zone d'étude, et suite à un examen approfondi des travaux antérieurs de même nature, les facteurs clés à considérer pour déterminer les zones de recharge préférentielles dans la zone d'étude sont (Tableau 1) : le type de sols, le type d'occupation du sol, l'épaisseur d'altération (m), la densité de fracturation (km/km^2), la pente (%), l'eau utile (mm) et la densité de drainage (km/km^2).

- ***Pente***

La pente est l'angle entre le plan tangent et le plan horizontal en un point donné de la surface topographique, (Maidment,1993). La pente détermine la quantité d'infiltration et de ruissellement (Simmers, 1990). Les zones de pente faible retiennent les précipitations et permettent l'infiltration à travers le sol et finalement la recharge vers les aquifères. L'inverse est vrai pour les pentes plus fortes (Hendrickx 1992).

- ***Densité de drainage***

Le risque d'infiltration d'eau dans le système d'eau souterraine est plus élevé dans les zones où l'eau est drainée plus lentement que dans les zones à forte densité de drainage. Elle indique le taux de percolation de l'eau. Elle est proportionnelle au ruissellement superficiel. Une faible

densité de drainage améliore les perspectives de recharge et d'eaux souterraines (Shaban et al. 2006 ; Prasad et al. 2008 ; Selvam et al. 2014). Par conséquent, les zones à faible densité de drainage ont un potentiel de recharge des eaux souterraines élevé puisque le ruissellement est plus faible. Une densité de drainage plus élevée implique un ruissellement plus important et donc peu d'eau se retrouvera dans l'aquifère (Shaban, Khawlie, et Abdallah 2006).

- ***Densité de fracturation***

Les linéaments sont des expressions superficielles de la géologie sous-jacente et des caractéristiques structurales telles que des fractures, des failles (O'Leary et al., 1976). Les fractures forment ce qu'on appelle la porosité secondaire dans les aquifères de socle. La densité des fractures 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'infiltré (Krishnamurthy, 1996 ; Sener *et al.*, 2005). La densité des linéaments est l'un des facteurs d'influence les plus importants dans les aquifères du socle cristallin consolidés et fracturés.

- ***Type de sol***

L'importance du type de sol sur la recharge des eaux souterraines est basée sur la capacité d'infiltration. 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, on observe un taux d'infiltration élevé. (Rodhe et Bockgard 2006 ; Gleeson, 2009).

- ***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., 2003) en raison de la prépondérance du ruissellement. La couverture végétale, par contre améliore la recharge, car elle favorise le confinement de l'eau dans le sol empêchant ainsi l'évaporation directe.

- ***Épaisseur d'altération***

Les altérites sont des formations géologiques résultant de l'altération physico-chimique de la roche mère. Ces formations renferment souvent des réservoirs appelés aquifères d'altérites. En référence à d'autres études, certaines tranches d'épaisseur d'altérites sont propices à la recharge des eaux souterraines. Ainsi les zones de fortes épaisseurs d'altérites sont susceptibles

d'augurer la présence de réservoirs dans les aquifères de socle contrairement aux zones de faibles épaisseurs d'altérites (Sener, Davraz, et Ozcelik 2005).

- **Eau utile**

Encore appelée précipitations (pluies) efficaces, l'eau utile est égale à la différence entre les précipitations totales et l'évapotranspiration réelle (Castany, 1982). Elle se mesure selon une hauteur exprimée en millimètres. Des processus tels que les précipitations, l'évapotranspiration réelle peuvent contrôler la disponibilité de l'eau. Après un épisode pluvieux, une partie de l'eau tombée au sol retourne dans l'atmosphère par **évapotranspiration** (phénomène cumulant l'évaporation de l'eau et la transpiration des plantes) : elle ne bénéficie donc pas aux nappes souterraines. L'autre partie ruisselle - potentiellement vers les milieux - et s'infiltré dans le sol - et recharge potentiellement les nappes : elle constitue la **pluie efficace**. Comme mentionné précédemment, les précipitations sont alors une source de recharge des aquifères dans la zone d'étude. Le climat de la région est classé comme aride à semi-aride avec une forte variation des précipitations. Alors l'eau utile est un critère retenu.

Tableau 1: Revue documentaire pour la sélection des facteurs

Revue documentaire	Lith	GM	DF	DD	OC	EA	P	TS	G	PI	PS	H	TWI	PC	Dfa	DE
(Mussa et al. 2020)	•		•	•	•		•			•						
(Ahmed et al. 2021)	•		•	•	•		•			•						
(Al-Djazouli et al. 2021)	•		•	•	•		•			•						
(Lentswe et Molwalefhe 2020)	•		•		•	•		•								
(Haouchine et al. 2010)	•			•	•		•	•								

Apport du SIG et de l'analyse multicritère à l'estimation des zones de recharge préférentielle en zone de socle au Burkina Faso

Revue documentaire	Lith	GM	DF	DD	OC	EA	P	TS	G	PI	PS	H	TWI	PC	Dfa	DE
(Benjmel et al. 2020)	•		•	•			•						•		•	•
(Oularé et al. 2017)	•		•	•	•		•	•								
(Siddi Raju et al. 2019)		•	•		•		•	•	•	•	•	•				
(Kumar et al. 2020)		•	•	•	•		•	•	•							
(Fashae et al. 2013)		•	•	•	•		•	•	•	•						
(Das et Pardeshi 2018))	•	•	•	•	•		•	•		•						
(Ake et al. 2019)				•	•	•	•	•								

G = Géologie ; GM = Géomorphologie ; Ts = type de sol ; P = Pente ; PI = Pluie ; DD = densité de drainage ; DF = densité de fracturation ; TWI = indice d'humidité topographique ; OC = Occupation du sol ; PS = profondeur du sol ; H= hauteur ; PC= profil de courbure ; Dfa= Densité failles ; DE= Distance par rapport au cours d'eau ; Lith = Lithologie ; EA = Epaisseur d'altération.

III.3.1.2 Elaboration des critères de décisions

- **Etablissement de la carte de la densité de fracturation**

Pour la production et la visualisation de la carte de densité de fracturation, la base de données des failles/fractures fournie par le BUMIGEB a été valorisée. En effet, cette base fournit une carte des failles/ fractures au 1/200.000. La carte de densité de fracturation a été réalisée en

utilisant l'outil « line density » dans le logiciel QGIS. La carte de densité de fracturation (DF) a été générée par la formule suivante :

$$DF = \frac{\sum L_f}{A} \quad (1)$$

Avec,

DF = Densité de fracturation en km/km² ;

L_f = Longueur total des fractures en km ;

A = surface de la zone en km².

- ***Etablissement de la carte de la densité de drainage***

La densité de drainage est définie comme le rapport de la longueur totale des cours d'eau de la zone d'étude par rapport à la superficie de cette zone (km/km²) (RAMBERT, 1973). La cartographie et la visualisation de la carte de densité de drainage a été produite à partir du réseau hydrographique de la zone d'étude en utilisant l'outil « line density » dans le logiciel QGIS. La carte de densité de drainage (DD) a été générée par la formule suivante :

$$DD = \frac{\sum L_C}{A} \quad (2)$$

Avec,

DD = densité de drainage en km/Km² ;

L_C = Longueur total des cours d'eau en km ;

A = surface de la zone en km².

- ***Etablissement de la carte de l'occupation du sol***

La carte d'occupation du sol a été obtenue à partir de la base de données de Copernicus Global Land Service (CGLS). Le CGLS fournit une carte d'occupation du sol globale sous format raster de résolution 300 m de l'année 2020 illustrant des forêts, des prairies, des terres cultivées, des plans d'eau, des zones humides, zones habitées. Avec le logiciel QGIS on effectue un découpage pour extraire la carte d'occupation du sol de la zone d'étude.

- ***Etablissement de la carte de la pente***

La carte des pentes a été établie à partir du MNT du Burkina Faso issue des images satellitaires SRTM de résolution 30 m. La carte des pentes a été établie avec le logiciel Qgis 3.16 et exprimée en pourcentage. Avec le logiciel QGIS on effectue un découpage pour extraire la carte des pentes de la zone d'étude.

- ***Etablissement de la carte de l'épaisseur d'altération***

Pour réaliser la carte d'épaisseur des altérites, la base de données des forages, fournie par la Bd OMES a été valorisée. En effet, cette base fournit ponctuellement des ouvrages (forages), mais avec une représentativité spatiale jugée suffisante, des informations pertinentes sur les 100 premiers mètres sous la surface. Elle contient environ 19.000 ouvrages (forages) répartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Chaque forage est renseigné par un champ libellé « ep_alt » qui correspond à l'épaisseur résiduelle du profil d'altération allant jusqu'au toit de l'horizon fissuré.

La carte de l'épaisseur des altérites a été calculée par une interpolation par krigeage des données ponctuelles des forages d'eau. Le krigeage est une méthode d'estimation locale des valeurs d'une variable. Cette technique permet de minimiser l'erreur d'estimation et le résultat qu'elle fournit peut-être appréciée. Les bases conceptuelles du krigeage sont amplement développées dans les travaux de Razack (1984), Las (2000) et Youan Ta (2008).

- ***Etablissement de la carte du type de sol***

La carte de type de sol a également été obtenue à partir de la base de données Harmonized World Soil Database (HWSD). Le HWSD est composé d'un fichier image raster couvrant le territoire terrestre du globe de résolution 1 km. Le HWSD permet de voir les composants et les attributs du sol à un haut niveau de résolution spatiale à l'échelle mondiale. HWSD permet d'afficher ou d'interroger les compositions de sol en termes de paramètres de sol sélectionnés par l'utilisateur. À partir de cette carte, le paramètre « type de sols » a été cartographié en effectuant un découpage pour extraire la carte du type de sol de la zone d'étude.

- ***Etablissement de la carte de l'eau utile***

Les pluies (ou précipitations) efficaces sont égales à la différence entre les précipitations totales et l'évapotranspiration réelle. Pour cette étude, les données de la pluie satellitaire et l'évapotranspiration réelle à accès libre sur Google Earth Engine en images raster ont été utilisées. La bonne corrélation entre les données de la pluviométrie de l'ANAM et de celle de FLDAS confirme la fiabilité des données de FLDAS (Annexe 1). On génère des rasters mensuels sur 1991-2020 soit 30 ans pour la pluie et l'évapotranspiration réelle. Ensuite ces rasters sont utilisés pour calculer une année moyenne interannuelle 1991-2020 et donc l'eau utile.

Ces rasters initiaux sont en Kg/m²/s. Afin qu'ils soient en millimètres dans les mêmes unités de calcul, une conversation fut jugée nécessaire. D'où la multiplication des rasters par 86400*30.5

(86400 est le nombre de secondes dans un jour et 30.5 est une approximation du nombre de jours dans un mois puisqu'il y a des mois avec 30 et 31 jours).

III.3.2 Cartographie des zones de recharge préférentielle à l'aide des techniques de l'analyse multicritère

III.3.2.1 Reclassification et standardisation des critères

- *Reclassification des critères*

La reclassification des critères est une phase tout aussi délicate et doit être judicieusement bien menée. Les couches d'entrée rasters ont été rééchantillonnées à l'aide de la fonction de projection d'enveloppe de QGIS pour uniformiser la résolution et reprojetter les couches thématiques d'entrée en WGS 84/ UTM Zone 30N (système de coordonnées du Burkina Faso). Par la suite, une reclassification à l'aide des algorithmes de reclassement GRASS a été effectuée pour mettre toutes les classes des critères retenus dans une échelle cohérente. Un reclassement sur une échelle de 1 à 5 (**très faible ; faible ; moyenne ; forte ; très forte**) a été effectué pour une bonne harmonie (Ake et al. 2018; Assemian et al. 2014; Mussa et al. 2020). Chaque critère retenu a ainsi été subdivisé en classes représentant soit un intervalle de valeurs soit un milieu particulier.

- *Standardisation des critères*

Cette méthode est basée sur l'affectation de cotes (notes) aux différentes classes des paramètres retenus et jugés en fonction de l'influence de la classe vis-à-vis de la recharge en définissant des intervalles. Cette méthode a été utilisée dans des études antérieures (Ake et al. 2018, 2019 ; Mussa et al. 2020). Afin d'estimer les cotes des différents paramètres de façon homogène, une échelle a été élaborée sur la base des plages de variation des paramètres proposées par Haouchine. La catégorisation des paramètres suivant cette échelle a permis d'obtenir les cotes de chaque classe, ceci pour tous les paramètres indépendamment les uns des autres. Selon l'échelle d'évaluation de Haouchine (Tableau 2) on attribuera des cotes variant de 1 à 10 aux classes de chaque critère en fonction de leur influence relative sur la recharge des eaux souterraines (Brunnelli, 2015).

La cote 10 est attribuée à la classe « très forte » selon qu'elle contribue à l'excellente recharge. Dans le cas inverse, la cote 1 est attribuée. En suivant la même logique, les valeurs intermédiaires sont attribuées aux classes intermédiaires.

Tableau 2: Échelle d'évaluation des différents paramètres vis-à-vis de l'infiltration (HAOUCHINE et al., 2010).

Classe	Très forte	Forte	Forte à moyenne	Moyenne	Moyenne à faible	Faible	Très faible
Cote	10	8	6,5	5	3,5	2	1

III.3.2.2 La pondération des critères

L'environnement dans lequel se trouve notre zone d'étude est complexe. Ainsi, au regard de la multitude de facteurs présents dans cette zone qui contribuent à entretenir cette complexité, l'atteinte de la réalisation de notre objectif peut être compromise. Afin de bien saisir et comprendre cet environnement complexe nous aurons recours à une méthode d'analyse multicritères en vue d'aider la prise de décision. La finalité de la méthode choisie doit mener vers la prise de décisions éclairées. La méthode elle-même ne prend évidemment pas de décision à notre place, mais permet d'apporter le support nécessaire afin de nous assister à organiser l'information qu'il a recueillie.

Il existe 12 méthodes d'analyses multicritères (moyennes pondérées, l'analyse hiérarchique, la dictature, la démocratie parfaite, etc.). Chaque méthode dispose de son approche qui lui est spécifique et ne produit pas forcément les mêmes résultats.

Dans le cadre de notre étude, la pondération des critères de décision sera effectuée suivant la méthode d'analyse hiérarchique (Analytical Hierarchy Process, AHP) développée par Saaty en 1980. Cette approche a été utilisée dans plusieurs études similaires et a donné des résultats très satisfaisants (Ahmed et al. 2021; Al-Djazouli et al. 2021; Assemian, Biemi, et Kouame s. d.; Benjmel et al. 2020; Dar, Rai, et Bhat 2020; Das et Pardeshi 2018; Fashae et al. 2013; Haouchine et al. 2010; Hernández-Mora, Llamas, et Cortina 2001; Ibrahim, Karambiri, et Polcher s. d.; Kumar et al. 2020; Mokadem et al. 2018; Mukherjee et Singh 2020; Mussa et al. 2020; Oularé et al. 2017; Siddi Raju et al. 2019; Zabihi et al. 2019). Cette technique d'analyse permet de prendre en compte de multiples critères, les éventuelles incertitudes. L'approche de la méthode consiste à simplifier un problème en le décomposant en plusieurs sous problèmes (un système hiérarchique). Ensuite on effectue une comparaison des différents critères pris deux à deux pour établir une matrice carrée sur l'échelle proposée par Saaty (Tableau 3).

Cette matrice permettra de déterminer les coefficients de pondération à partir des vecteurs propres de ces facteurs. Le coefficient de pondération (C_p) pour chaque critère est obtenu en divisant chaque vecteur propre par la somme des vecteurs propres. À la suite des comparaisons binaires, une vérification de la cohérence des jugements est nécessaire.

Dans notre étude, l'importance relative d'un paramètre sur la recharge des eaux souterraines a été évaluée sur la base d'une échelle à neuf points comme le montre le tableau 3 ; une note de 1 pour une importance égale entre deux facteurs, et 9; importance extrême d'un facteur par rapport à un autre facteur (Saaty, 1980a).

Tableau 3: Echelle numérique de comparaison binaire (Saaty, 1984)

Expression d'un critère par rapport à un autre	Intensité de l'importance
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 moins important	1/7
Extrêmement moins important	1/9
Valeur intermédiaire entre deux jugements (utilisées pour affiner son jugement)	2,4,6,8

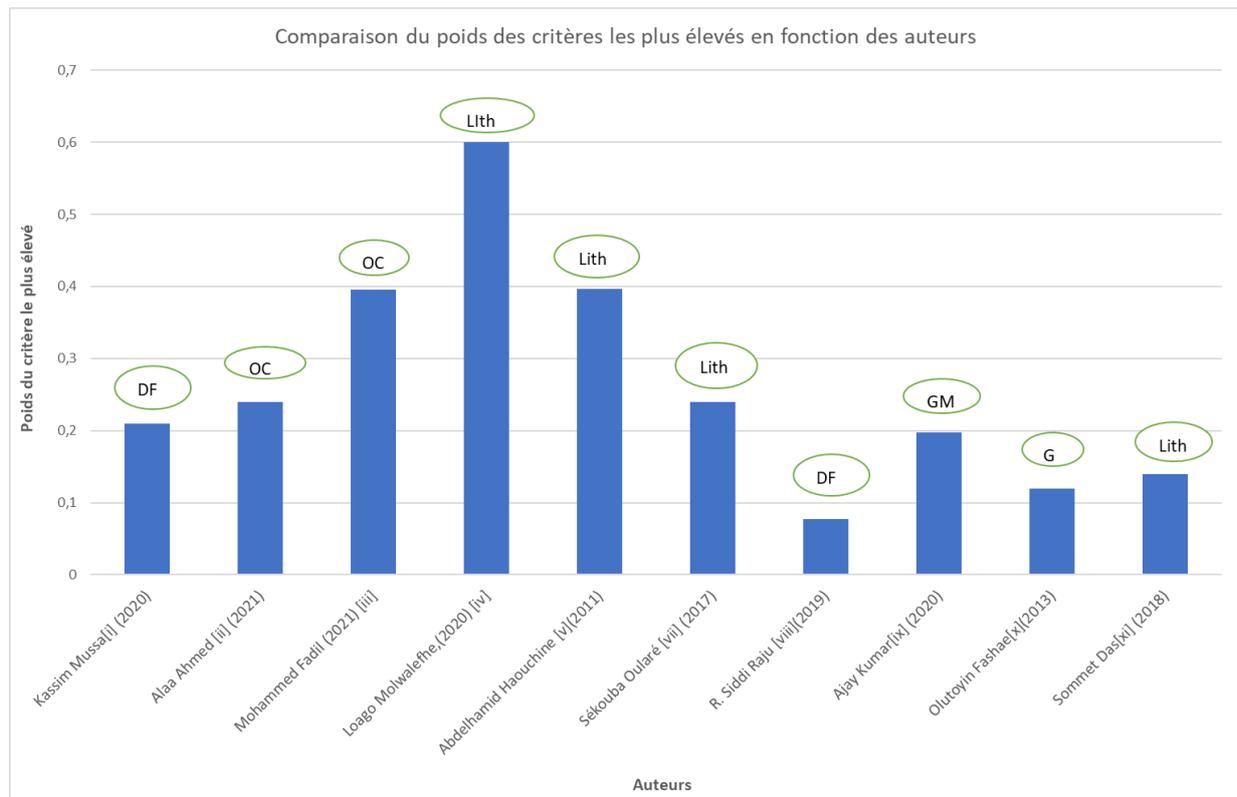
- **Matrice de comparaison par paire**

La matrice de comparaison par paires, \mathbf{A} ($m \times m$) a été construite sur la base du nombre de facteurs d'entrées pour la délimitation des zones de recharge préférentielle (Saaty, 1980a). Les entrées étaient des cartes reclassées des couches thématiques. Chaque entrée de la matrice représente l'influence du facteur de ligne par rapport au facteur de colonne. Les facteurs s'influencent mutuellement sur la base de l'échelle de un à neuf points de Saaty du tableau 2.

