CONTRIBUTION À UNE MEILLEURE CONNAISSANCE SUR LA RECHARGE DES EAUX SOUTERRAINES AU BURKINA FASO : CAS DU SOUS-BASSIN DU KOU

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE **MASTER**

SPECIALITE : GENIE DE L'EAU, DE L'ASSAINISSEMENT ET DES AMENAGEMÉNTS HYDROAGRICOLES

Présenté et soutenu publiquement le 26 janvier 2026 par

Victoria REMADJI (20180794)

Directeur de mémoire : Dr. Angelbert Chabi BIAOU, Enseignant-Chercheur à l'Institut 2iE, Département Génie de l'Eau, de l'Assainissement et des Aménagements Hydro-agricoles.

Encadrant 2iE : Dr. Moussa Diagne FAYE, Enseignant-Chercheur à l'Institut 2iE, Département Génie de l'Eau, de l'Assainissement et des Aménagements Hydro-agricoles.

Maître de stage : Mme. Tani Fatimata Andréa COULIDIATI, Ingénieure en Génie Civil et Hydraulique, Laboratoire Eaux Hydrosystèmes Agricultures (LEHSA) à l'Institut 2iE.

Structure d'accueil du stage : Laboratoire Eaux Hydrosystèmes Agricultures (LEHSA)

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Pr. Mahamadou KOITA**

Membres et correcteurs : **Dr. Elie SAURET**

M. Younoussa GAMSORE

Promotion [2025/2026]

DÉDICACES

Je dédie ce travail, avant tout, à Dieu le Tout-Puissant pour m'avoir donné la force et la patience d'aller jusqu'au bout de ce projet.

À mes très chers parents : NGARMADJI YETIMBAYE Changement et NDIGUESSEM Clémentine. Aucune dédicace ne peut égaler l'amour inconditionnel et les prières quotidiennes tout au long de mon existence.

Je dédie également à mes frères : Brillant, Fidel, Francis, Ghislain ainsi qu'à ma sœur Confort, pour leur affection et leur soutien constant qui m'ont permis de garder l'équilibre.

À ma grand-mère NELOUMAL Margueritte

À ma défunte grande sœur RONEL Alliance ainsi qu'à mon défunt grand-père, Luc YETIMBAYE, qu'ils reposent en paix, et que ces lignes soient un modeste hommage aux valeurs et aux souvenirs qu'ils ont laissés en nous.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont apporté une pierre à l'édifice de mon éducation, je vous exprime ma profonde gratitude.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance à l'ensemble des personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

À L'Institut 2iE, pour m'avoir accueilli et offert une formation d'excellence, me permettant d'acquérir les compétences nécessaires à la réalisation de ce travail.

À mon directeur de mémoire, Dr Angelbert Chabi BIAOU, Enseignant-Chercheur à l'Institut 2iE, Département Génie de l'Eau, de l'Assainissement et des Aménagements Hydro-agricoles, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de ce travail.

À mon encadreur interne Dr Moussa Diagne FAYE**,** Enseignant-Chercheur à l'Institut 2iE, Département Génie de l'Eau, de l'Assainissement et des Aménagements Hydro-agricoles pour son accompagnement rigoureux, la pertinence de ses conseils, sa disponibilité, et la qualité de son encadrement, qui ont été déterminants dans la conduite de ce travail.

À mon maître de stage, Mme Tani F. Andréa COULIDIATI, Ingénieure en Génie Civil et Hydraulique, Doctorante au Laboratoire Eaux Hydrosystèmes Agricultures (LEHSA) à l'Institut 2iE pour son accompagnement bienveillant, ses orientations tout au long de ce travail, sa disponibilité et ses précieux conseils qui ont contribué à la réussite de cette étude**.**

À Ingénieur SAYAMBAYE Christian, pour ses conseils et son accompagnement.

À toute la famille NGARMADJI, merci pour votre amour inconditionnel.

À mes camarades du laboratoire (LEHSA), pour votre sens de l'écoute et d'orientation.

Enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire par leurs encouragements, leurs suggestions et leurs soutiens, je vous exprime ma profonde gratitude.

RESUMÉ

Dans le sous-bassin du Kou, situé au sein de la région des Hauts-Bassins au Burkina Faso, les eaux souterraines représentent le pilier de l'alimentation en eau potable, de la sécurité alimentaire et du développement socio-économique. Toutefois, la pérennité de cette ressource est menacée par la variabilité climatique et l'intensification des pressions anthropiques. Ce travail vise à approfondir la compréhension des processus de recharge des nappes souterraines. Pour atteindre cet objectif, la méthodologie adoptée a combiné l'utilisation de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG), intégrés à une analyse multicritère (AHP), pour cartographier les zones potentielles de recharge. Cette approche a été couplée à des méthodes isotopiques ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, ^{3}H) pour tracer l'origine des eaux et leur renouvellement. Parallèlement, l'analyse hydrogéochimique a identifié les processus de minéralisation, tandis que la méthode des fluctuations piézométriques a servi à quantifier la recharge effective. Les résultats cartographiques indiquent que les zones de recharge (modérées, fortes et très fortes), couvrent 75% de la surface du sous-bassin contre 25% de la surface des zones de non-recharge (faibles à très faibles). La validation du modèle AHP indique une précision globale de 72,7% et un indice de kappa de 0,65, ce qui est jugé satisfaisant. L'analyse isotopique ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) confirme que la recharge provient des épisodes de pluies. Les teneurs en tritium (^{3}H) révèlent un mélange d'eaux récentes et anciennes, ce qui témoigne d'un cycle de renouvellement lent. L'analyse chimique, quant à elle, montre que la composition des eaux provient de l'hydrolyse des silicates et l'altération des carbonates, bien que les signes de pression anthropique locale apparaissent. Enfin, la recharge annuelle estimée oscille entre 0,67 et 129,12 mm/an, confirmant une forte variabilité liée à la pluviométrie.

Mots-clés :

1- **Mécanismes de recharge**
2- **Fluctuation piézométrique**
3- **Hydrogéochimie**
4- **SIG**
5- **Sous-bassin du Kou (Burkina Faso).**

ABSTRACT

In the Kou sub-basin, located in the Hauts-Bassins region of Burkina Faso, groundwater constitutes the backbone of drinking water supply, food security, and socio-economic development. However, the sustainability of this resource is threatened by climate variability and intensifying anthropogenic pressures. This study aims to deepen the understanding of groundwater recharge processes. To achieve this objective, the methodology combined remote sensing and Geographic Information Systems (GIS), integrated with Multi-Criteria Decision Analysis (AHP), to map potential recharge zones. This approach was coupled with isotopic methods ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, ^{3}H) to trace water origin and renewal. In parallel, hydrogeochemical analysis identified mineralization processes, while the Water Table Fluctuation (WTF) method was used to quantify effective recharge. Mapping results indicate that recharge zones (moderate, high, and very high) cover 75% of the sub-basin area, compared to 25% for non-recharge zones (low to very low). The validation of the AHP model shows an overall accuracy of 72.7% and a Kappa index of 0.65, which is considered satisfactory. Isotopic analysis ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) confirms that recharge originates from rainfall events. Tritium (^{3}H) levels reveal a mixture of recent and old waters, indicating a slow renewal cycle. Chemical analysis shows that water composition stems from silicate hydrolysis and carbonate weathering, although signs of local anthropogenic pressure are emerging. Finally, the estimated annual recharge ranges from 0,67 to 129.12 mm/year, confirming high variability linked to rainfall patterns.

Keywords :

1. **Recharge mechanisms**
2. **Water table fluctuation**
3. **Hydrogeochemistry**
4. **GIS**
5. **Kou sub-basin (Burkina Faso).**

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
^{3}H	Tritium
ACP	Analyse en Composantes principales
AEM	Agence de l'Eau du Mouhoun
AHP	Processus Hiérarchique Analytique
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
AMMA-CATCH	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique
ANAM	Agence Nationale de la Météorologie
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BUNASOLS	Bureau National des Sols
CIEH	Centre Interafricain d'Études hydrauliques
DGRE	Direction générale des Ressources en Eau
Eh	Potentiel d'oxydoréduction
ENVI	Environment for Visualizing Images
ESA	European Space Agency
Gfg/NP gfg	Grès fins glauconieux
Ggq/NPggg	Grès à granules de quartz
GIS / SIG	Geographic Information System / Système d'Information géographique
GKS/NPggc	Grès de Koutiala-Sindou
GNIP	Global Network of Isotopes in Precipitation
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
LSWI	Land Surface Water Index
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MSI	MultiSpectral Instrument
NDBI	Normalized Difference Built-up Index
NDMI	Normalized Difference Moisture Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
PAEA	Programme d'Approvisionnement en Eau et Assainissement
PC	Composante principale

pH	Potentiel Hydrogène
RFU	Réserve facilement utilisable
SNAP	Sentinel Application Platform
SWIR	Short-Wave Infrared
UTM	Universal Transverse Mercator
WTF	Water Table Fluctuation
$\delta^{15}N$	Azote-15
$\delta^{18}O$	Oxygène-18
$\delta^{2}H$	Deutérium

SOMMAIRE

DÉDICACES i
REMERCIEMENTS ii
RESUMÉ iii
ABSTRACT iv
LISTE DES ABREVIATIONS v
INTRODUCTION 6
I. REVUE DE LA LITTÉRATURE 7
I.1 Typologie des mécanismes de recharge 7
I.2 Détermination de la recharge par les différentes méthodes 8
I.3 Synthèse des estimations de la recharge dans la zone d'étude 9
II. MATÉRIELS ET MÉTHODES 10
II.1 Présentation de la zone d'étude 10
II.1.1 Cadre climatique 11
II.1.2 Géomorphologie et topographie 11
II.1.3 Pédologie du sous-bassin de Kou 12
II.1.4 Géologie et hydrogéologie 13
II.1.5 Occupation des sols 14
II.2 Matériels Utilisés 15
II.2.1 Logiciels utilisés 15
II.3 Méthode par la télédétection et SIG 16
II.3.1 Choix des données satellitaires 16
II.3.2 Analyse en Composantes Principales 16
II.3.3 Rapports de bandes 16
II.3.4 Calcul des indices biophysiques 16
II.3.5 Composition colorée 18
II.3.6 Application du filtre de Sobel 18
II.3.7 Extraction des linéaments 19
II.3.8 Identification des paramètres influençant la recharge des eaux souterraines 20

II.3.9 Méthode isotopique 28
II.3.10 Méthode hydrogéochimique 29
II.3.11 Quantification de la recharge 29
III. RÉSULTATS ET DISCUSSION 31
III.1 Résultats de la cartographie des zones potentielles de recharge 31
III.1.1 Analyse en composantes principales sentinel-2 31
III.1.2 Rapport des bandes 32
III.1.3 Analyse des indices biophysiques 33
III.1.4 Composition colorée 37
III.1.5 Application des filtres Sobel 39
III.1.6 Extraction des linéaments 40
III.1.7 Calcule de poids normalisés 41
III.1.8 Carte des zones de potentiel de recharge 42
III.1.9 Validation de la carte de recharge par la matrice de confusion 44
III.2 Hydrogéochimie 45
III.2.1 Paramètres physico-chimiques 45
III.2.2 Analyse en composantes principales 46
III.2.3 Qualité de représentation des variables (cos^2) 47
III.2.4 Matrice de corrélation 48
III.2.5 Contrôle qualité des analyses chimiques 49
III.2.6 Diagramme hydrogéologique des faciès 49
III.3 Analyses isotopiques 50
III.3.1 Diagramme δ^2H Vs $\delta^{18}O$ 50
III.3.2 Résultats du tritium (^3H) 51
III.4 Evaluation de recharge 52
IV. LIMITES DE L'ÉTUDE 53
CONCLUSION ET PERSPECTIVES 55
BIBLIOGRAPHIE 57
ANNEXES 63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Synthèse sur les mécanismes de recharge. 7
Tableau 2: Synthèse d'estimation de recharge 9
Tableau 3: Cadre climatique 11
Tableau 4: Récapitulatif des logiciels utilisés 15
Tableau 5: Echelle fondamentale de (Saaty, 1980) 22
Tableau 6: Valeurs aléatoires de (Saaty, 1980). 25
Tableau 7:Comparaison par paire entre les couches thématiques 42
Tableau 8: Matrice normalisée 42
Tableau 9: Classe et indice de recharge 44
Tableau 10: Matrice de confusion, valeur de précision globale et coefficient de kappa 45
Tableau 11: Matrice de corrélation 48
Tableau 12: Facteurs de recharge 68
Tableau 13: Poids des caractéristiques en fonction de leurs degrés d'infiltration 69
Tableau 14: Filtre Sobel dimension 7.7 71
Tableau 15: Synthèse de calcul des indices biophysiques 71
Tableau 16: Données hydrogéochimies 73