À ce jour, il n'y a aucune trace d'études qui ont utilisé l'opinion d'experts pour attribuer un poids aux paramètres influençant l'emplacement des zones de recharge naturelle. L'avis d'experts est requis pour la mise en œuvre de projets qui ont le potentiel de modifier la configuration naturelle de l'environnement ou de la société sur laquelle le projet est réalisé. Dans cette étude, la recharge en tant que processus naturel dont la fin ne modifierait probablement pas l'environnement ou n'aurait pas d'effets indésirables sur la société. Par conséquent, l'utilisation de l'opinion d'experts n'a pas été jugée nécessaire pour cette étude (Lentswe et Molwalefhe 2020).

Ainsi, toutes les cartes thématiques ont été pondérées sur la base de la revue de la littérature et en fonction de leur importance hydrologique pour le potentiel de recharge des eaux souterraines. L'attribution de poids des critères varie d'un auteur à l'autre malgré la similitude des études

dans les mêmes conditions climatiques et géologique (Figure 5). Cependant certains chercheurs (Ahmed et al. 2021 ; Al-Djazouli et al. 2021 ; Lentswe et Molwalefhe 2020 ; Mussa et al. 2020 ; Ranasinghe-Arachchilage et al. 2021) ont révélé que la densité de fracturation, la lithologie et l'occupation du sol sont les trois facteurs les plus importants pour déterminer le potentiel de recharge des eaux souterraines dans les bassins d'eaux souterraines semi-arides et fracturés, tandis que la densité de drainage et la pente sont les facteurs les moins importants.



G = Géologie ; GM = Géomorphologie ; Ts = type de sol ; P = Pente ; Pl = Pluie ; Lith = Lithologie ; DF = densité de fracturation ; OC = Occupation du sol ;

Figure 5: Comparaison du poids des critères les plus élevés en fonction des auteurs

- Vecteur propre

Les valeurs des vecteurs propres v_p sont obtenues en calculant leur moyenne géométrique par ligne selon la formule ci-dessous :

$$V_p = \sqrt[n]{\prod_i^n x_i} \quad (3)$$

où :

- V_p : vecteur propre ;
- n : nombre de critère ;
- x_i : note du critère i .

- **Coefficient de pondération**

Le coefficient de pondération (C_p) est calculé pour montrer les poids relatifs de chacun des facteurs vers la recharge. Il est obtenu en utilisant la formule suivante :

$$C_p = \frac{V_p}{\sum V_p} \quad (4)$$

où :

- C_p : poids du critère ;
- V_p : Vecteur propre du critère ;
- $\sum V_p$: somme des vecteurs propres de tous les critères.

Plus le poids du paramètre est élevé, plus l'influence sur le potentiel de recharge des eaux souterraines est élevée et une faible influence implique un faible potentiel de recharge des eaux souterraines, comme discuté dans les études précédentes.

• **Évaluation de la cohérence de la matrice**

Les incohérences dans les comparaisons par paires augmentent avec l'augmentation du nombre de comparaisons (Saaty, 1980a , b). Par conséquent, on détermine le ratio de cohérence (ANOHI et al., 2012 ; Brunnelli, 2015) pour évaluer les évaluations effectuées lors de la construction de de la matrice de comparaison par paires impliquées dans le processus.

Le ratio de cohérence (RC) est donné par la formule suivante :

$$Rc = \frac{I_c}{I_A} \quad (5)$$

Où l'indice de cohérence (IC) s'exprime par la formule :

$$Ic = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

n , étant le nombre de critères comparés

λ_{max} , une valeur calculée sur la base de la matrice issue de la comparaison par paire de Saaty (1980), des vecteurs propres et de n ;

et l'indice aléatoire (I_A) issu d'une matrice de même dimension (Tableau 4)

Tableau 4: Valeur de l'Indice Aléatoire (IA) (Saaty, 1990)

Nombre de critères (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I _A	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

D'après Saaty (1990), si RC est supérieur à 10 %, il manquerait de cohérence dans les comparaisons par paires et alors la matrice issue des comparaisons, devra être réévaluée.

III.3.2.3 Combinaison et production de la carte résultante.

Les couches d'entrée ont été additionnées dans une combinaison pondérée avec leur pondération factorielle en pourcentage. Cette étape impliquait de multiplier le poids de chaque couche par la valeur classée de chaque cellule et, par conséquent, une valeur de cellule pondérée a été produite.

Par la suite, les valeurs de cellule pondérées ont été totalisées pour chaque cellule superposée, puis écrites dans une couche de sortie à l'aide de la fonction calculatrice raster du logiciel QGIS. Le fonctionnement de calculatrice raster dans QGIS superpose plusieurs couches raster, représentant différents thèmes hydrogéologiques, topographiques et hydroclimatiques ainsi que leurs cellules de grille rééchantillonnées et leurs classes classées.

Ainsi, ce processus a été utilisé pour intégrer les couches thématiques de l'eau utile, l'épaisseur d'altération, le type de sol, de densité de linéament, de pente, l'occupation du sol et la densité de drainage de la zone d'étude pour produire en sortie la carte des zones de recharge préférentielles des eaux souterraines.

On résume cette approche par l'équation suivante (Ake et al. 2018 ; Lentswe et Molwalefhe 2020; Mussa et al. 2020) :

$$I = \sum_{i=2}^n W_i X_i \quad (7)$$

avec :

- I : le résultat ou l'indice ;
- W_i : le poids du critère i ;
- X_i : la valeur standardisée du critère i.

Cet indice sera situé sur une échelle de 0 à 10, car la somme des coefficients de pondération développée par la méthode de Saaty vaut 1.

Une reclassification du raster obtenu conduira à une carte de quatre classes que sont : **les classes mauvaise, médiocre, bonne et excellente**. Le nombre de classes est fixé à quatre pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte résultante.

III.3.3 Validation de la carte des zones de recharge préférentielle

La validation des données est l'un des travaux les plus essentiels après la conception de tout modèle afin de vérifier la compétence des résultats prédits. Pour valider la carte des zones de recharge préférentielle de la zone d'étude, deux méthodes ont été utilisées.

III.3.3.1 Méthode de superposition par les débits de forage

Le critère de validation choisi pour valider un indicateur donné doit être indépendant, c'est-à-dire n'ayant pas servi à la réalisation de la carte des zones de recharge préférentielle et provenir exclusivement de la zone d'étude. La carte des zones de recharge préférentielle est validée en adoptant le mode de validation proposée par (Ake et al. 2019; Koudou et al. 2013; Oscar et al. 2016).

Ainsi, les débits d'exploitation des forages de la BD OMES ont été retenus puis superposés à la carte des zones recharge préférentielle pour établir une relation entre les différentes zones de recharge préférentielle et les forages disponibles dans la zone d'étude. Par ailleurs, pour respecter le principe de conformité du critère, des classes ayant les mêmes bornes que celles de la carte résultante à évaluer sont définies. La carte des débits de forages regroupée en quatre classes très faible ($Q \leq 1 \text{ m}^3/\text{h}$), faible ($1 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q \leq 3 \text{ m}^3/\text{h}$), moyen ($3 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q \leq 5 \text{ m}^3/\text{h}$) et fort ($Q > 5 \text{ m}^3/\text{h}$), (Ake et al. 2019; Koudou et al. 2013; Oscar et al. 2016) a donc été superposée à la carte des zones de recharge préférentielle. Il est relevé ensuite, pour chaque classe de sensibilité de la carte, le nombre de forages qui s'y trouvent selon leur classe. Le pourcentage de chaque classe de sensibilité et de facteur (débit d'exploitation) est calculé par rapport au nombre total de forages obtenu par classe de sensibilité.

Pour que la carte résultante soit valide, il faudrait que dans les zones de recharge préférentielle dites excellentes, une grande majorité des forages avec un débit fort soit constatée.

III.3.3.2 Méthode de l'analyse de l'incertitude

Dans les études antérieures (Jourda 2005, Jourda et al. 2006, Koudou et al. 2010 ; Youan Ta et al. 2011), les chercheurs ont démontré 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 et il est fréquent d'avoir un autre forage à débit faible, voire nul (Yao et al., 2014

et Kouassi et al., 2019). La méthode utilisée dans cette étude se basera sur les travaux de ces chercheurs. La formule ci-dessous calcule les incertitudes sur les moyennes des divers paramètres des principaux indicateurs donnés :

$$\Delta X = \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \quad (8)$$

Avec :

ΔX : incertitude sur la moyenne de la série de données ;

σ : Écart type de la série de données ;

m : Nombre de données.

Ensuite un facteur d'expansion (K) sera calculé afin de déterminer le niveau de confiance. Ce facteur est déterminé en se basant sur le principe statistique de calcul de l'incertitude étendue. Le paramètre K permet la définition d'un intervalle de confiance portée suffisante ayant pour but d'avoir dans les résultats une grande confiance. L'expression de ce facteur est la suivante :

$$K = \frac{E - X}{\sigma} \quad (9)$$

Avec

K : facteur d'expansion

E : la valeur extrême de la série statistique (le minimum ou le maximum de la série).

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 %.

Le résumé de la méthodologie est résumé à la Figure 6.

Apport du SIG et de l'analyse multicritère à l'estimation des zones de recharge préférentielle en zone de socle au Burkina Faso

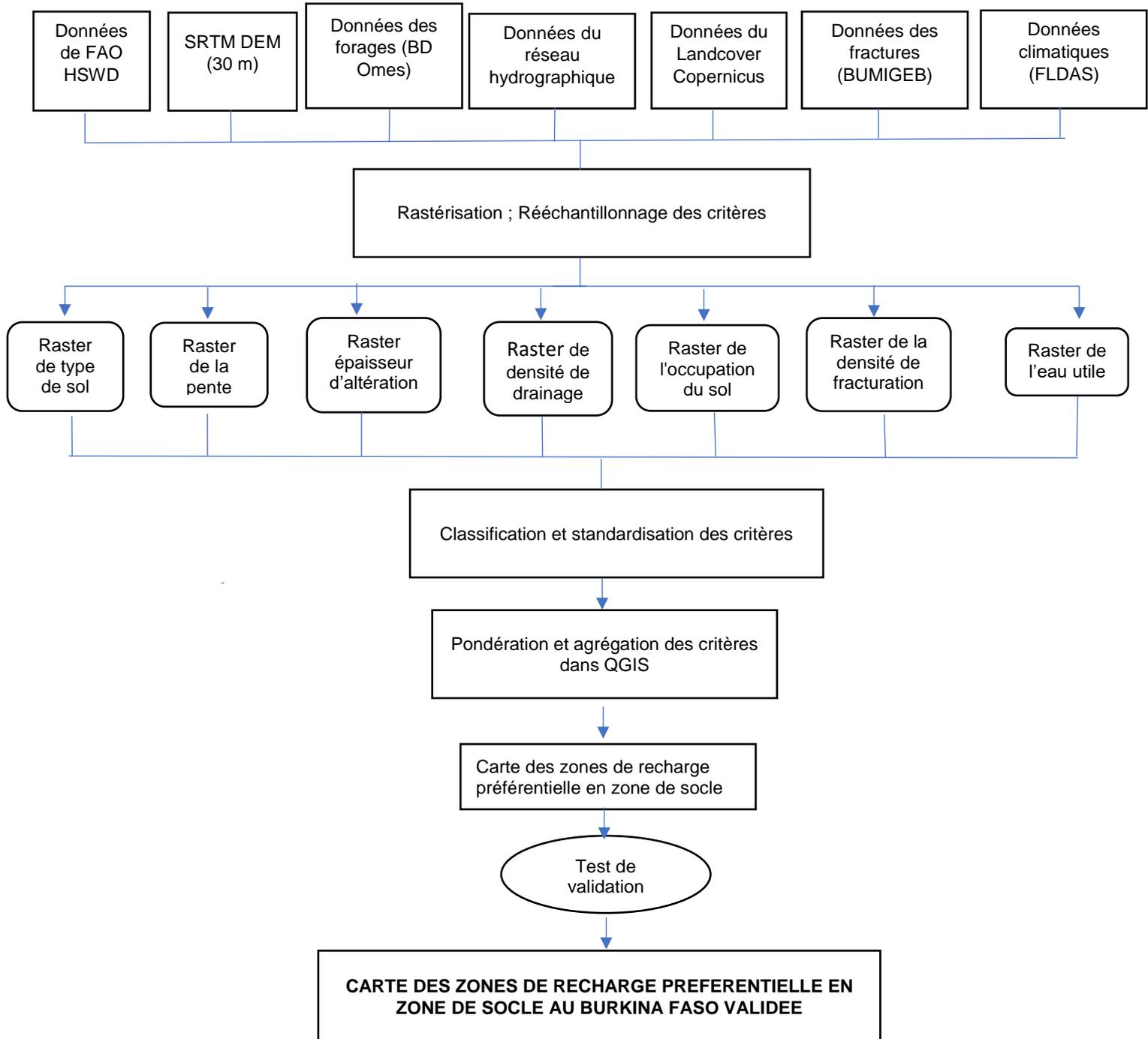


Figure 6: Synthèse méthodologique de la réalisation de la carte des zones de recharge préférentielle en zone de socle

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Identification et élaboration des critères de décisions

Comme affirmé précédemment, les facteurs influençant la recharge seront étudiés indépendamment les uns des autres et par la suite, intégrés et compilés selon la méthodologie définie pour obtenir la carte des zones de recharge préférentielle.

- *Cartographie de la densité de fracturation*

La carte de densité de linéaments reclassée illustrée à Figure 7 a été produite sur la base du fait que les structures géologiques telles que les linéaments induisent une porosité et une perméabilité secondaires aux roches (Freeze et Cherry, 1979 ; Maidment, 1993). Par conséquent, les zones à forte densité de linéaments ont un potentiel élevé de recharge des eaux souterraines.

La densité de fracturation de la zone d'étude est classée en cinq classes. L'analyse de cette carte a permis ainsi de mettre en évidence cinq grands domaines structuraux suivants :

- Un domaine de très fortes densités de fracturation ($> 23 \text{ km/km}^2$) identifié particulièrement à l'Est et au Sud de la zone d'étude à l'intérieur des domaines à forte densité. Cette classe couvre une superficie d'environ $1\,216 \text{ km}^2$ représentant environ 0,55% de la zone d'étude. Ici la fracturation est très poussée et peut faciliter l'infiltration des eaux de précipitation.
- Un domaine de fortes densités de fracturation ($17\text{-}23 \text{ km/km}^2$) dissimulé quasiment dans toute la zone d'étude. Cette classe couvre une superficie d'environ $21\,833 \text{ km}^2$ soit 9,96% de la zone d'étude.
- Un domaine de densités moyennes de fracturation ($11\text{-}17 \text{ km/km}^2$) présente dans tous les secteurs de la zone d'étude. Cette classe couvre une superficie d'environ $68\,043 \text{ km}^2$ représentant 31,03 % de la zone d'étude.
- Un domaine de faibles densités de fracturation ($6\text{-}11 \text{ km/km}^2$) présente dans tous les secteurs de la zone d'étude avec une proportion très élevée de la zone d'étude. Cette classe couvre une superficie d'environ $90\,358 \text{ km}^2$ représentant environ 41,2% de la zone d'étude.
- Un domaine de très faibles densités de fracturation ($< 6 \text{ km/km}^2$) identifié dans tous les secteurs de la zone d'étude en particulier dans la province du Kadiogo et de la Sissili.

Cette classe couvre une superficie d'environ 37 918 km² représentant environ 17,29% de la zone d'étude.