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Présentation du sous-bassin du Kou 11
Figure 2: Types de sols 13
Figure 3: Géologie du sous-bassin du Kou 14
Figure 4: Analyse en composantes principales 32
Figure 5: B11/B12 33
Figure 6: B8/B4 33
Figure 7: B3/B11 33
Figure 8: (a) NDVI saison de pluie, (b) NDVI saison sèche 34
Figure 9: (a) NDWI saison de pluie, (b) NDWI saison sèche 34
Figure 10: (a) MNDWI saison de pluie ; (b) MNDWI saison sèche 35
Figure 11: (a) NDBI saison de pluie ; (b) NDBI saison sèche 35
Figure 12: (a) LSWI saison de pluie ; (b) LSWI saison sèche 36
Figure 13: (a) NDMI saison de pluie ; (b) NDMI saison sèche. 36
Figure 14: Occupation des sols à partir des indices biophysiques 37
Figure 15 : (a) Composition en couleurs naturelles (B4, B3, B2), (b) Composition en fausse couleurs (B12, B8, B4) 38
Figure 16: (a) Composition mixte humidité-altération (B12, B11, B4) ; (b) Composition géologique (B11, B8, B4) 39
Figure 17: Filtre Sobel E-W 40
Figure 18: Filtre Sobel N.-S. 40
Figure 19: Filtre Sobel NE-SW 40
Figure 20: Filtre Sobel NW-SE 40
Figure 21: Extraction des linéaments 41
Figure 22: Zone potentielle de recharge 43
Figure 23: Surface occupée par chaque classe 44
Figure 24: Cartes de validation des zones potentielles de recharge 45
Figure 25: Paramètre in situ 46
Figure 26: Répartition des individus 47
Figure 27: Représentation des variables par Cos2 48
Figure 28: Diagramme de piper 50
Figure 29: Relation 2H Vs 18O 51
Figure 30: Relation 3H Vs 18O 52

Figure 31: Estimation de la recharge 53
Figure 33: Pluviométrie moyenne annuelle 63
Figure 34: Occupation des sols 63
Figure 35: Facteur épaisseur des couches de formation 64
Figure 36: Densité des linéaments 64
Figure 37: Densité de drainage 65
Figure 38: Occupation de sols sentinel-2 65
Figure 39: Pente 66
Figure 40: Pluie efficace 66
Figure 41: Types des sols 67
Figure 42: Niveau statique 67
Figure 43: Géologie 68

INTRODUCTION

Essentielles à la survie de la moitié de la population mondiale, les eaux souterraines constituent le réservoir majeur d'eau douce liquide de la planète (Taylor et al., 2013). Selon (Taylor et al., 2013), elles assurent un tiers des prélèvements mondiaux, alimentant respectivement 36 %, 42 % et 27 % des besoins domestiques, agricoles et industriels. L'équilibre de ces nappes est aujourd'hui fragilisé par la pression démographique et les aléas climatiques (UNESCO, 2015). Ce constat est particulièrement observé en Afrique subsaharienne, où les régions semi-arides font face à des cycles de précipitation irréguliers associés à une évaporation intense (IRD, 2019).

Au Burkina Faso, pays sahélien d'Afrique de l'Ouest, les eaux souterraines sont une ressource stratégique pour l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture et l'industrie (Sauret, 2013). Le sous-bassin du Kou situé au sud-ouest du pays, bénéficie d'un fort potentiel hydrogéologique grâce aux formations sédimentaires gréseuses et se distingue par un système complexe caractérisé par des sources pérennes, alimentant la ville de Bobo-Dioulasso et le périmètre rizicole de la vallée du Kou (Sauret, 2013; Tirogo, 2016).

Cependant, la durabilité de cette ressource est menacée par l'augmentation démographique et l'expansion agricole, entraînant une baisse des débits et des niveaux piézométriques, signe d'un déséquilibre entre les prélèvements et la recharge. Dans le sous-bassin du Kou, on observe le tarissement de sources et diminution du débit de base (Sauret, 2013; Tirogo, 2016).

L'étude des mécanismes de recharge dans ce milieu semi-aride est complexe en raison de l'hétérogénéité des formations géologiques et de la variabilité spatio-temporelle des pluies (Dakouré, 2003). Garantir la sécurité hydrique pour près d'un million d'habitants à Bobo-Dioulasso requiert une approche intégrée combinant hydrogéologie, géochimie, isotopes et télédétection.

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à une meilleure connaissance des ressources en eaux souterraines dans le sous-bassin du Kou. Spécifiquement, il s'agit de :

- Quantifier la part des précipitations atteignant la nappe ;
- Caractériser les mécanismes de recharge ;
- Cartographier les zones potentielles de recharge.

I. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Selon Scanlon et al. (2006) l'infiltration se définit comme le transfert de l'eau depuis la surface vers les horizons souterrains. Dans la littérature scientifique, les concepts de percolation de drainage ou infiltration nette sont généralement employés pour désigner le flux hydrique traversant la zone non saturée au-delà de la zone racinaire. Bien que ces termes soient parfois associés à la recharge, cette dernière désigne spécifiquement la fraction de l'eau de surface qui parvient jusqu'à l'aquifère, indépendamment de son parcours dans le sol (Scanlon et al., 2006).

I.1 Typologie des mécanismes de recharge

Les travaux de Scanlon et al. (2006) permettent de distinguer deux grands types de mécanismes :

- La recharge diffuse ou directe : Elle provient généralement des précipitations ou de l'irrigation et se caractérise par une répartition spatiale relativement homogène.
- La recharge concentrée : Elle correspond à un apport localisé issu de dépressions topographiques (lacs, retenues, cours d'eau). On parle de recharge indirecte lorsque ce processus provient d'entités hydrographiques cartographiables comme les rivières (Scanlon et al., 2006).