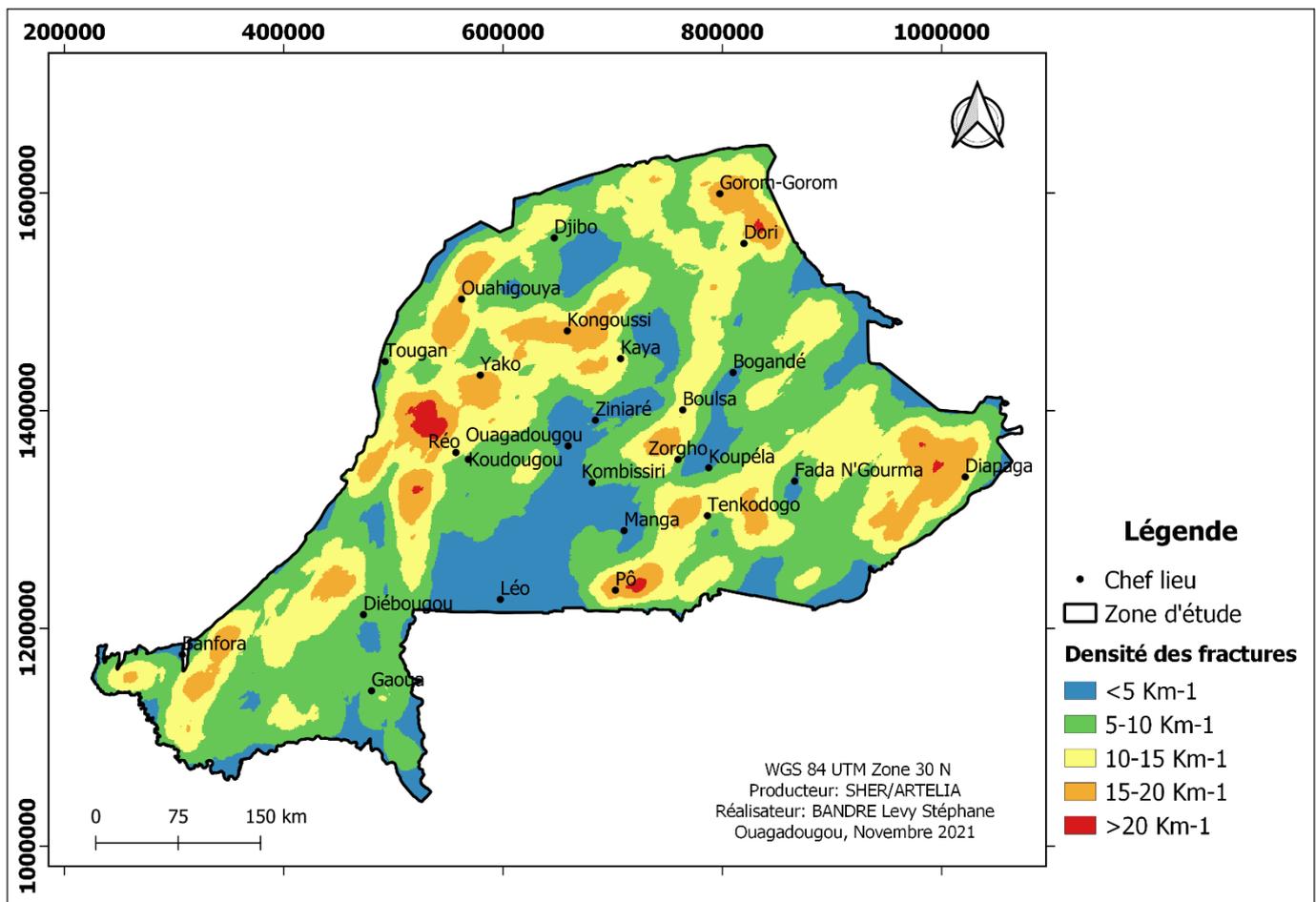


Figure 7: Carte de la densité de fracturation de la zone de socle

- **Cartographie de la densité de drainage**

La densité de drainage de la zone d'étude est classée en cinq classes. L'analyse de cette carte a permis ainsi de mettre en évidence cinq grands domaines structuraux suivants (Figure 8) :

- Un domaine de très fortes densités de drainage ($> 0,17 \text{ km/km}^2$) identifié au Centre et à l'Ouest de la zone d'étude à l'intérieur des domaines à forte densité. Cette classe couvre une superficie d'environ 1 774 km² représentant environ 0,81% de la zone d'étude. Ici la fracturation est très poussée.
- Un domaine de fortes densités de drainage ($0,13\text{-}0,17 \text{ km/km}^2$) dissimulé dans toutes la zone particulièrement dans les provinces de Oubritenga, Sanguié. Cette classe couvre une superficie d'environ 34 678 km² soit 15,81% de la zone d'étude.

- Un domaine de densités moyennes de drainage ($0,09-0,13 \text{ km/km}^2$) présente dans tous les secteurs de la zone d'étude avec une proportion pouvant atteindre 53,42 % de la zone d'étude soit environ $117\,147 \text{ km}^2$.
- Un domaine de faibles densités de drainage ($0,04-0,09 \text{ km/km}^2$) présente dans tous les secteurs de la zone d'étude. Cette classe couvre une superficie d'environ $63\,353 \text{ km}^2$ représentant 28,89% de la zone d'étude.
- Un domaine de très faibles densités de drainage ($< 0,04 \text{ km/km}^2$) identifié en petite proportion au Nord de la zone d'étude. Cette classe couvre une superficie d'environ 2523 km^2 représentant environ 1,15% de la zone d'étude.

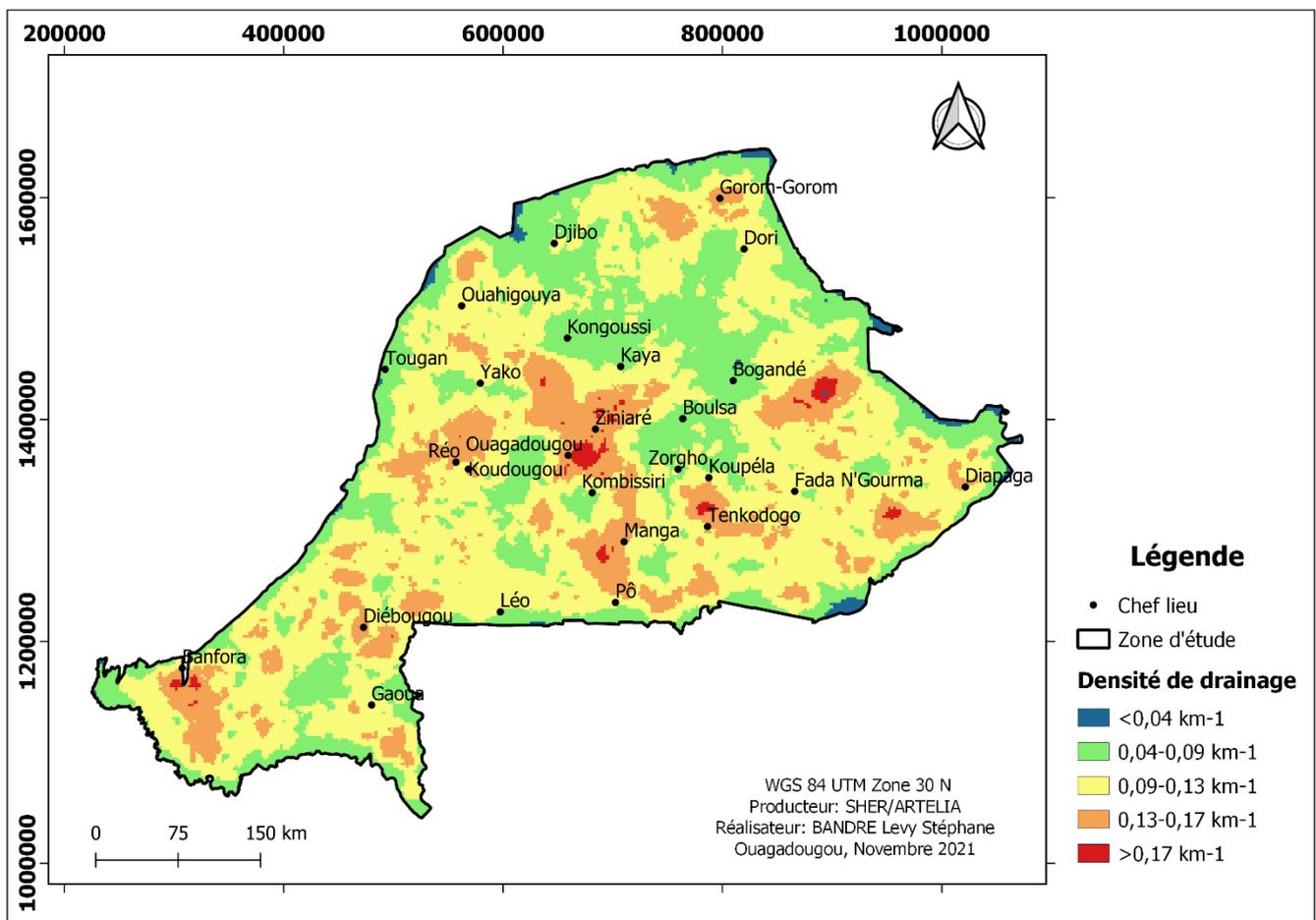


Figure 8: Carte de la densité de drainage de la zone de socle

- **Cartographie de l'occupation du sol**

L'occupation des sols joue un rôle important dans l'apparition et le développement des eaux souterraines. L'occupation du sol de la zone d'étude est classée en cinq catégories (Figure 9) :

- Sol nu et zones habitées : cette classe est identifiée sur toute l'étendue de la zone d'étude. Cette unité représente les surfaces imperméables (routes, habitats, zones industrielles, etc.) qui retardent considérablement la recharge des aquifères en raison de la prépondérance du ruissellement. Cette classe occupe une superficie d'environ 4 511 km² représentant environ 2,06 % de la superficie totale.
- Zone arbustive : cette classe est observée en grande proportion de la zone d'étude. Cette unité 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. Cette classe occupe une superficie d'environ 124 129 km² représentant environ 56,61 % de la superficie totale
- Cultures : cette classe est observée sur une grande partie de la zone d'étude. Les cultures lorsqu'elles ne sont pas intensives améliorent la recharge des aquifères en raison de la perte limitée par évapotranspiration. Ces zones sont donc favorables aux processus de recharge. Cette classe occupe une superficie d'environ 65 886 km² représentant environ 30,05 % de la superficie totale
- Couverture arborée : cette classe est présente particulièrement au sud de la zone d'étude. Cette unité est caractérisée 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. Cette classe occupe une superficie d'environ 21 401 km² représentant environ 9,76 % de la superficie totale.
- Plans d'eau réparti sur toute la zone d'étude. Cette unité représente les cours d'eau (rivières, lacs et fleuves), ces cours d'eau alimentent les aquifères (en fonction des saisons). Cette classe occupe une superficie d'environ 3 275 km² représentant environ 1,49 % de la superficie totale.

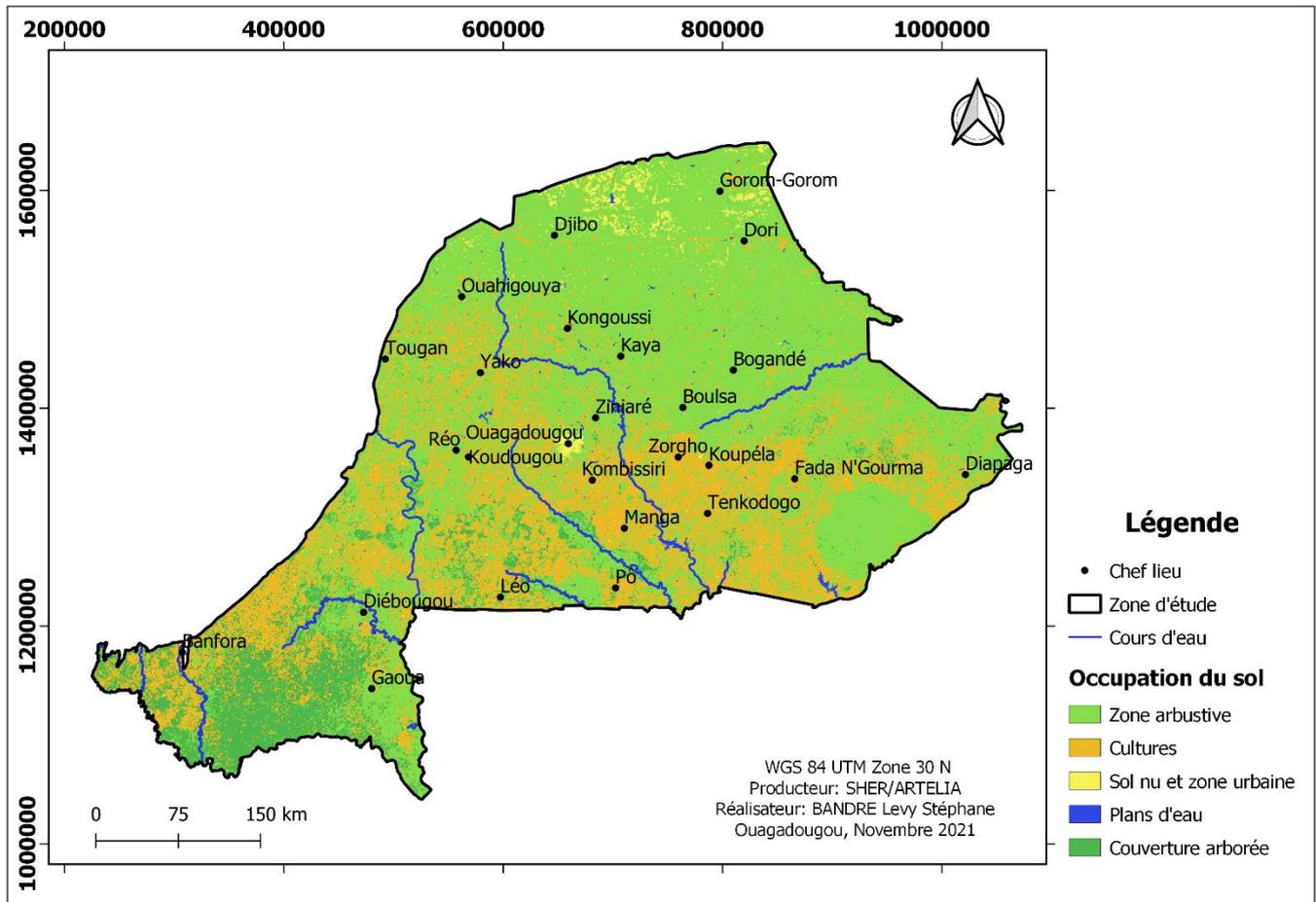


Figure 9: Carte de l'occupation du sol de la zone de socle

- **Cartographie de la pente**

La carte des pentes de la zone d'étude a été classée en cinq classes (Agarwal et al. 2013 ; Ground Water Board 1999 ; Chenini et al. 2010 ; Chowdary et al. 2009) : 0-1 %, 1-3 %, 3-5 %, 5-10 %, et >10 % comme le montre la Figure 10 :

- Classe I : $\alpha > 10\%$ (très forte) : Cette classe couvre une superficie d'environ 37,28 km² représentant environ 0,02% de la zone d'étude. Les valeurs de cette classe représentent les massifs montagneux coupés de falaises vers le Sud où le ruissellement serait très important, impliquant une infiltration minimale.
- Classe II : $5 < \alpha < 10\%$ (forte) : Cette classe ne couvre qu'une superficie d'environ 536,50 km² soit environ 0,24% de la zone d'étude.
- Classe III : $3 < \alpha < 5\%$ (moyenne) : Cette classe constitue 2234,33 km² soit 1,02%. Le ruissellement perdrait de son ampleur et c'est l'infiltration qui commencerait à avoir lieu, bien que le facteur longueur de pente soit réduit.

- Classe IV : $1 < \alpha < 3\%$ (faible) : C'est la classe des hautes plaines ; elle couvre une superficie de 67 401 km² soit 30,74% de la zone d'étude. Cette zone montre des pentes relativement faibles, où l'infiltration prend de l'importance contrairement au ruissellement qui perd son énergie.
- Classe V : $\alpha < 1\%$ (très faible) : Cette classe couvre une superficie d'environ 149 080 km² représentant environ 67,98% de la zone d'étude. C'est la classe des basses plaines. Elle occupe le centre de la carte et la plus grande partie de la zone d'étude. Les pentes y sont très faibles, signifiant des surfaces plates.

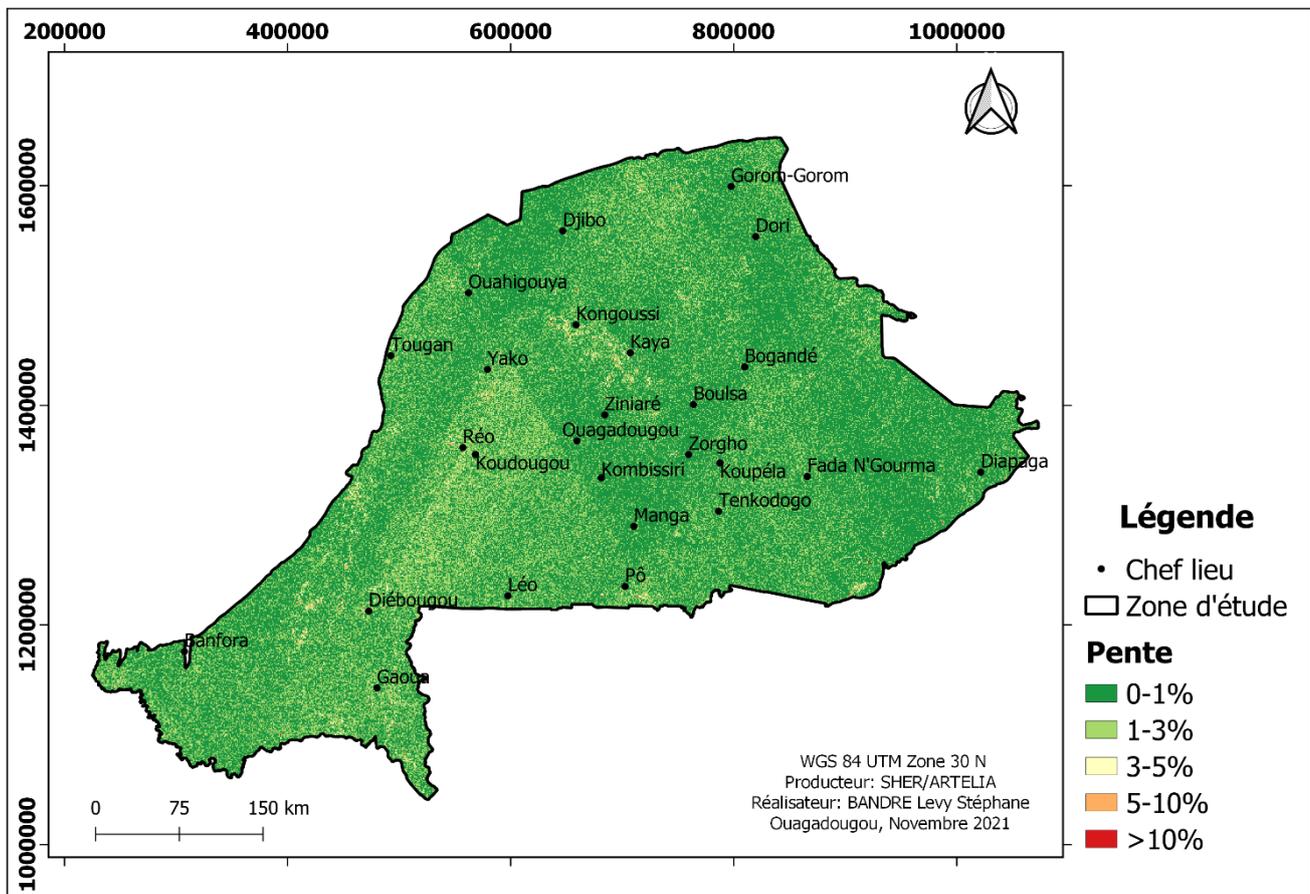


Figure 10: Carte de la pente de la zone de socle

- **Cartographie de l'épaisseur d'altération**

Les données de forage ont servi à estimer les variations de l'épaisseur d'altération dans la zone d'étude. La modélisation spatiale des valeurs de l'épaisseur d'altération par interpolation par krigeage est représentée par la Figure 11 :

- Les zones à très forte épaisseur d'altération (> 40 m) s'observent à l'Ouest de la zone d'étude à l'intérieur des domaines à forte épaisseur. Cette classe couvre une superficie d'environ 11 222 km² représentant environ 5,12% de la zone d'étude.
- Les zones à forte épaisseur d'altération (30-40 m) sont identifiées particulièrement à l'Ouest de la zone d'étude. Cette classe couvre une superficie d'environ 35 766 km² soit environ 16,31% de la zone d'étude.
- Les zones à moyenne épaisseur d'altération (20-30 m) sont rencontrées sur une grande partie de la zone d'étude. Cette classe couvre une superficie d'environ 77 241 km² représentant environ 35,22% de la zone d'étude.
- Les zones à faible épaisseur d'altération (10-20 m) s'observent en grande proportion à l'Est de la zone d'étude. Cette classe couvre une superficie d'environ 89566 km² représentant environ 40,84% de la zone d'étude.
- Les zones à très faible épaisseur d'altération (< 10 m) identifié en petite proportion au Nord et au Sud de la zone d'étude. Cette classe couvre une superficie d'environ 5 631 km² représentant environ 2,57% de la zone d'étude.