En s'appuyant sur les travaux de (Healy, 2010; Sorensen et al., 2024), Cette approche permet d'établir une nomenclature détaillée des différentes formes de recharge (Tableau 1) .

Tableau 1: Synthèse sur les mécanismes de recharge.

Type de recharge	Description et caractéristiques
Réelle	Flux effectif parvenant à l'aquifère selon les paramètre topographiques et hydrogéologiques locaux.
Potentielle	Seuil maximal d'infiltration possible en l'absence de contraintes liées au milieu ou à la saturation de l'aquifère.
Induite	Infiltration (naturelle ou anthropique) provoquée par un gradient hydraulique inversé, souvent suite à un rabattement de nappe sous le niveau des eaux de surface.
Directe	Apport uniforme issu de la pluie ou de l'arrosage, s'écoulant à travers l'ensemble de la matrice poreuse.
Indirecte	Alimentation de la nappe par percolation après un ruissellement ou une accumulation dans des lits de cours d'eau ou des zones basses

Concentrée	Infiltration localisée à partir de petites structures (mares, fractures, ruisseaux)
Naturelle	Alimentation spontanée de l'aquifère par le cycle météorologiques (pluie, fonte de neiges).
Artificielle	Intervention humaine visant à réalimenter les réserves souterraines à travers des puits d'injection ou des bassins d'infiltration.
Préférentielle	Circulation accélérée de l'eau à travers des macropores ou des discontinuités, par opposition au flux matriciel lent.
Totale Vs nette	La recharge totale mesure l'apport brut à l'aquifère, tandis que la recharge nette représente le bilan final après déduction des diverses pertes subies

I.2 Détermination de la recharge par les différentes méthodes

L'évaluation de la recharge des eaux souterraines repose sur une diversité d'approches méthodologiques. Comme le soulignent plusieurs auteurs (Healy, 2010; Scanlon et al., 2006), le choix d'une méthode dépend des objectifs de l'étude, de l'échelle spatiale considérée et de la précision requise.

❖ Approches physiques et mesures directes

Parmi les techniques de mesure physique, la méthode de fluctuation du niveau piézométrique est largement documentée (Healy, 2010). Elle consiste à traduire les variations du niveau statique dans les puits et forages en volume de recharge. Bien qu'elle soit simple et économique, son efficacité reste limitée par la saisonnalité et la profondeur de l'aquifère et sa difficulté d'estimer avec précision la porosité efficace (Seguin et al., 2016).

Parallèlement, le lysimètre et le compteur d'infiltration offrent une mesure directe de l'infiltration verticale (Huet, 2015). Ces dispositifs, bien qu'offrant des données précises, sont souvent critiqués pour leur coût élevé et leur caractère ponctuel qui ne reflète pas toujours l'hétérogénéité des sols à grande échelle (Seguin et al., 2016).

D'autres approches physiques peuvent également être citées, notamment :

- La méthode du bilan hydrique des sols (Précipitations-Évapotranspiration - Ruissellement).
- L'analyse du tarissement des cours d'eau (débit de base).
- Le suivi de l'humidité dans la zone non saturée (sondes à neutrons ou TDR).

- L'utilisation de compteurs d'infiltration ou doubles anneaux infiltromètres.

❖ **Méthodes basées sur les flux et les bilans**

Une autre approche classique, mise en avant par (Healy, 2010), repose sur les bilans hydriques. Cette méthode calcule la recharge en soustrayant l'évapotranspiration et le ruissellement des précipitations totales. Si elle est flexible et applicable à diverses échelles, sa fiabilité est étroitement liée à la précision des variables d'entrée. Dans une perspective plus mécaniste, l'application de la loi de Darcy permet de quantifier le flux d'eau à travers le milieu poreux (Scanlon et al., 2006). Cette technique s'appuie sur des principes physiques robustes, mais nécessite une détermination rigoureuse de la conductivité hydraulique et des gradients de pression du milieu.

❖ **Traceur chimiques et isotopiques**

Les méthodes géochimiques, et particulièrement le bilan massique des chlorures, sont privilégiées pour leur aspect économique et la facilité d'accès aux données (Scanlon et al., 2006). Elles se basent sur la comparaison des concentrations de chlorure dans les eaux souterraines. Toutefois, les sources exogènes de chlorure peuvent biaiser les estimations. Plus complexes, les traceurs isotopiques (isotopes stables et radioactifs) permettent d'identifier l'origine de l'eau et son temps de séjour avec une grande précision (Huet, 2015). Enfin, l'utilisation de traceurs historiques, tels que les nitrates ou certains polluants agricoles, sert de marqueur qualitatif pour attester d'une recharge récente liée aux activités anthropiques (Scanlon et al., 2006).

❖ **Modélisation et approches numériques**

La modélisation numérique constitue un outil de synthèse incontournable. Elle permet d'intégrer de multiples paramètres hydrologiques pour simuler la recharge sous divers scénarios (Healy, 2010; Scanlon et al., 2006).

I.3 Synthèse des estimations de la recharge dans la zone d'étude

Le tableau suivant synthétise la variabilité des estimations de la recharge annuelle (Tableau 2) au sein du bassin du Kou, en mettant en relief l'influence des méthodes de calcul et des périodes d'étude choisies par les différents auteurs.

Tableau 2: Synthèse d'estimation de recharge

Auteur(s)	Année	Méthode(s) utilisée(s)	Estimation de la recharge (mm/an)
(Sogreah, 1994)	1994	Bilan de Thornthwaite	248
(Dakouré, 2003)	2003	Thornthwaite Modélisation hydrodynamique	75 – 120 0 – 47

		Méthode des cubatures	< 16 et 127
(Derouane, 2008)	2008	Modélisation (MODFLOW)	20 – 160
(Sauret, 2013)	2013	Bilan hydrique (période 1961-2010)	69 – 354
(Yofe/Tirogo, 2016)	2016	MODFLOW Bilan de Thornthwaite	95 – 115 60 – 150
(Kouanda, 2019)	2019	Modélisation hydrologique (SWAT)	124
(Kutangila, 2025)	2025	Bilan spatialisé (FLDAS) Bilan spatialisé (FAO) Fluctuation piézométrique (WTF)	8,9 – 139,9 0 – 540 62,5 – 156,1

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.1 Présentation de la zone d'étude

Le sous-bassin du Kou (Figure 1) est situé dans la partie occidentale du Burkina Faso, dans la région des Hauts-Bassins. Il fait partie du bassin de Volta Noire appelée aussi Mouhoun, qui constitue l'un des principaux systèmes hydrologiques de l'Afrique de l'Ouest (Wellens et al., 2008). Le sous-bassin couvre une superficie de 1 823 km², comprise entre la latitude 11°00' et 11°30' Nord et la longitude 4°00' et 4°40' Ouest (Wellens et al., 2008).

Le sous-bassin du Kou est drainé par un cours d'eau principal d'une longueur de 80 km, prenant naissance dans les hauts reliefs de Léguéma et se jetant dans la Volta Noire après avoir traversé la commune de Bama (Wellens et al., 2008). Sa morphologie est encadrée par des barrières naturelles et administratives : le socle granitique de Toussiana à l'ouest et les formations sédimentaires de Dafra au nord, tandis que le sud jouxte la région des Cascades (Wellens et al., 2008).

Le réseau hydrographique du sous-bassin est enrichi par plusieurs affluents mineurs, notamment ceux de Nasso, qui assurent un écoulement quasi permanent même en saison sèche (Coulidiati et al., 2025). La zone d'étude couvre un ensemble de localités réparties le long du bassin ; on y retrouve les localités de Karangasso Sambla, de Leguéma, Bama, ainsi qu'une partie périurbaine de Bobo-Dioulasso (Sauret, 2008). Ces zones connaissent une urbanisation croissante et une intensification des activités agricoles, ce qui exerce une pression croissante sur les ressources en eau (Sauret, 2013).

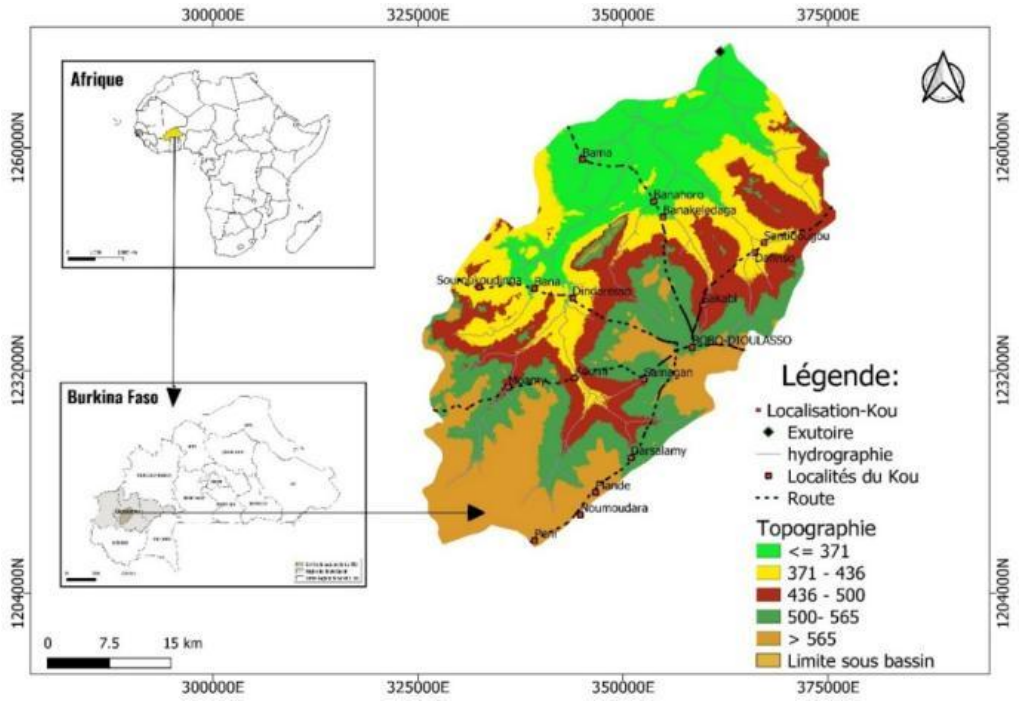


Figure 1: Présentation du sous-bassin du Kou

II.1.1 Cadre climatique

Le cadre climatique du sous-bassin du Kou se définit par une forte saisonnalité et des contrastes thermiques marqués, dont les principales caractéristiques physiques et les données chiffrées sont synthétisées dans le tableau suivant.

Tableau 3: Cadre climatique

Paramètre	Caractéristiques	Sources
Climat	Type soudanien : saison sèche (novembre-avril, harmattan) ; saison humide (mai-octobre, mousson).	(Wellens et al., 2008)
Températures	Moyenne annuelle 26-30°C. Max 40°C (mars-mai). Min 15°C (décembre-janvier).	(Wellens et al., 2008)
Précipitations	Moyenne annuelle 935-1065 mm (mai-octobre, pic juin-septembre).	(Kagambega, 2022 ; Wellens et al., 2008)
Évapotranspiration	Potentielle annuelle >1800 mm (Thornthwaite).	(Wellens et al., 2008)

II.1.2 Géomorphologie et topographie

Le sous-bassin du Kou se caractérise par un relief plat et peu élevé, composé de plateaux légèrement ondulés et de vallées alluviales. Ces zones dépressionnaires, où l'eau s'accumule

lors de la saison des pluies, présentent une altitude comprise entre 400 et 670 m (Tirogo, 2016) . Cette configuration topographique favorise la concentration des eaux de ruissellement et leur infiltration. Les vallées alluviales, constituées de sols sablo-argileux à bonne capacité de rétention, constituent des zones stratégiques pour l'agriculture et la recharge des eaux souterraines. Ainsi, dans les plaines de Bama, les conditions pédologiques permettent une infiltration des eaux de pluie (Traoré, 2012)**.** Enfin, la faible inclinaison du terrain limite la vitesse du ruissellement, favorisant une percolation lente vers les aquifères, ce qui influence directement la dynamique de recharge des eaux souterraines dans le sous-bassin (Kouanda, 2019).