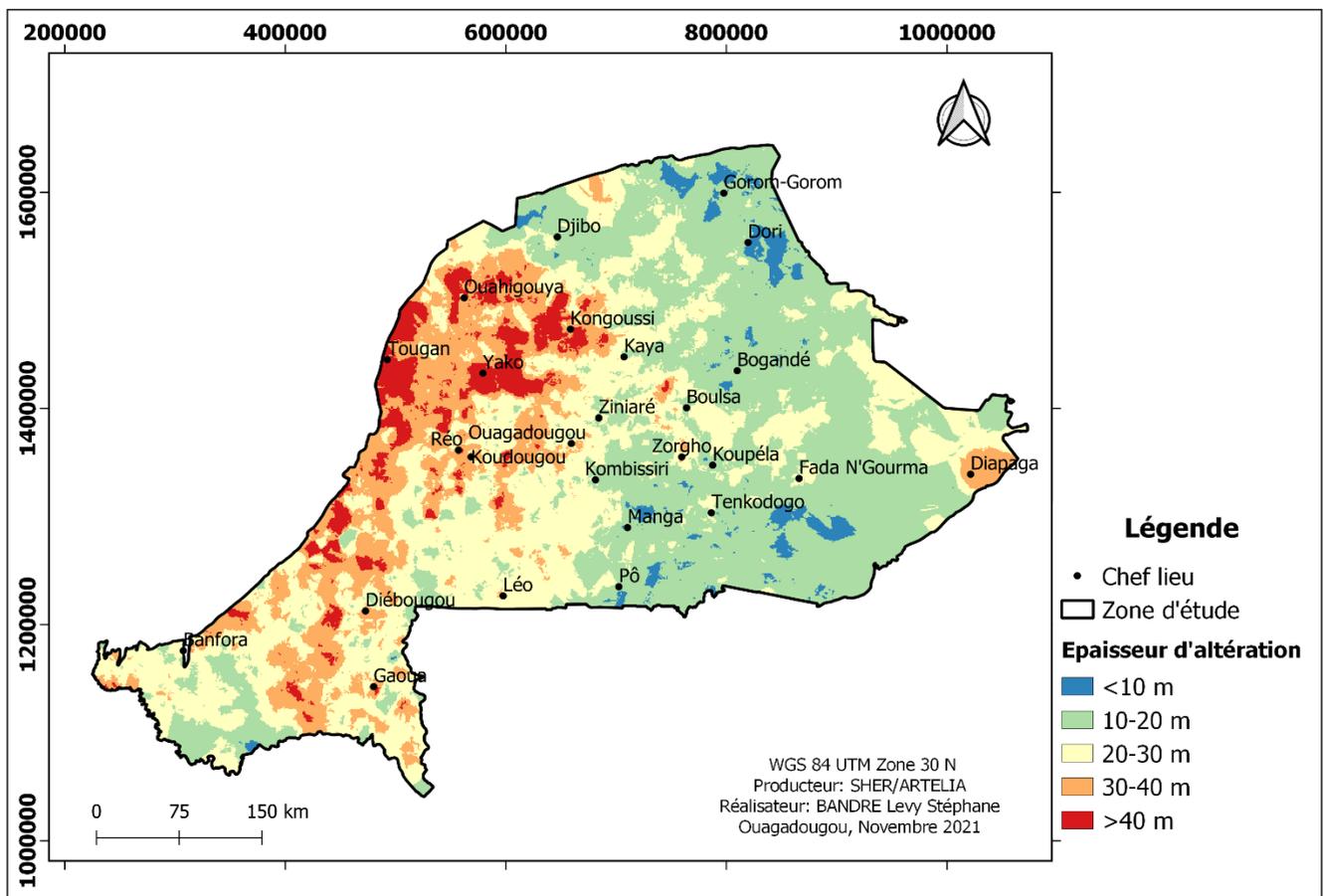


Figure 11: Carte de l'épaisseur d'altération de la zone de socle

- *Cartographie du type de sol*

L'importance du type de sol sur la recharge des eaux souterraines était basée sur la capacité d'infiltration. Les sols ont été regroupés selon la teneur en sable, argile et limon (FAO-ISRIC, 2003).

Les sols de la zone d'étude révèlent cinq catégories principales de sols, à savoir (Figure 12) :

- Les sols argileux sont observés au centre de la zone d'étude dans la province du Zoundwéogo. Cette classe couvre une superficie d'environ 1211 km² représentant environ 0,55% de la zone d'étude.
- Les sols limono-argileux sont identifiés en petite proportion environ 14 969 km² soit 6,83% dans la zone d'étude.
- Les sols limoneux sont présents en grande proportion environ 118 789 km² soit 54,17% de la zone d'étude tels que dans les provinces du Kadiogo, Kouritenga, Boulgou, etc
- Les sols sablo-limoneux sont observés dans tous les secteurs de la zone d'étude en particulier dans les provinces. Cette classe couvre une superficie d'environ 39 282 km² représentant environ 17,91% de la zone d'étude.
- Les sols sableux sont identifiés dans pratiquement tous les secteurs de la zone d'étude avec une proportion pouvant atteindre 20,61% soit 45 191 Km² de la zone d'étude

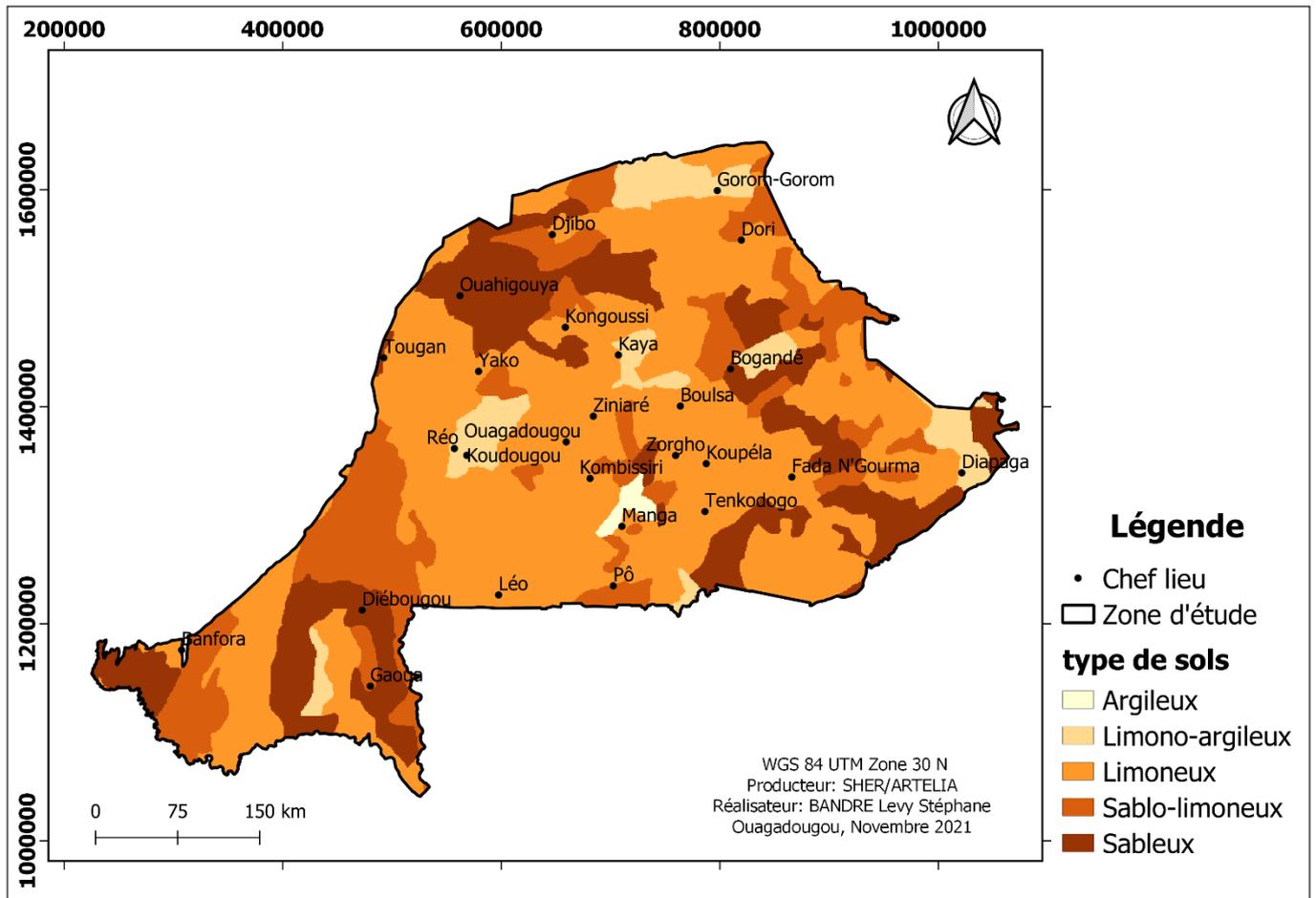


Figure 12: Carte du type de sol de la zone de socle

- **Cartographie de l'eau utile**

Les données climatiques de FLDAS ont permis de calculer l'eau utile. Elle a été reclassée en cinq classes (Figure 13) :

- Classe I : 30-55 mm : Cette classe couvre une superficie d'environ 4200 km² représentant environ 1,93% de la zone d'étude. Elle est identifiée au nord de la zone d'étude.
- Classe II : 55-80 mm : Cette classe ne couvre qu'une superficie d'environ 92 500 km² soit environ 42,18% de la zone d'étude.
- Classe III : 80-105 mm : Cette classe occupe en grande proportion la zone d'étude et constitue 110 0520 km² soit 50,46% de la zone d'étude.
- Classe IV : 105-130 mm : elle couvre une superficie de 20 225 km² soit 9,68% de la zone d'étude.
- Classe V : > 130 mm : Cette classe couvre une superficie d'environ 5 025 km² représentant environ 2,52% de la zone d'étude. Cette classe particulièrement à l'extrême sud de la zone d'étude

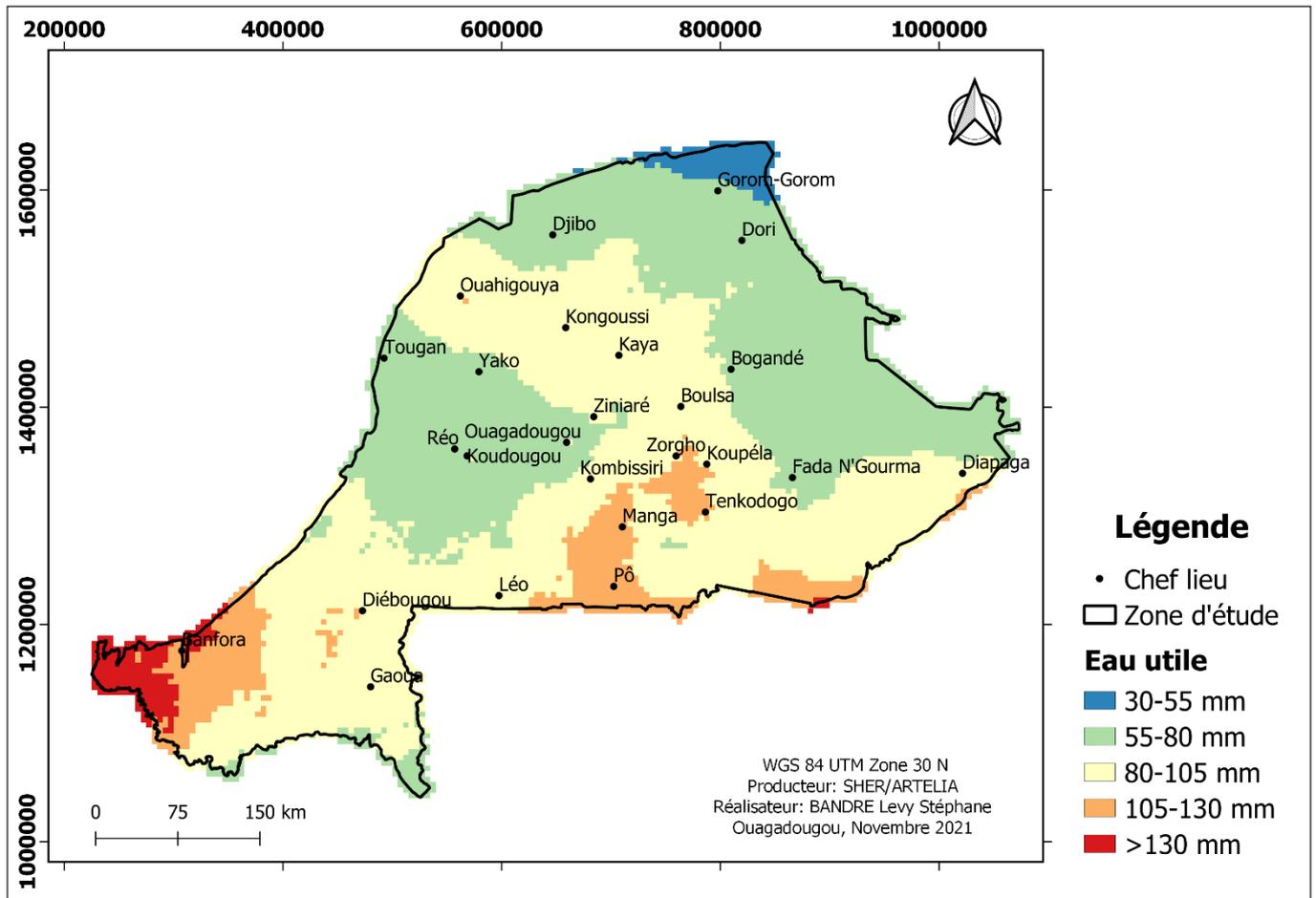


Figure 13: Carte de l'eau utile de la zone de socle

IV.2 Cartographie des zones de recharge préférentielle à l'aide des techniques de l'analyse multicritère

IV.2.1 Standardisation des critères

La catégorisation des paramètres suivant l'échelle de Haouchine a permis d'obtenir les cotes de chaque classe, ceci pour tous les critères indépendamment les uns des autres. Le choix des cotes est fonction de l'influence de la classe sur l'infiltration et est mentionné au Tableau 5.

- **Pente**

La plupart de la zone d'étude est une zone plate et a une pente faible, ce qui est favorable à la recharge des eaux souterraines. La classe ayant la gamme de pente minimale est donné la cote la plus élevée, en raison d'un terrain presque plat, tandis que la classe ayant la pente maximale est attribué la note la plus faible en raison d'un ruissellement relativement élevé qui indique la possibilité d'une faible disponibilité des eaux souterraines.

- ***Eau utile***

Plus la quantité de l'eau utile est élevée, plus le potentiel de recharge des eaux souterraines est élevé et inversement. De ce fait l'eau utile à valeur élevée (Classe V) aura la cote la plus élevée et inversement.

- ***Densité de fracturation***

Les zones avec une densité de fracturation plus élevée auront la cote la plus élevée car ce sont les endroits perméables à travers lesquels l'eau s'infiltré (Haridas et al, 1998).

- ***Densité de drainage***

Une densité de drainage élevée correspond à un ruissellement important et indique la possibilité d'une faible disponibilité des eaux de surface pour la recharge des eaux souterraines (Hachem et al, 2015). Pour cette raison, une cote plus élevée est attribuée aux zones à faible densité de drainage et vice versa.

- ***Occupation du sol***

En raison du potentiel élevé de recharge et du stockage des eaux souterraines, les plans d'eau ont reçu une cote la plus élevée. La cote la moins élevée a été attribué aux zones habitées et sol nu en raison de leur faible capacité de rétention d'eau et de leur moindre infiltration

- ***Type de sol***

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, on observe un taux d'infiltration élevé et ils se voient attribuer la cote la plus élevée (FitzPatrick, 1986 ; Brady et Weil, 2014).

- ***L'épaisseur d'altération***

Une analyse statistique a été jugé nécessaire pour l'attribution des cotes de l'épaisseur d'altération. En effet, dans la zone d'étude, les épaisseurs d'altérites observées varient entre 0 et 110 m. L'étude du débit des forages en fonction des classes d'épaisseurs d'altérites a été effectuée pour déterminer s'il existe une relation entre ces deux paramètres (Figure 14). On remarque que, pour des épaisseurs d'altérites inférieures à 10 m et supérieures à 40 m, les débits des forages sont faibles. C'est seulement l'intervalle compris entre 10 et 40 m qui fournit de nombreuses valeurs de débits forts, avec même un maximum de 115 m³/h.

Par ailleurs, l'étude des débits par classe d'épaisseur d'altérite (Haouchine et al. 2010) (Figure 15) semble aussi illustrer les mêmes tendances. En effet dans les classes avec des effectifs importants de données de forage (> 2000) que sont les épaisseurs en mètre (m) : [10-20], [20-30] et [30-40], les débits captés sont plus forts que les classes [0-10] et [> 40].

Les graphes de l'épaisseur d'altération en fonction du débit (Q) (figures 14 et 15) permettent de révéler une tendance. En effet, les débits d'exploitation baissent au fur et à mesure que l'épaisseur d'altération augmente. Toutefois, les débits plus importants sont obtenus à partir des épaisseurs d'altération inférieures à 40 m.

En conclusion, dans la classe [30-40], il est observé le débit moyen le plus élevé tandis que la [0-10] présente le débit moyen le faible. Ainsi la classe [30-40] se verra attribuer la cote la plus élevée et la classe [0-10] la cote la plus faible.

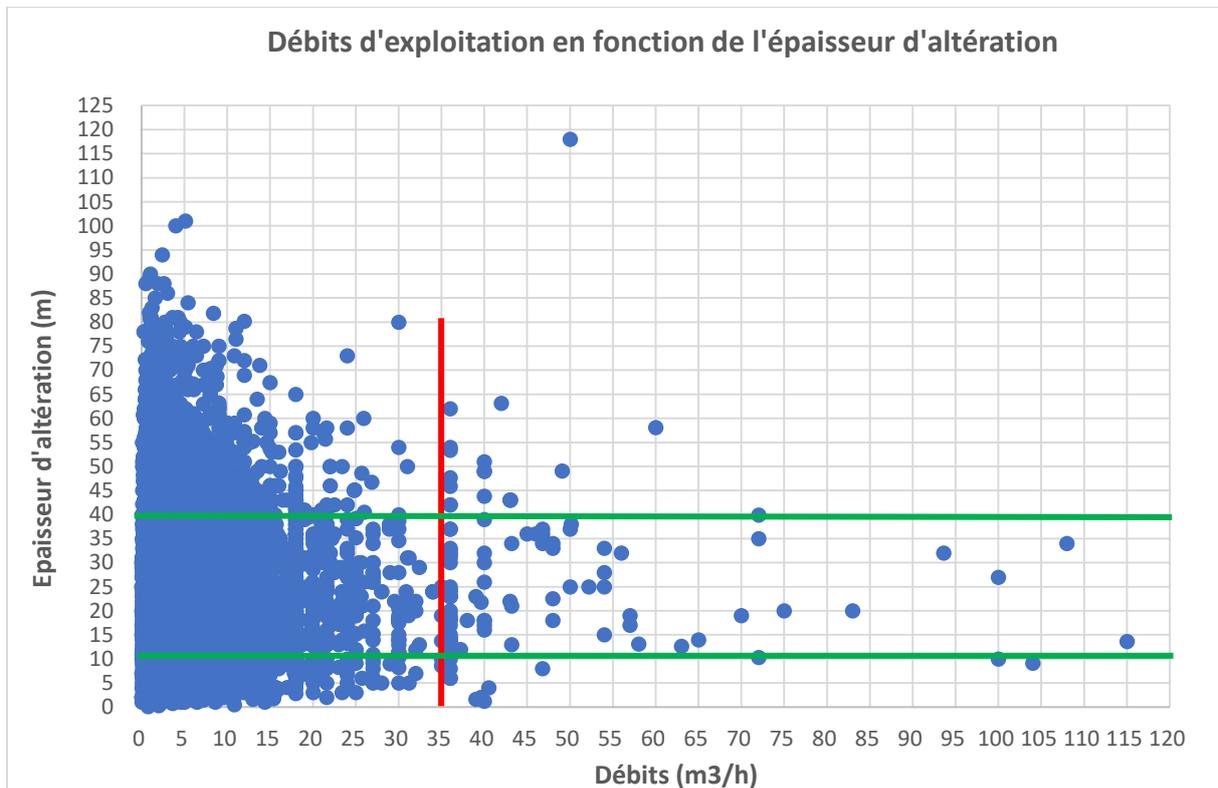


Figure 14: Débits d'exploitation en fonction de l'épaisseur d'altération

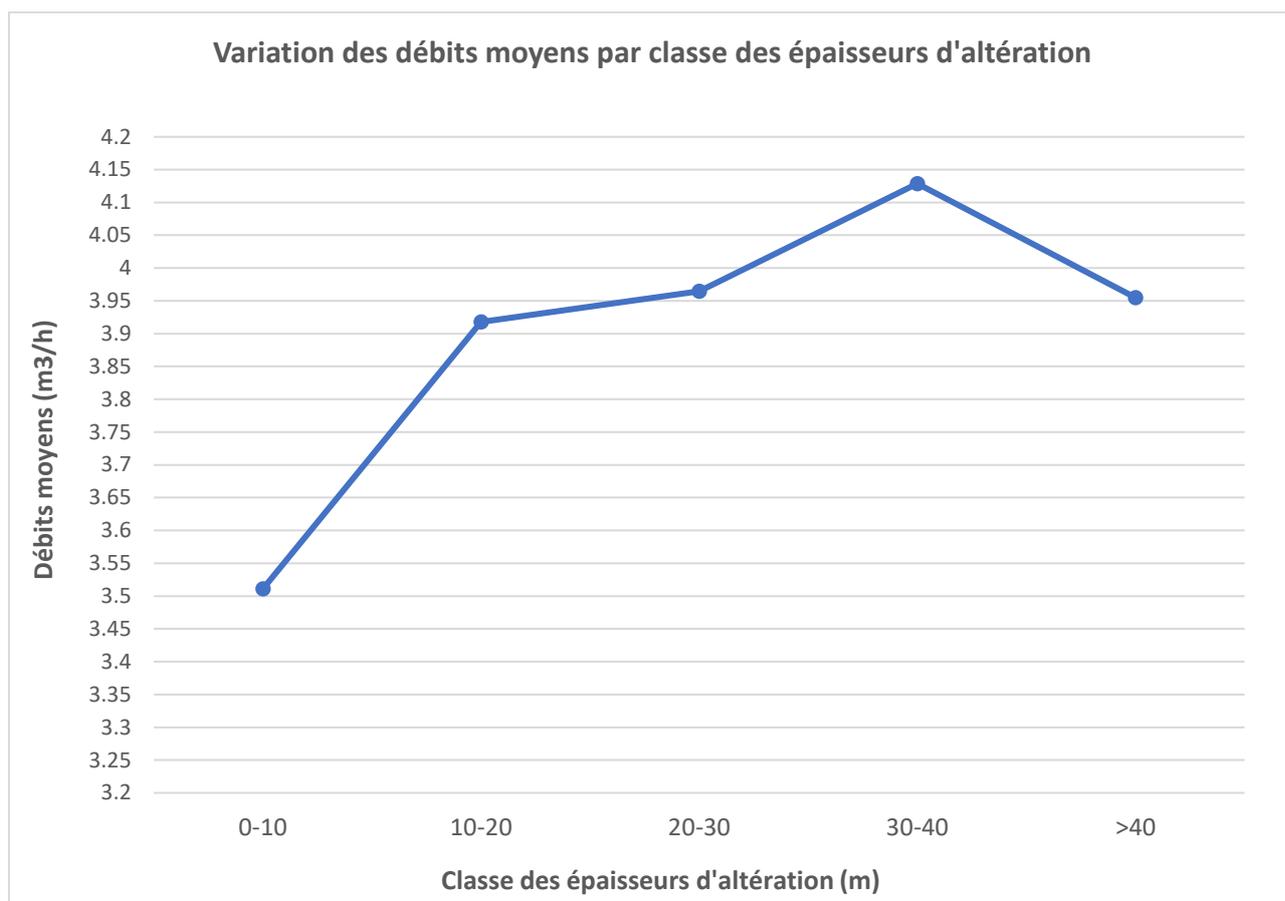


Figure 15: Variation des débits moyens par classe d'épaisseur d'altération

Tableau 5: Récapitulatif de la standardisation des critères

Critère	Classes	Qualificatif du critère	Cotes
Pente (%)	0-1	Très faible	10
	1-3	Faible	8
	3-5	Moyen	5
	5-10	Forte	3
	>10	Très forte	1
Type de sol	Argileux	Très faible	1
	Limono-argileux	Faible	3
	Limoneux	Moyen	5
	Sablo-limoneux	Forte	8
	Sableux	Très forte	10
Occupation du sol	Sol nu et zone urbaine	Très faible	1
	Zone arbustive	Faible	3
	Cultures	Moyen	5
	Couverture arborée	Forte	8
	Plans d'eau	Très forte	10
Densité de drainage (km/km²)	< 0,04	Très faible	10
	0,04 - 0,09	Faible	8
	0,09 - 0,13	Moyen	5
	0,13 - 0,17	Forte	3
	> 0,17	Très forte	1
Epaisseur d'altération (m)	0-10	Très faible	1
	10 -20	Faible	3
	20 – 30	Moyen	8
	30- 40	Forte	10
	> 40	Très forte	5
Densité de fracturation (km/km²)	< 5	Très faible	1
	5 - 10	Faible	3
	10 - 15	Moyen	5
	15 - 20	Forte	8
	> 20	Très forte	10
Eau utile (mm)	30-55	Très faible	1
	55-80	Faible	3
	80-105	Moyen	5
	105-130	Forte	8
	> 130	Très forte	10

IV.2.2 Pondération des critères

IV.2.2.1 Carte des zones de recharge préférentielle

Cette carte est obtenue en intégrant l'eau utile comme étant un autre critère de l'analyse multicritère.

- *Matrice de comparaison par paire des critères*

Compte tenu du cadre géologique et des conditions climatiques de la zone d'étude, suite à un examen approfondi des travaux antérieurs de même nature et à notre sens du jugement, la matrice de jugement de comparaison a été obtenue (Tableau 6)

Tableau 6: Matrice de comparaison par paire

Paramètres	Pente	Densité de drainage	Densité de fracturation	Epaisseur d'altération	Occupation du sol	Type de sol	Eau utile
Pente	1	3	1/7	1/2	1/3	1/3	1/3
Densité de drainage	1/3	1	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3
Densité de fracturation	7	7	1	5	2	3	3
Epaisseur d'altération	2	5	1/5	1	1/5	1/2	1/3
Occupation du sol	3	7	1/2	5	1	5	5
Type de sol	3	5	1/3	2	1/5	1	1/2
Eau utile	3	3	1/3	3	1/5	2	1

Tableau 7: Valeurs des vecteurs propres et coefficients de pondération

Paramètres	Vecteur propre	Coefficient de pondération (Cp)
Pente	0,54	0,05
Densité de drainage	0,25	0,03
Densité de fracturation	3,37	0,34
Epaisseur d'altération	0,76	0,08
Occupation du sol	2,53	0,26
Type de sol	1,12	0,11
Eau utile	1,24	0,13
Somme	9,82	1,00

- *Évaluation de la cohérence de la matrice*

Dans le cadre de cette étude, le nombre de critères retenues $N = 7$, la valeur correspondante est égale à 1,32 alors $IA = 1,32$ (Tableau 4: Valeur de l'Indice Aléatoire (IA) (Saaty, 1990))

Ainsi, le ratio de cohérence (R_c) est obtenu suivant une approche méthodologique scindée en plusieurs étapes (Al-Djazouli et al. 2021 ; Lentswe et Molwalefhe 2020) :

- Etape 1 ; on multiplie chaque colonne par le coefficient de pondération (C_p) correspondant, ce qui donne la matrice du tableau ci- dessous (Tableau 8) :

Tableau 8: Première étape du calcul du ratio de cohérence

Paramètres	Pente	Densité de drainage	Densité de fracturation	Epaisseur d'altération	Occupation du sol	Type de sol	Eau utile
Pente	0,05	0,08	0,05	0,04	0,09	0,04	0,04
Densité de drainage	0,02	0,03	0,05	0,02	0,04	0,02	0,04
Densité de fracturation	0,38	0,18	0,34	0,39	0,52	0,34	0,38
Epaisseur d'altération	0,11	0,13	0,07	0,08	0,05	0,06	0,04
Occupation du sol	0,16	0,18	0,17	0,39	0,26	0,57	0,63
Type de sol	0,16	0,13	0,11	0,16	0,05	0,11	0,06
Eau utile	0,16	0,08	0,11	0,23	0,05	0,23	0,13

- Etape 2 : la somme des éléments de chaque ligne de la matrice a été faite, le Tableau 9 illustre cette étape.

Tableau 9: Deuxième étape du calcul du ratio de cohérence

Paramètres	Pente	Densité de drainage	Densité de fracturation	Epaisseur d'altération	Occupation du sol	Type de sol	Eau utile	Somme
Pente	0,05	0,08	0,05	0,04	0,09	0,04	0,04	0,39
Densité de drainage	0,02	0,03	0,05	0,02	0,04	0,02	0,04	0,21
Densité de fracturation	0,38	0,18	0,34	0,39	0,52	0,34	0,38	2,53
Epaisseur d'altération	0,11	0,13	0,07	0,08	0,05	0,06	0,04	0,54
Occupation du sol	0,16	0,18	0,17	0,39	0,26	0,57	0,63	2,37
Type de sol	0,16	0,13	0,11	0,16	0,05	0,11	0,06	0,79
Eau utile	0,16	0,08	0,11	0,23	0,05	0,23	0,13	1,00

- Etape 3 : elle a consisté à diviser chaque total de ligne par le Cp correspondant à cette ligne, le Tableau 10 représente cette étape.

Tableau 10: Troisième étape du calcul du ratio de cohérence

Paramètres	Cp	Somme (S)	S/Cp
Pente	0,05	0,39	7,07
Densité de drainage	0,03	0,21	8,12
Densité de fracturation	0,34	2,53	7,38
Epaisseur d'altération	0,08	0,54	6,88
Occupation du sol	0,26	2,37	9,18
Type de sol	0,11	0,79	6,93
Eau utile	0,13	1,00	7,90

- Etape 4 : on calcule λ_{max} qui correspond à la moyenne des résultats obtenus à l'étape 3. L'opération est la suivante :

$$\lambda_{max} = \frac{7,07 + 8,12 + 7,38 + 6,88 + 9,18 + 6,93 + 7,97,63 - 7}{7} \quad (10)$$

$$\lambda_{max} = 7,63$$

- Etape 5 : On calcule l'indice de cohérence (IC) :

$$Ic = \frac{7,63 - 7}{7 - 1} \quad (11)$$

$$Ic = 0,11$$

L'indice de cohérence nous permet ainsi de déterminer le ratio de cohérence (RC) qui doit être inférieur ou égal à 10%.

$$Rc = \frac{0,11}{1,32} \quad (12)$$

$$Rc = 0,08 = 8\%$$

Avec un **Rc** < 10 % la matrice de hiérarchisation présentée (Tableau 6) est considérée comme cohérente.

IV.2.2.2 Carte des zones de recharge liée intrinsèquement au milieu biophysique

Cette carte a été réalisée en n'intégrant que les facteurs liés au milieu biophysique tels que : la pente, la densité de drainage, la densité de fracturation, l'épaisseur d'altération, l'occupation du sol et le type de sol.

La même procédure que celle de la carte des zones de recharge préférentielle est reprise et résumée dans le tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11: Tableau récapitulatif du calcul des poids des critères

Paramètres	Pente	Densité de drainage	Densité de fracturation	Epaisseur d'altération	Occupation du sol	Type de sol	Vecteur propre	Coefficient de pondération
Pente	1	3	1/7	1/2	1/3	1/3	0,54	0,06
Densité de drainage	1/3	1	1/7	1/5	1/7	1/5	0,25	0,03
Densité de fracturation	7	7	1	5	2	3	3,37	0,39
Epaisseur d'altération	2	5	1/5	1	1/5	1/2	0,76	0,09
Occupation du sol	3	7	1/2	5	1	5	2,53	0,29
Type de sol	3	5	1/3	2	1/5	1	1,12	0,13
Somme							8,58	1

Tableau 12: Tableau récapitulatif du calcul du ratio de cohérence

Paramètres	Pente	Densité de drainage	Densité de fracturation	Epaisseur d'altération	Occupation du sol	Type de sol	λ_{max}	N	Ic	IA	Rc
Pente	0,06	0,09	0,06	0,04	0,10	0,04					
Densité de drainage	0,02	0,03	0,06	0,15	0,04	0,03					
Densité de fracturation	0,44	0,21	0,39	0,45	0,59	0,39					
Epaisseur d'altération	0,13	0,15	0,08	0,09	0,06	0,07					
Occupation du sol	0,19	0,21	0,20	0,45	0,29	0,65					
Type de sol	0,19	0,15	0,13	0,18	0,06	0,13					
Somme	1,02	0,83	0,91	1,36	1,14	1,31	6,57	6	0,11	1,24	9%

IV.2.2.3 Carte des zones de recharge liée intrinsèquement au milieu biophysique combinée à l'eau utile

Cette carte est obtenue en combinant la carte des zones de recharge liées intrinsèquement au milieu biophysique à celle de l'eau utile. En effet, le même poids a été attribué à chaque carte.

IV.2.3 Combinaison et production de la carte résultante.

IV.2.3.1 Carte des zones de recharge préférentielle

La zone d'étude a été délimitée en quatre zones distinctes (Figure 16) des eaux souterraines excellente, bonne, médiocre, mauvaise (Ake et al. 2019 ; Oscar et al. 2016 ; Oularé et al. 2017).

- **La zone dite mauvaise** : elle représente 26,37 % des zones cartographiées. Cette zone est répartie du nord au centre de la zone d'étude dans les environs des provinces telles que Soum, Sanmentenga, Kadiogo, Bazéga, Sissili. Dans ces secteurs, on observe l'accentuation du sol nu et des zones urbaines où la pente est relativement faible ; ainsi que l'eau utile qui est moindre. Par ailleurs, la densité de drainage qui est beaucoup accentué favoriserait le ruissellement au détriment de l'infiltration.

- **La zone dite médiocre** : elle couvre 51,78 %, plus de la moitié de la zone d'étude. C'est la classe dominante. Elle est répartie du nord au sud en passant par les provinces telles que Oudalan, Séno, Sourou, Ioba, Gourma. Cette classe médiocre peut être la conséquence des faibles densités de fracturation, l'eau utile également faible et d'un usage modéré du sol dans cette partie. Ces zones ne favorisent pas la formation d'importants réservoirs souterrains ;
- **La classe dite bonne** : elle occupe 18,31 % de la zone d'étude et apparaît essentiellement au niveau des formations granitiques. Ces zones dites bonnes sont caractérisées par des épaisseurs d'altération élevées, une forte densité de fracturation et une densité hydrographique modérément faible. Elles réunissent les conditions favorables à l'accumulation des eaux souterraines et par conséquent à la formation d'importantes réserves. Au niveau de ces zones, les mégafractures ouvertes interconnectées ont une forte probabilité d'être productives.
- **La classe dite excellente** : elle ne représente que 2,79 % du secteur d'étude et apparaît en grande partie au niveau des formations volcano-sédimentaires principalement au sud de la zone d'étude telles que la province de la Comoé, du Houet, Tuy, Poni. Quelques zones à excellente potentialité sont disséminées dans la partie nord du secteur d'étude dans les environs de la province du Bam, du Yatenga. Ces zones sont les plus recherchées, car elles sont susceptibles de contenir d'énormes réserves d'eau souterraine en raison de la présence d'une forte densité de linéaments, et sont principalement dans des zones cultivées (plantations agro-industrielles). Cette zone est aussi caractérisée par des pluies efficaces en grande proportion et des sols constitués de sables grossiers qui alternent avec des sables limoneux.