II.1.3 Pédologie du sous-bassin de Kou

La composition des sols dans le sous-bassin du Kou (Figure 2) résulte principalement de la nature du substratum rocheux et des matériaux superficiels. Ces éléments contrôlent la structure, la circulation de l'eau et la fertilité des terres, reflétant ainsi les processus d'altération caractéristiques des zones tropicales (Wellens et al., 2008). Selon la classification du Bureau National des Sols (BUNASOLS, 2002), les sols du sous-bassin se répartissent en quatre grandes familles dont les propriétés physiques conditionnent la capacité d'infiltration.

On distingue d'abord des sols brunis, tels que les eutrophes tropicaux, présentant parfois un caractère hydromorphe et une structure stable généralement perméable. Cependant, certaines variantes vertiques, riches en argiles gonflantes, affichent une perméabilité sélective : elles favorisent l'infiltration par les fentes de retrait en saison sèche, mais provoquent une stagnation de l'eau en surface après saturation. Le bassin renferme également des sols riches en sesquioxydes de fer et de manganèse. Issus d'une latéritisation intense, ces sols ferrugineux et lessivés comportent souvent des cuirasses qui favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration profonde.

Enfin, on observe des sols ferrallitiques, issus d'une altération poussée de la roche mère, ainsi que des sols hydromorphes et minéraux bruts (lithosols sur cuirasse ou affleurements gréseux).

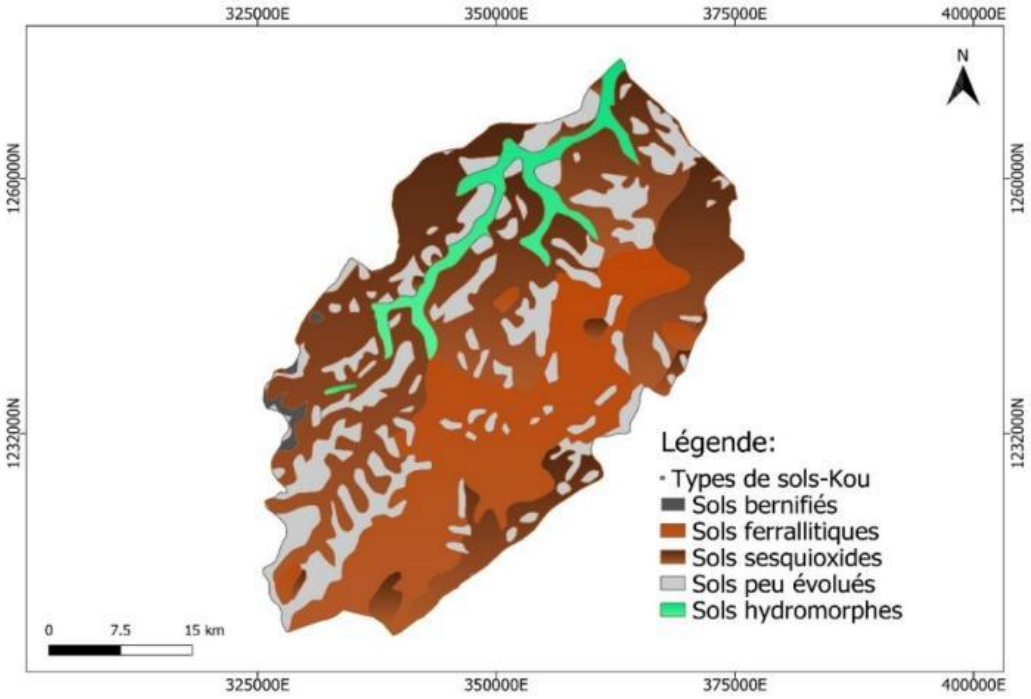


Figure 2: Types de sols

II.1.4 Géologie et hydrogéologie

Le sous-bassin du Kou est inclus dans la partie méridionale du bassin sédimentaire de Taoudéni, l'une des principales provinces géologiques d'Afrique de l'Ouest (Dakouré, 2003b). Les structures géologiques sont d'âge précambrien à cambrien et sont constituées majoritairement de roches sédimentaires (Sauret, 2013a).

Selon Sauret (2013), Sogreah (1994) et Tirogo (2016) les principales unités lithostratigraphiques sont :

- Les grès de Kawara-Sindou (NPggc) : Ce sont des formations épaisses de grès quartziques à ciment siliceux d'âge précambrien, elles présentent une porosité modérée à faible et une perméabilité moyenne.
- Les grès fins glauconieux ou Takalédougou (NPgfg) : Ce sont des alternances de grès fins à moyens, quelquefois argileux, riches en glauconie et ces formations sont peu profondes et assez perméables.
- Les grès à granules de quartz ou Tin (NPggg) : Agrégats grossiers à conglomératiques, riche en quartz avec une perméabilité enlevée.
- Siltstones, argilites et carbonates de Guena-Souroukoundinga et grès fins à calcaire dolomitique de la série de Bandiagara (NPsac1) : Ce sont des formations hétérogènes, peu profonde avec une porosité faible à moyenne.

- Les formations superficielles : Comprenant les alluvions à alternance de grès et de vases alluvions altérités, cette formation présente une perméabilité très variable selon leur texture et leur état de consolidation.

-Le système aquifère du sous-bassin du Kou est de type multicouche et montre une forte variabilité latérale et verticale des propriétés hydrodynamiques. D'après Dakouré (2003), les différentes unités géologiques (Figure 3) sont hydrauliquement connectées, formant un système souterrain continu où les échanges d'eau entre couches sont favorisés par des discontinuités structurales, telles que les failles, les fractures et les interfaces lithologiques perméables.