De manière générale, les parties Est et Sud sont de très bonnes zones de recharge, tandis que les parties Nord et Ouest ont présenté de très mauvaises caractéristiques en tant que zones de recharge préférentielle dans la zone d'étude.

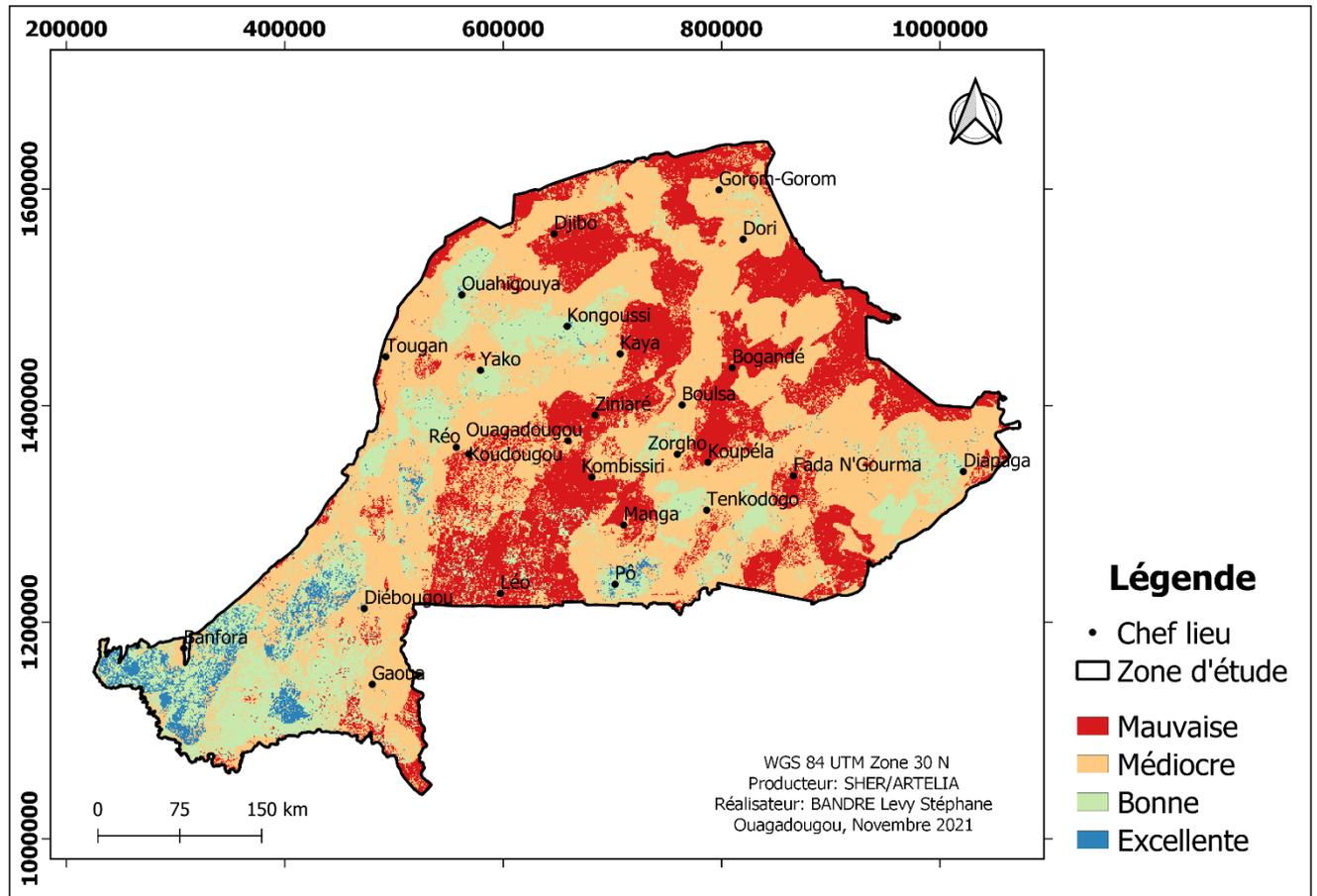


Figure 16: Carte des zones de recharge préférentielle

IV.2.3.2 Carte des zones de recharge liée intrinsèquement au milieu biophysique

En suivant la même procédure que la carte résultante précédente, cette carte ci-dessous est obtenue (Figure 17).

- **La zone dite mauvaise** : elle représente 22,83 % de la zone d'étude. Cette zone est répartie du nord au centre de la zone d'étude dans les provinces telles que Soum, Sanmentenga, Kadiogo, Bazéga, Sissili, Gourma.
- **La zone dite médiocre** : elle couvre plus de la moitié de la zone d'étude 57,16 %. C'est la classe dominante. Elle est répartie du nord au sud en passant par les provinces telles que Oudalan, Séno, Sourou, Ioba, Tapoa.
- **La classe dite bonne** : elle occupe 17,62 % de la zone d'étude et apparaît dans la province du Yatenga, Passoré, Bam.
- **La classe dite excellente** : elle ne représente que 1,70 % du secteur d'étude et apparaît de la zone d'étude telles que la province de la Comoé, une partie du Houet.

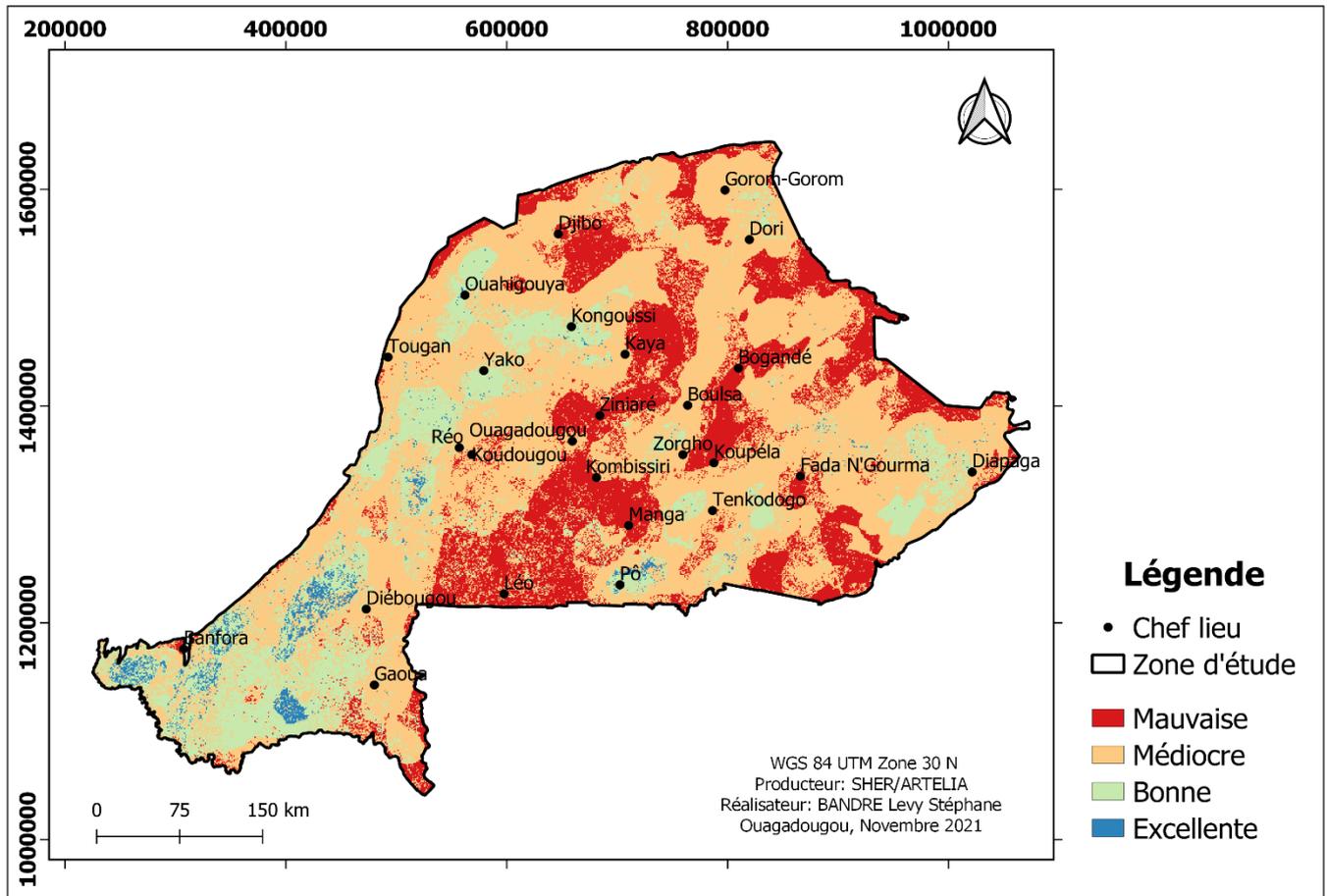


Figure 17: Carte des zones de recharge liée intrinsèquement au milieu biophysique

IV.2.3.3 Carte des zones de recharge liée intrinsèquement au milieu biophysique combinée à la carte de l'eau utile

En suivant la même procédure que la carte résultante précédente, cette carte est obtenue (Figure 18)

- **La zone dite mauvaise** : elle représente 12,18 % de la zone d'étude. Cette zone est principalement observée au nord et au centre de la zone d'étude dans les environs des provinces telles que Soum, Sanmentenga, Kadiogo, Oudalan et Gnagna.
- **La zone dite médiocre** : elle couvre la plus grande proportion soit 68,45 % de la zone d'étude. Elle est répartie dans la majorité des provinces à l'exception de celles du Sud.
- **La classe dite bonne** : elle occupe 17,79 % de la zone d'étude et apparaît en grande proportion au sud de la zone d'étude et dans la province du Yatenga, Bam, Nahouri, Boulgou.
- **La classe dite excellente** : elle ne représente que 0,89 % du secteur d'étude et apparaît principalement à l'extrême sud de la zone d'étude telle que la province de la Comoé et de la Léraba.

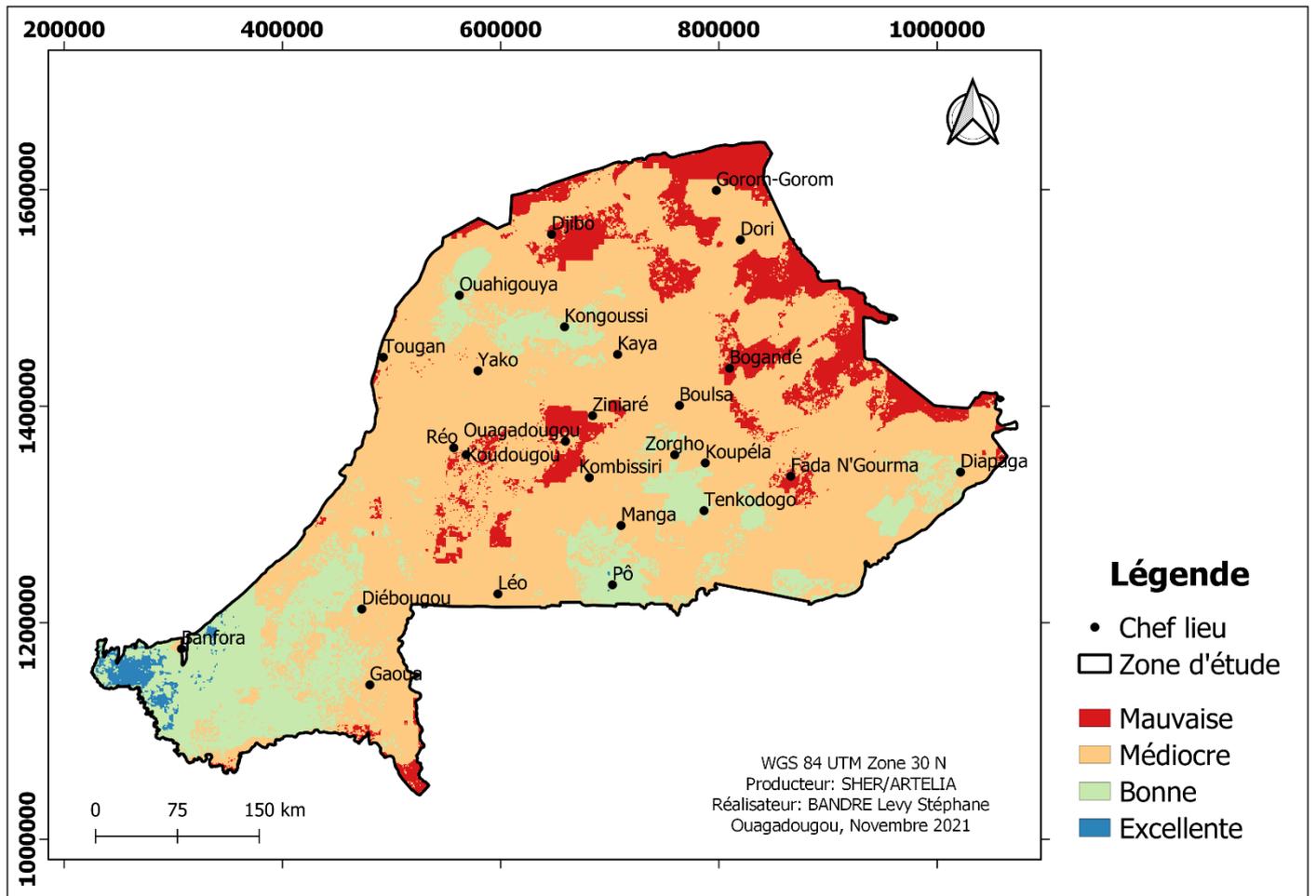


Figure 18: Carte des zones de recharge liée intrinsèquement au milieu biophysique combinée à la carte de l'eau utile

IV.2.4 Comparaison des trois cartes résultantes

Nous constatons des différences entre ces trois cartes produites. Cependant une différence assez légère est observée entre la carte des zones de recharge préférentielle à celle des zones de recharge liée au milieu biophysique. Par ailleurs, une différence plus accentuée est observée entre la carte des zones de recharge préférentielle à celle des zones de recharge liée au milieu biophysique combinée à la carte de l'eau utile. Cela est confirmé par la différence entre les superficies des zones délimitées.

Cette comparaison nous montre l'influence de l'eau utile dans les zones de recharge. En outre la carte des zones de recharge liée au milieu biophysique peut servir de carte comparative dans des zones de socle de pays différents.

Dans la suite de cette étude, la carte des zones de recharge préférentielle qui semble la plus optimale sera considérée. En effet elle intègre parfaitement le critère « eau utile » qui est un facteur climatique et présente le ratio de cohérence le plus faible.

IV.3 Validation de la carte des zones de recharge préférentielle

IV.3.1 Résultats de la méthode de superposition par les débits de forage

La validation de la carte des zones de recharge préférentielle s'est faite par sa superposition avec les forages (environ 18 000 ouvrages) de la base OMES. De plus, avec ces débits, le problème de dépendance ne se pose pas, parce que ce paramètre n'est pas intégré comme critère dans la modélisation spatiale zones de recharge préférentielle. Le pourcentage de forages d'une classe de débit se superposant à une classe de sensibilité donnée a été calculé et consigné dans le Tableau 14.

L'analyse de ce tableau montre que la majorité soit 41,03% des points d'eau à forts débits se superposent aux classes dites excellentes et 38,21% des forages à débit moyen aux classes dites bonnes. Par ailleurs, il ressort de cette analyse que 38,21 % des forages à débit moyen se superposent à la classe de sensibilité bonne et que la classe de sensibilité médiocre recouvre 40% des forages ayant des débits faibles. En outre 37,68% des points d'eau à débit très faible se superposent à la classe de sensibilité mauvaise.

Au total, la plupart (63%) des points d'eau, à débits supérieurs à 5 m³/h, se superposent aux classes de sensibilité bonne et excellente. La présence de ces sources peut témoigner de la validité de la carte des zones de recharge préférentielle en zone de socle établie dans cette étude par la technique de l'analyse multicritère.

Tableau 13: Nombre de forages par classe de sensibilité

Classes de sensibilité \ Classes de débit	Excellent (%)	Bonne (%)	Médiocre (%)	Mauvaise (%)
Fort	295	899	2282	602
Moyen	213	1441	903	879
Faible	114	537	3878	1189
Très faible	97	894	2631	1614
Nombre de forages par classe de sensibilité	719	3771	9694	4284

Tableau 14: Pourcentage d'une classe de débit se superposant à une classe de sensibilité

Classes de sensibilité \ Classes de débit	Excellente (%)	Bonne (%)	Médiocre (%)	Mauvaise (%)
Fort	41,03%	23,84%	23,54%	14,05%
Moyen	29,62%	38,21%	9,32%	20,52%
Faible	15,86%	14,24%	40,00%	27,75%
Très faible	13,49%	23,71%	27,14%	37,68%

IV.3.2 Résultats de la méthode de l'analyse de l'incertitude

Avec la fonction « Statistiques de la couche raster » sur QGIS appliqué sur la carte des zones de recharge préférentielle, la valeur de l'écart type de la série de données (σ) ainsi que la valeur extrême de la série statistique (E) sont obtenues (Tableau 15).

:

$$\sigma = 0,61$$

$$E = 1$$

Dans le cadre de cette étude, le nombre de critère égale à 7 alors m sera égale à 7.

Tableau 15: Récapitulatif des calculs des paramètres de l'analyse de l'incertitude

Ecart type (σ)	0,61
m	7,00
Incertitude moyenne (ΔX)	$\pm 0,25$
E	1,00
K	1,26

$$\Delta X = \frac{0,67}{\sqrt{7}} \quad (12)$$

$$\Delta X = \pm 0,23$$

Alors

$$K = \frac{1 - 0,23}{0,61} \quad (13)$$

$$K = 1,26$$

K= 1,26 alors la carte des zones de recharge a un niveau de confiance de **75 %**.

IV.4 Discussion des résultats obtenus

La délimitation des zones de recharge préférentielle de la zone de socle du Burkina Faso a été réalisée à l'aide du logiciel QGIS avec ses algorithmes inhérents tels que SAGA, et RASTER. Les résultats démontrent que l'utilisation des SIG fournit des outils potentiellement intéressants pour étudier les ressources en eaux souterraines. Cette étude a permis d'évaluer les capacités de QGIS et de l'analyse multicritère guidée par la technique AHP de Saaty pour une compréhension globale des zones de recharge préférentielle dans un socle cristallin fracturé et une zone semi-aride à aride.

Les résultats ont indiqué que la recharge est contrôlée par de nombreux facteurs concurrents. De manière globale le type de sols, l'occupation du sol, l'épaisseur d'altération, la densité de fracturation, la pente, l'eau utile et la densité de drainage jouent un rôle important dans l'influence de la recharge des eaux souterraines.

Les zones avec un faible potentiel de recharge des eaux souterraines dans la zone d'étude sont de taille relativement grande par rapport aux zones de bonne recharge. Les zones de recharge préférentielle des eaux souterraines excellentes et bonnes sont principalement rencontrées au Sud de la zone d'étude. De manière générale, elles correspondent aux zones à forte densité de fracturation, aux zones cultivées, arborées et plans d'eau ; aux zones de pente faible, aux sols sableux et à l'eau utile à valeur élevée. En effet, la densité des fractures dans la zone d'étude joue un rôle important dans la révélation des zones de recharge préférentielle des eaux souterraines. La présence de fractures indique généralement une zone perméable par porosité secondaire et contrôle ainsi le mouvement et le stockage des eaux souterraines. Aussi, cette partie Nord est la zone la plus arrosée de la zone d'étude, d'où la valeur élevée de l'eau utile. On y observe également de vastes plantations industrielles. Des études antérieures réalisées dans les mêmes contextes géologiques et climatiques entre autres dans l'aquifère fracturé semi-aride de Singida, au centre de la Tanzanie (Mussa et al. 2020) ; dans le bassin hydrographique semi-aride de Motloutse, dans l'est du Botswana (Lentswe et Molwalefhe 2020) ; dans les Flinders Ranges, en Australie-Méridionale (Ahmed et al. 2021) ; dans la zone cristalline du Sud-Ouest du Nigeria (Fashae et al. 2013) soutiennent notre hypothèse. En effet la zone de recharge excellente dans les travaux de Mussa et al. 2020, est identifiée au centre de sa zone d'étude, zone correspondante une forte densité de fracturation, une vaste couverture arborée ainsi qu'une grande quantité de pluie. De même dans les travaux de Ahmed et al. 2021, les

zones de recharges dites bonne est observé à l'Est (WONOKA), zone correspondante à une vaste couverture végétale et aussi à une forte densité de fracturation.

Par ailleurs les zones de recharge préférentielle des eaux souterraines dites mauvaises et médiocres représentent une grande proportion de la zone d'étude. Ces zones aperçues majoritairement au Nord et au Centre correspondent à la partie la moins arrosée d'où l'eau utile a une valeur faible. Ce sont aussi des zones avec une faible couverture arborée caractérisée par des arbustes et un sol nu accru qui facilitent un fort ruissellement et une faible infiltration. De faibles densités de fracturation sont aussi constatées. Dans les travaux de Fashae et al.2013 et Lentswe et al.2020, les zones de recharge mauvaises sont aperçues respectivement au Nord (région de Oyo) et au Sud de leur zone d'étude. Ces zones présentent des sols plutôt argileux et de faible densité de fracturation. En outre, nous y remarquons une quantité de pluie faible ainsi qu'une piètre couverture végétale. Ceci vient ainsi soutenir les résultats de cette étude.

De ce qui précède, la densité de fracturation, l'eau utile et l'occupation du sol sont les trois facteurs les plus importants pour déterminer le potentiel de recharge des eaux souterraines dans les bassins d'eaux souterraines semi-arides et fracturés, tandis que la densité de drainage et la pente sont les facteurs les moins importants. Ainsi nos résultats sont globalement en accord avec ceux trouvés dans les études antérieures dans les mêmes contextes climatiques et géologiques.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le présent travail a consisté à évaluer les zones de recharge préférentielle de la zone de socle au Burkina Faso à l'aide d'un logiciel SIG. Le SIG ne peut pas classer ou pondérer l'influence des différents facteurs sur la recharge, et cette limitation a été surmontée en incorporant l'AHP de Saaty. Grâce à l'AHP, il a été possible de déterminer les poids à partir de comparaisons des paramètres influençant la recharge. Il a été démontré qu'une intégration des facteurs hydro-climatiques, topographiques, et géologiques pourrait présenter des informations précieuses concernant les zones appropriées pour le potentiel de recharge des eaux souterraines dans la zone de socle au Burkina Faso. Ce modèle a ainsi permis de fournir de manière qualitative des informations importantes sur la distribution spatiale de la recharge de la zone d'étude

Les résultats ont montré que les zones de recharge préférentielle des eaux souterraines sont situées dans des zones à forte densité de fracturation, des zones cultivées, dans les zones où l'eau utile est élevée et dans les zones à sables grossiers. Près de 21 % de la zone d'étude ont une potentialité en eau souterraine bonne et excellente. Elles sont localisées majoritairement dans la partie Sud de la zone d'étude. De manière générale, nous avons observé que la densité de fracturation domine les endroits à fort potentiel de recharge des eaux souterraines. Compte tenu de la demande en eau croissante dans la zone d'étude, les autorités locales et les gestionnaires de l'eau peuvent utiliser la carte développée. La connaissance et la compréhension des zones de recharge préférentielle en zone de socle du Burkina Faso peuvent servir de point de départ pour la protection et la gestion des eaux souterraines.

La méthodologie utilisée dans cette étude s'est donc avérée efficace pour délimiter les zones de recharge des eaux souterraines. Ainsi, cette approche est recommandée pour compléter les études géophysiques et autres études d'exploration des eaux souterraines, y compris les approches géochimiques et isotopiques. La validation de la carte résultante reflète globalement la réalité du terrain.

En termes de perspectives, nous tenons à rappeler que l'utilisation des SIG dans l'intégration de diverses sources de données connaît aussi des limites. Premièrement, la difficulté dans la détermination du nombre de critères réside dans la limitation du nombre de critères que l'on peut prendre en compte. Selon SAATY (1980), le choix des critères doit s'arrêter à sept par niveau de hiérarchisation. Ainsi, les sept critères retenus dans cette méthode ont été jugés comme les plus significatifs dans la détermination des zones de recharge.

En second lieu, la difficulté est la subjectivité des poids assignés aux critères dans l'application de la méthode AHP de Saaty. La méthode d'analyse multicritère fait des simplifications inacceptables selon la logique mathématique. En effet, elle fait implicitement l'hypothèse que tous les critères considérés dans la réalisation d'une carte thématique sont parfaitement comparables (Joerin, 1995). En d'autres termes, cette méthode admet qu'on additionne l'eau utile aux densités de fractures, etc. Toutefois, la standardisation des critères facilite et rend possible leurs combinaisons. Cette standardisation effectuée dans un intervalle commun de 0 à 10 est donc nécessaire car les différents critères ont été mesurés sur des échelles différentes au départ (El Morjani, 2002). Pour la pondération des critères, la détermination des poids et des cotes s'est basée sur la revue documentaire et l'analyse des effets relationnels inter critères selon nos propres connaissances hydrogéologiques. Les valeurs attribuées aux critères ont parfois tendance à surestimer ou sous-estimer la recharge de la nappe.

En outre la carte des zones de recharge préférentielle peut contenir des erreurs, car le critère densité de drainage, densité de fracturation et épaisseur d'altération ont été obtenu par interpolation. L'interpolation peut entraîner des erreurs dans la réalisation des paramètres. Elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles (Ake et al. 2018).

Bien que de ce fait, la carte des zones de recharge préférentielle que nous avons réalisée reste fiable et cela a été prouvée par sa validation. Cette étude reste donc une approche efficace pour cartographier les zones de recharge préférentielle.

VI. RECOMMANDATIONS

Dans le but de renforcer la fiabilité des résultats, nous recommandons ce qui suit :

- Affiner les résultats obtenus par d'autres études, en évoluant d'une analyse multicritère des zones de recharge préférentielle vers les zones aquifères favorables en intégrant notamment les critères « lithologie/géologie, perméabilité du sol ».
- Valider la carte développée par des mesures géophysiques de terrain
- Appliquer cette méthodologie sur de petites zones de la zone d'étude

VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmed Alaa, Abdullah Alrajhi, et Abdulaziz S. Alquwaizany. 2021. « Identification of Groundwater Potential Recharge Zones in Flinders Ranges, South Australia Using Remote Sensing, GIS, and MIF Techniques ». *Water* 13(18):2571. doi: 10.3390/w13182571.
- Ake Gabriel Etienne, Kan Jean Kouame, Daouda Fofana, Oularé Sekouba, Affoué Bénédicte Koffi, et Jean Patrice Jourda. 2019. « Cartography for the Aquifer Potential Recharge Areas of the Base of the Department of Aboisso (South-East Côte d'Ivoire) ». *Journal of Geoscience and Environment Protection* 7(8):49-68. doi: 10.4236/gep.2019.78004.
- Ake Gabriel Etienne, Kan Jean Kouame, Affoué Bénédicte Koffi, et Jean Patrice Jourda. 2018. « Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (sud-est de la Côte d'Ivoire) ». *Revue des sciences de l'eau* 31(2):129-44. doi: 10.7202/1051696ar.
- Akoudjin Massouroudini, Sébastien Kiéma, Mamadou Sangare, Jean César, Jérémy Bouyer, et Chantal Kabore-Zoungrana. 2016. « Influence des activités agricoles sur la végétation le long d'un gradient pluviométrique nord-sud du Burkina Faso ». *[VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement* 16(1).
- Al-Djazouli Mahamat Ouchar, Karim Elmorabiti, Abdelmejid Rahimi, Omayma Amellah, et Omer Abdelrahim Mohammed Fadil. 2021. « Delineating of Groundwater Potential Zones Based on Remote Sensing, GIS and Analytical Hierarchical Process: A Case of Waddai, Eastern Chad ». *GeoJournal* 86(4):1881-94. doi: 10.1007/s10708-020-10160-0.
- Assemian Assie Emile, Jean Biemi, et Fernand Kouame. s. d. « Etude Des Potentialités En Eau Souterraine Du Département de Bongouanou Centre Est de La CÔTE D'IVOIRE Par Télédétection et SIG ».
- Assemian Emile Assie, Fernand Koffi Kouamé, Mahaman Bachir Saley, Kouadio Affian, Marc Youan Ta, Jean Patrice Roger Jourda, et Jean Biemi. 2014. « Étude de la productivité d'un aquifère de socle et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives : cas de la région de Bongouanou, est de la Côte d'Ivoire ». *Revue des sciences de l'eau* 27(1):81-97. doi: 10.7202/1021984ar.

- Benjmel Khalid, Fouad Amraoui, Said Boutaleb, Mohammed Ouchchen, Amine Tahiri, et Amine Touab. 2020. « Mapping of Groundwater Potential Zones in Crystalline Terrain Using Remote Sensing, GIS Techniques, and Multicriteria Data Analysis (Case of the Ighrem Region, Western Anti-Atlas, Morocco) ». *Water* 12(2):471. doi: 10.3390/w12020471.
- Buchhorn Marcel, Myroslava Lesiv, Nandin-Erdene Tsendbazar, Martin Herold, Luc Bertels, et Bruno Smets. 2020. « Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2 ». *Remote Sensing* 12(6):1044. doi: 10.3390/rs12061044.
- Dar Tanveer, Nachiketa Rai, et Aadil Bhat. 2020. « Delineation of potential groundwater recharge zones using analytical hierarchy process (AHP) ». *Geology, Ecology, and Landscapes* 1-16.
- Das Sumit, et Sudhakar D. Pardeshi. 2018. « Integration of Different Influencing Factors in GIS to Delineate Groundwater Potential Areas Using IF and FR Techniques: A Study of Pravara Basin, Maharashtra, India ». *Applied Water Science* 8(7):197. doi: 10.1007/s13201-018-0848-x.
- Fashae Olutoyin, Moshood Tijani, Tijani, Abel Talabi, et Adedeji Oluwatola. 2013. « Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach Olutoyin A. Fashae • Moshood N. Tijani • Abel O. Talabi • Oluwatola I. Adedeji ». *journal of applied water science*. doi: 10.1007/s13201-013-0127-9.
- Gleeson Tom, Kevin M. Befus, Scott Jasechko, Elco Luijendijk, et M. Bayani Cardenas. 2016. « The Global Volume and Distribution of Modern Groundwater ». *Nature Geoscience* 9(2):161-67. doi: 10.1038/ngeo2590.
- Haouchine Abdelhamid, Boudoukha Abderrahmane, Fatima Zohra Haouchine, et Rachid Nedjaï. 2010. « Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride ». *EUROJOURNALS* 45(4):1.
- Hendrickx Jan M. H. 1992. « Groundwater Recharge. A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge (Volume 8, International Contributions to

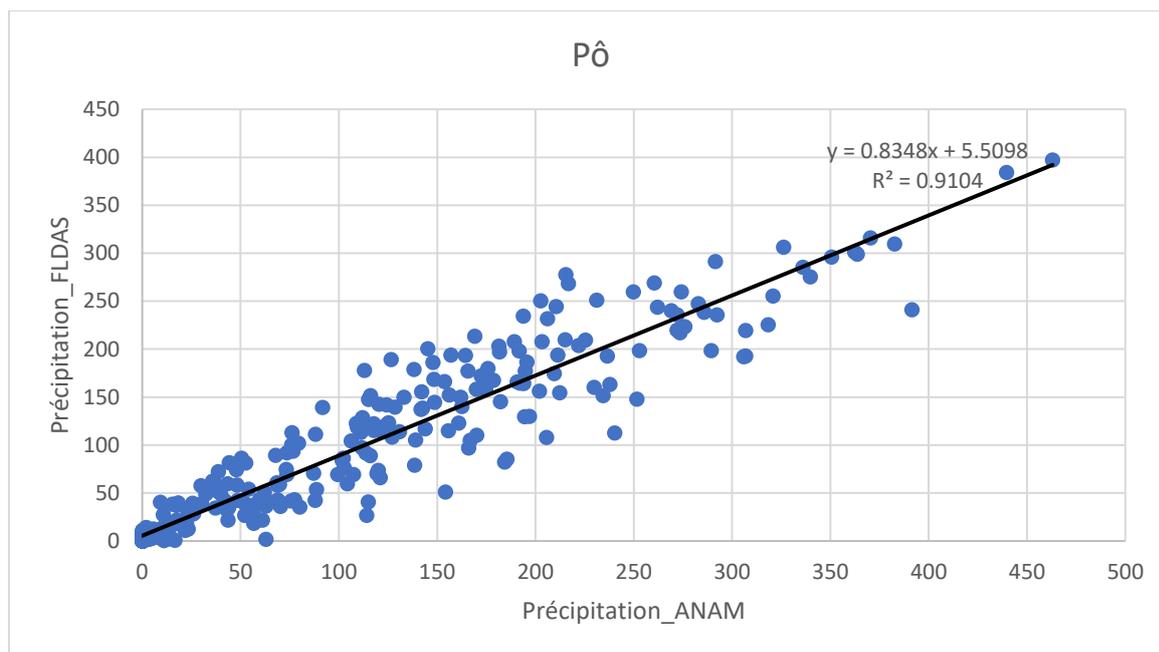
- Hydrogeology) ». *Journal of Environmental Quality* 21(3):512-512. doi: 10.2134/jeq1992.00472425002100030036x.
- Hernández-Mora, Llamas, et L. M. Cortina. 2001. « Misconceptions in Aquifer Over-Exploitation: Implications for Water Policy in Southern Europe ». *Undefined*.
- Ibrahim Boubacar, Harouna Karambiri, et Jan Polcher. s. d. « Evolution des principales caractéristiques de la saison des pluies au Burkina Faso à partir des données pluviométriques de cinq modèles climatiques régionaux (MCR) ». 5.
- Koudou Aimé, Bernard Adiaffi, Assoma Vincent, Parfait Sombo, E. M. E. Amani, et J. Biemi. 2013. « Concept of a decision-making tool for the groundwater prospecting in hard rock area; southeast of Ivory Coast ». *Geo-Eco-Trop* 37:211-26.
- Kumar Ajay, NC Mondal, et Shakeel Ahmed. 2020. « Identification of Groundwater Potential Zones Using RS, GIS and AHP Techniques: A Case Study in a Part of Deccan Volcanic Province (DVP), Maharashtra, India ». *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 48. doi: 10.1007/s12524-019-01086-3.
- Lentswe Gaolatlhe Bhutto, et Loago Molwalefhe. 2020. « Delineation of Potential Groundwater Recharge Zones Using Analytic Hierarchy Process-Guided GIS in the Semi-Arid Motloutse Watershed, Eastern Botswana ». *Journal of Hydrology: Regional Studies* 28:100674. doi: 10.1016/j.ejrh.2020.100674.
- Mokadem Naziha, Emna Boughariou, Matías Mudarra, Fatma Ben Brahim, Bartolomeo Andreo, Younes Hamed, et Salem Bouri. 2018. « Mapping Potential Zones for Groundwater Recharge and Its Evaluation in Arid Environments Using a GIS Approach: Case Study of North Gafsa Basin (Central Tunisia) ». *Journal of African Earth Sciences* 141:107-17. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2018.02.007.
- Mukherjee Indrani, et Umesh Kumar Singh. 2020. « Delineation of Groundwater Potential Zones in a Drought-Prone Semi-Arid Region of East India Using GIS and Analytical Hierarchical Process Techniques ». *CATENA* 194:104681. doi: 10.1016/j.catena.2020.104681.
- Mussa Kassim Ramadhani, Ibrahimu Chikira Mjemah, et Revocatus Lazaro Machunda. 2020. « Open-Source Software Application for Hydrogeological Delineation of Potential

- Groundwater Recharge Zones in the Singida Semi-Arid, Fractured Aquifer, Central Tanzania ». *Hydrology* 7(2):28. doi: 10.3390/hydrology7020028.
- Oscar Onétié, Lasm Théophile, Coulibaly Adama, Derving Baka, Fossou Rosine, Youan Marc, Yao François, et Kouassi Aoulou. 2016. « Apport Du SIG Et De L'analyse Multicritère Dans La Prospection Hydrogéologique Du Socle Précambrien De Gagnoa (Centre-Ouest De La Côte d'Ivoire) ». *European Scientific Journal, ESJ* 12:137. doi: 10.19044/esj.2016.v12n23p137.
- Oularé Sékouba, Gnanoui Adon, Lucette Akpa, Saley Mahaman Bachir, Fernand Kouamé, et René Therrien. 2017. « Identification Des Zones 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 ». *European Scientific Journal* 13. doi: 10.19044/esj.2017.v13n36p192.
- Ranasinghe-Arachchilage Chathuri, Abdullah Alrajhi, et G. Hewa. 2021. « Comparison of Multicriteria Decision-Making Techniques for Groundwater Recharge Potential Zonation: Case Study of the Willochra Basin, South Australia ». *Water* 13:525. doi: 10.3390/w13040525.
- Raviraj, Nimmi Kuruppath, et Balaji Kannan. 2017. « Identification of Potential Groundwater Recharge Zones Using Remote Sensing and Geographical Information System in Amaravathy Basin ». *Journal of Remote Sensing & GIS* 06(04). doi: 10.4172/2469-4134.1000213.
- Sener Erhan, Aysen Davraz, et Mehmet Ozcelik. 2005. « An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey ». *Hydrogeology Journal* 13:826-34. doi: 10.1007/s10040-004-0378-5.
- Shaban Amin, Mohamad Khawlie, et Chadi Abdallah. 2006. « Use of Remote Sensing and GIS to Determine Recharge Potential Zones: The Case of Occidental Lebanon ». *Hydrogeology Journal* 14:433-43. doi: 10.1007/s10040-005-0437-6.
- Siddi Raju, Sudarsana Raju, et M. Rajasekhar. 2019. « Identification of Groundwater Potential Zones in Mandavi River Basin, Andhra Pradesh, India Using Remote Sensing, GIS and MIF Techniques ». *HydroResearch* 2:1-11. doi: 10.1016/j.hydres.2019.09.001.