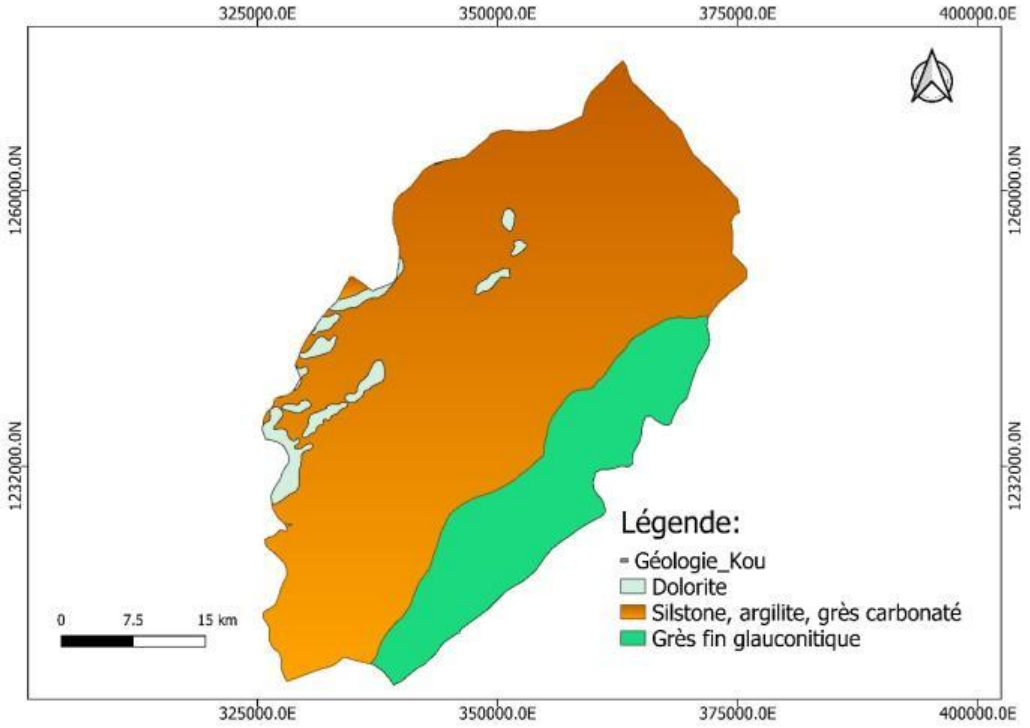


Figure 3: Géologie du sous-bassin du Kou

II.1.5 Occupation des sols

Le sous-bassin du Kou est soumis à une pression croissante liée aux activités humaines, notamment dans les zones aux environs de Bobo-Dioulasso. L'urbanisation accélérée s'accompagne d'une artificialisation des sols (routes, habitations, industries) qui réduit considérablement la capacité d'infiltration de l'eau, aggravant le ruissellement et diminuant la recharge des eaux souterraines (Traoré, 2012).

L'agriculture reste l'activité dominante, avec une forte présence de cultures irriguées, dont le riz dans les plaines de Bama, ainsi que du coton, du maïs et du sorgho en saison pluviale. Ces

pratiques intensives, parfois associées à l'utilisation excessive d'engrais chimiques et de pesticides, contribuent à la contamination diffuse des eaux souterraines (Traoré, 2012).

Le déboisement pour l'expansion agricole modifie le cycle hydrologique naturel. La perte de couverture végétale favorise l'érosion des sols et la diminution de la capacité du sol à retenir l'eau, affectant à long terme la disponibilité et la qualité des ressources hydriques (Kagambega, 2022).

II.2 Matériels Utilisés

Pour mener à bien cette étude, plusieurs données et matériels ont été mobilisés. Les données exploitées comprennent les données hydrogéologiques et hydrodynamiques, les données hydrochimiques, les données hydroclimatiques, les données de télédétection, ainsi que les données cartographiques et géospatiales. L'ensemble de ces données est issu du réseau piézométrique national, du projet RAF 7011 de l'AIEA (2013-2016), du GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) de l'AIEA, ainsi que des bases de données issues des travaux de (Kutangila, 2025) dans le bassin de Taoudéni.

II.2.1 Logiciels utilisés

Le traitement, l'analyse et la spatialisation des données mobilisées dans le cadre de cette étude ont nécessité l'utilisation de plusieurs logiciels spécialisés (Tableau 4), chacun étant choisi en fonction du type de donnée à traiter et des objectifs méthodologiques poursuivis.

Tableau 4: Récapitulatif des logiciels utilisés

Logiciel	Rôle
Microsoft Excel	Organisation de base de données
QGIS 3.34.13	Analyses spatiales, multicritères (AHP) et cartographie thématique.
ENVI 5.3	Traitement des image satellitaires.
Diagramme	Diagrammes hydrochimiques (Piper) et analyses graphiques chimiques.
Microsoft Word	Rédaction, mise en forme et intégration du mémoire.
R-studio	Traitement de données hydrogéochimie
Zotero	Gestion des références, citations et bibliographie.

II.3 Méthode par la télédétection et SIG

Dans le cadre de ce travail, la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont été employés pour cartographier les zones potentielles de recharge à l'échelle du sous-bassin. En complément des observations hydrogéologiques, elles ont permis d'analyser à grande échelle l'influence des variables, telles que la couverture végétale, l'humidité de surface et les changements d'utilisation des terres.

II.3.1 Choix des données satellitaires

Pour cette étude, bien qu'il existe plusieurs types de données satellitaires, celles issues du capteur MSI (Multi Spectral Instrument) de Sentinel-2 ont été choisies. Ce choix repose sur plusieurs avantages, notamment une résolution spatiale allant de 10 à 60 m selon les bandes spectrales, une résolution temporelle élevée avec un passage tous les 5 jours, et une richesse spectrale comprenant 13 bandes (B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B9, B10, B11, B12) (Hagolle et al., 2021; NASA, 2024).

II.3.2 Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été appliquée aux bandes multispectrales de Sentinel-2 (B2, B3, B4, B8, B11 et B12) afin de réduire la redondance spectrale et d'améliorer la lisibilité des signatures radiométriques. Les images prétraitées ont été importées dans le logiciel ENVI 5.3, où les bandes ont été rassemblées sous forme d'un empilement de couches. Ce traitement a permis d'extraire les composantes principales PC1, PC2, PC3, d'évaluer la variance expliquée par chacune d'elles et d'identifier les contrastes spectraux les plus significatifs (Dianati et al., 2025; Memon et al., 2025).

II.3.3 Rapports de bandes

La méthode des rapports de bandes consiste à diviser les valeurs de réflectance de deux bandes spectrales distinctes afin de mettre en évidence des caractéristiques spécifiques du milieu (Youan Ta, 2008). Ces ratios permettent de détecter l'humidité des sols et de différencier les matériaux géologiques dans les environnements à forte variabilité spectrale (Youan Ta, 2008). Ainsi, dans le sous-bassin du Kou, l'utilisation combinée de ces rapports a permis de renforcer la compréhension des contrastes hydrologiques et de cibler les zones à forte potentialité de recharge.