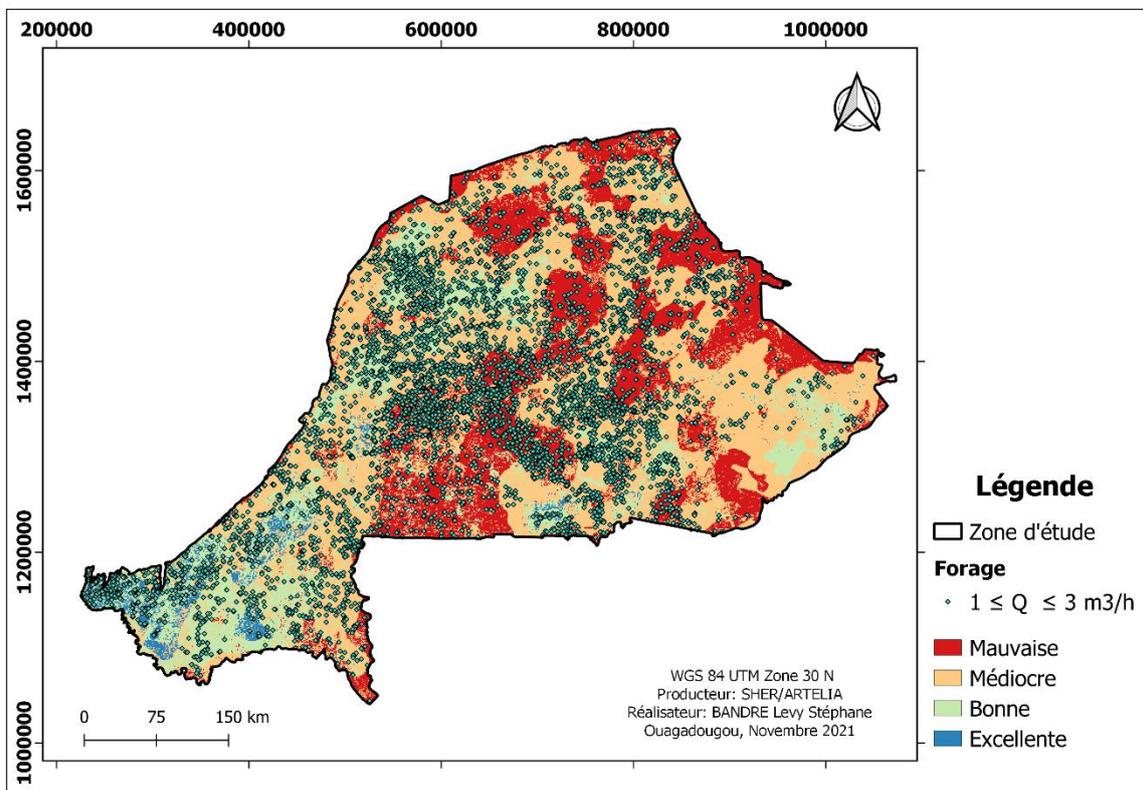
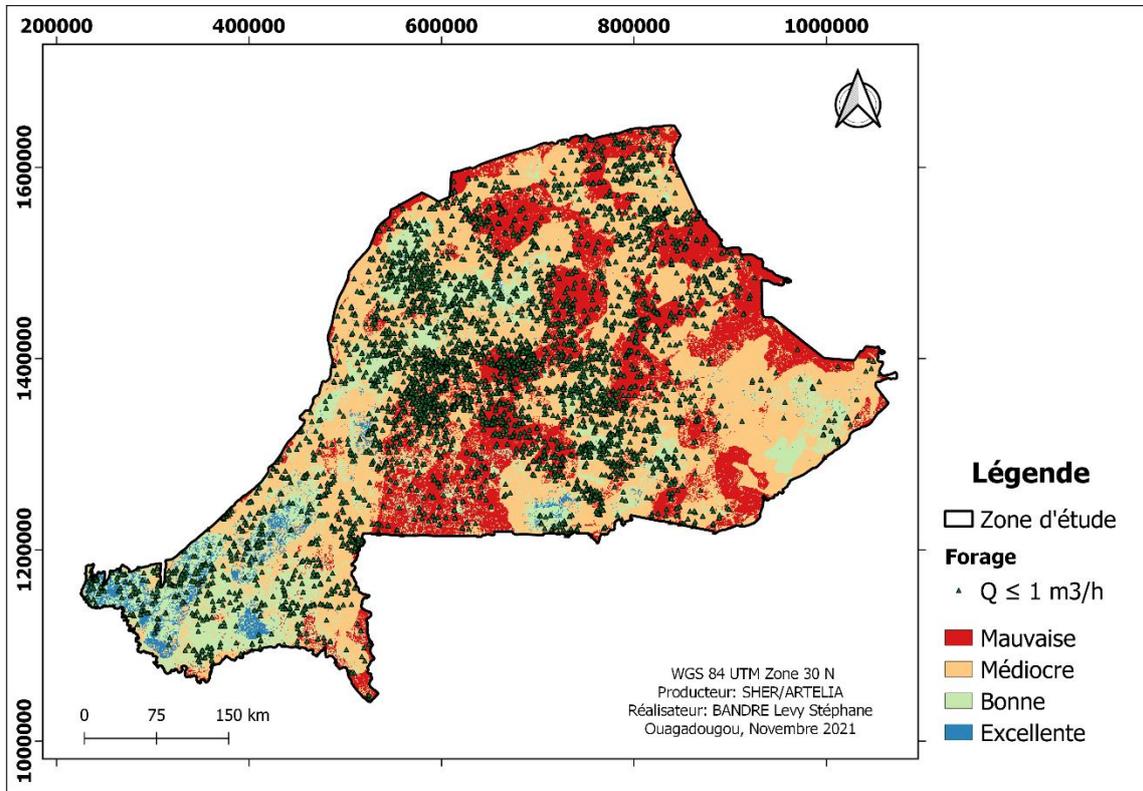
Zabihi Hasan, Mohsen Alizadeh, Philip Kibet Langat, Mohammadreza Karami, Himan Shahabi, Anuar Ahmad, Mohamad Nor Said, et Saro Lee. 2019. « GIS Multi-Criteria Analysis by Ordered Weighted Averaging (OWA): Toward an Integrated Citrus Management Strategy ». *Sustainability* 11(4):1009. doi : 10.3390/su11041009.

ANNEXES

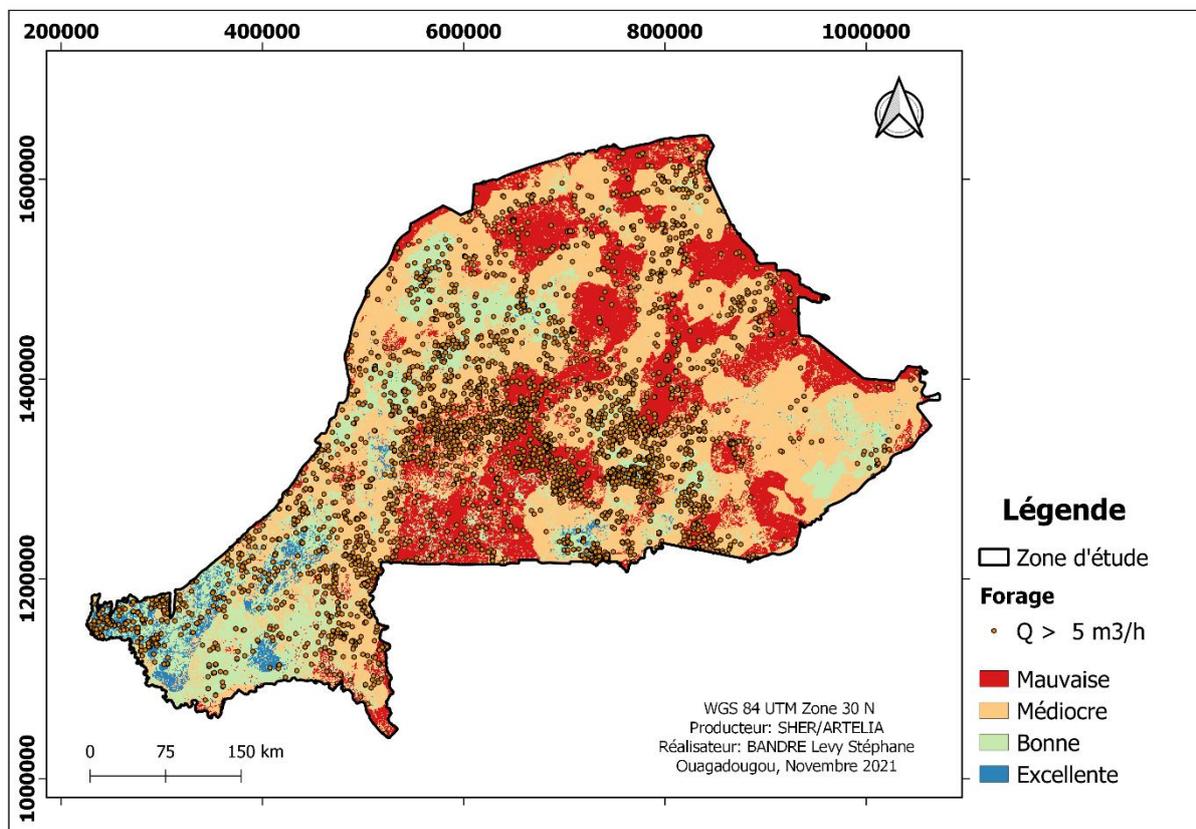
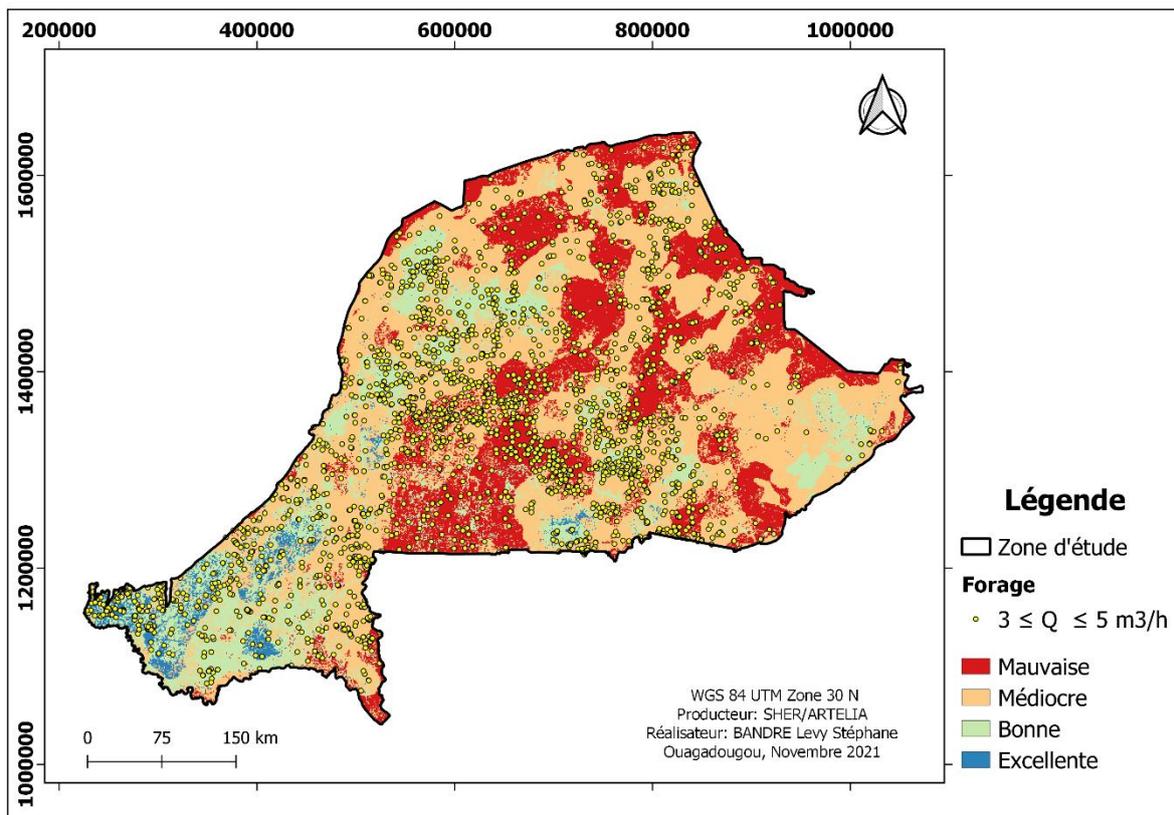
Annexe 1 : Corrélation entre la pluviométrie de l'ANAM et de FLDAS



Annexe 2 : Validation de la carte des zones de recharge préférentielle par la méthode de superposition par les débits de forage



Apport du SIG et de l'analyse multicritère à l'estimation des zones de recharge préférentielle en zone de socle au Burkina Faso



Annexe 3 : Quelques échantillons des paramètres de forage

province	commune	vill_sect	quartier	bv_int	bv_nat	ss_bv	zone_ae	zone_oea	altitude	debut_trav	fin_trav	prof_tot	prof equip	ep_alt
1	INI	KAMPTI	DANWASSARA	Danwassara	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	450,00000000...	1995-01-18	NULL	53,000000000...	42,000000000...
2	INI	KAMPTI	OULMANA	Oulkana	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	450,00000000...	1983-03-03	NULL	61,000000000...	20,000000000...
3	INI	KAMPTI	KAMPTI	Q-Secteur 1	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	440,00000000...	1994-06-09	NULL	55,000000000...	21,000000000...
4	INI	KAMPTI	KOURSIERA	Q- Koursiera	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	412,00000000...	1983-05-20	NULL	43,000000000...	27,000000000...
5	INI	NAKO	SANGOL	1 km à l'est d...	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	405,00000000...	1994-03-02	NULL	37,799999237...	6,000000000...
6	JUET	BOBO-DIOUL...	KORO	au pied de la ...	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	400,00000000...	1995-03-15	NULL	45,000000000...	12,000000000...
7	Y	HOUNDE	DOUFIE	Q-Doufien	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	400,00000000...	1988-12-03	NULL	49,900001525...	15,000000000...
8	JUET	LENA	BAH	Q-Kwene	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	391,00000000...	1988-04-20	NULL	48,200000762...	10,000000000...
9	INI	LOROPENI	DAKOURA	campement ...	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	385,00000000...	1996-03-28	NULL	67,500000000...	38,700000762...
10	INI	DJIGOUÉ	DJIGOUÉ	au nord, à 50...	Comoé	Comoé	Baoué-Iringou	Cascades	Direction Rég...	380,00000000...	1996-03-13	NULL	50,000000000...	16,299999237...
11	INI	LOROPENI	NIOTA (DBIRE)	niota centre	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	380,00000000...	1995-02-26	NULL	59,000000000...	39,299999237...
12	RABA	DOUNA	GANA (DOU...	50 m au N de...	Comoé	Comoé	Léraba	Cascades	Direction Rég...	380,00000000...	1989-05-19	NULL	49,000000000...	43,000000000...
13	JUET	KARANGASS...	PINGUINA	PINGUINA	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	380,00000000...	1987-12-04	NULL	33,599998474...	25,000000000...
14	INI	LOROPENI	LIBIRA	Tetchono	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	380,00000000...	1983-03-15	NULL	59,400001525...	42,000000000...
15	JUGOURIBA	TIANKOURA	DIASSARA	quartier GOL...	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	379,00000000...	1996-06-08	NULL	58,000000000...	39,200000762...
16	INI	LOROPENI	DAKOURA	quartier 1	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	375,00000000...	1996-03-18	NULL	55,299999237...	36,500000000...
17	MOE	OUO	NORKAMA	Environ 900 ...	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	370,00000000...	1990-12-22	NULL	62,200000762...	50,000000000...
18	INI	NAKO	DIANGARA	quartier HINE	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	368,00000000...	1994-05-29	NULL	31,799999237...	12,000000000...
19	INI	LOROPENI	LOKOSSO-GAN	250 m de l'ax...	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	366,00000000...	1992-07-12	NULL	79,199996948...	70,000000000...
20	INI	LOROPENI	LOKOSSO-GAN	Q-Lokosso sa...	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	366,00000000...	1982-03-19	NULL	65,300003051...	56,400001525...
21	INI	KAMPTI	POLTIONAO	Q-Poltianao	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	365,00000000...	1996-04-16	NULL	49,400001525...	32,700000762...
22	MOE	OUO	PAMBIE-SOK...	Environ 100 ...	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	365,00000000...	1990-12-23	NULL	48,299999237...	24,000000000...
23	INI	LOROPENI	KASSITA	NULL	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	365,00000000...	1983-03-27	NULL	55,000000000...	55,000000000...
24	INI	NAKO	GUIGUINE	Nambile Pale	Volta	Mouhoun	Mouhoun Inf...	Mouhoun	Direction Rég...	363,00000000...	1994-05-13	NULL	37,799999237...	20,000000000...

Annexe 4 : Variogramme de l'épaisseur d'altération