II.3.4 Calcul des indices biophysiques

Le recours aux indices biophysiques dérivés des images Sentinel-2 permet d'estimer de manière indirecte des variables clés telles que l'humidité du sol, la densité de la végétation, la présence d'eau libre ou encore l'étendue des infrastructures. Ces indices sont essentiels pour comprendre

les conditions de surface qui influencent l'infiltration ou le ruissellement de l'eau, deux processus fondamentaux de la recharge des aquifères (Zérah et al., 2024).

Les indices ont été calculés à partir des bandes spectrales pertinentes pour les saisons pluvieuses et sèches. Cette approche saisonnière permet d'analyser les dynamiques spatio-temporelles (Mashala et al., 2025).

❖ **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**

Le NDVI est l'un des indices les plus utilisés pour estimer la biomasse verte et la santé de la végétation. Il repose sur le principe que la végétation absorbe fortement la lumière rouge (RED) pour la photosynthèse et réfléchit le proche infrarouge (NIR). Il est calculé à travers la formule suivante :

$$\mathbf{NDVI} = \frac{\mathbf{NIR} - \mathbf{RED}}{\mathbf{NIR} + \mathbf{RED}} \quad (1)$$

NIR : proche infrarouge utilise la bande 8 (832,8 nm)

RED : Rouge utilise bande 4 (664,6 nm)

Des valeurs proches de +1 indiquent une végétation dense et saine (zones favorables à l'infiltration), alors que des valeurs proches de 0 indiquent la présence des eaux de surface les valeurs négatives indiquent des sols nus, des surfaces imperméables.

❖ **NDWI (Normalized Difference Water Index)**

Le NDWI est utilisé pour détecter l'humidité du sol et de la végétation. Il met en contraste le NIR, fortement réfléchi par la végétation, et le SWIR, absorbé par l'eau. Il est sensible à la teneur en eau des feuilles et des sols. Le NDWI est calculé avec la formule suivante :

$$\mathbf{NDWI} = \frac{\mathbf{GREEN} - \mathbf{NIR}}{\mathbf{GREEN} + \mathbf{NIR}} \quad (2)$$

- GREEN : bande 3 (560 nm)
- NIR : proche infrarouge utilise la bande 8 (842 nm)

Des valeurs positives indiquent une forte humidité, caractéristiques des zones saturées ou humides favorables à la recharge.

❖ **MNDWI (Modified Normalize Difference Water Index)**

Le MNDWI est une version modifiée du NDWI, conçue pour mieux détecter les plans d'eau de surface en remplaçant le NIR par le vert (GREEN), ce qui améliore la distinction entre eau et surfaces artificielles ou végétales :

$$\mathbf{MNDWI} = \frac{\mathbf{GREEN} - \mathbf{SWIR}}{\mathbf{GREEN} + \mathbf{SWIR}} \quad (3)$$

- GREEN : le vert utilise la bande 3 (560 nm)
- SWIR : bande 11 (1610 nm)

L'indice MNDWI est particulièrement utile en saison des pluies pour localiser les zones inondées ou saturées.

❖ **NDBI (Normalized Difference Built-Up Index)**

Le NDBI permet d'identifier les zones urbanisées ou artificialisées, qui sont généralement imperméables et défavorables à la recharge. Il met en relation la réflectance élevée des surfaces construites dans le SWIR et leur faible réflectance dans le NIR :

$$\mathbf{NDBI} = \frac{\mathbf{SWIR} - \mathbf{NIR}}{\mathbf{SWIR} + \mathbf{NIR}.} \quad (4)$$

- SWIR : bande 11 (1610 nm)
- NIR : proche infrarouge utilise la bande 8 (842 nm)

Des valeurs positives indiquent une urbanisation probable, souvent corrélée à un ruissellement accru.

❖ **NDMI (Normalized Difference Moisture Index)**

Le NDMI permet de mesurer l'humidité dans la zone de végétation, du sol. Il permet de suivre la santé de la végétation en lien avec la disponibilité en eau dans le sol.

$$\mathbf{NDMI} = \frac{\mathbf{NIR} - \mathbf{SWIR}}{\mathbf{NIR} + \mathbf{SWIR}} \quad (5)$$

❖ **LSWI (Land Surface Water Index)**

Le LSWI permet d'évaluer l'eau de surface et l'humidité des sols nus ou des zones de végétation moins dense. Sa sensibilité est ajustée pour capter les épisodes d'engorgement après la pluie.

$$\mathbf{LSWI} = \frac{\mathbf{NIRA} - \mathbf{SWIR2}}{\mathbf{NIRA} + \mathbf{SWIR2}} \quad (6)$$

II.3.5 Composition colorée

La composition colorée est une approche qui permet d'améliorer l'interprétation visuelle des structures de l'image. Elle consiste à associer des bandes spectrales aux canaux rouge, vert et bleu (RVB), afin de rehausser les contrastes lithologiques, les gradients d'humidité ou les zones de végétation dense (Faye, 2022).

II.3.6 Application du filtre de Sobel

L'application des filtres Sobel constitue une étape essentielle dans la détection et l'amélioration des linéaments susceptibles d'influencer la recharge des eaux souterraines dans le sous-bassin

du Kou. Les filtres de type Sobel sont des opérateurs de gradient utilisés en traitement d'images pour détecter les variations brusques de luminosité correspondant aux discontinuités structurales, telles que les fractures ou les zones de cisaillement (Youan Ta, 2008).
Dans le cadre de cette étude, les bandes Sentinel-2 (B2, B3, B4, B8, B11 et B12) ont d'abord été regroupées pour former un empilement multispectral (produit L2A). Les filtres Sobel directionnels ont ensuite été appliqués sur la composante PC1 afin d'extraire et d'accentuer les variations de gradient dans quatre directions : Nord-Sud (N-S), Est-Ouest (E-O), Nord-Est/Sud-Ouest (NE-SO) et Nord-Ouest/Sud-Est (NO-SE) (Youan Ta, 2008).

Les résultats obtenus pour chaque direction ont été analysés visuellement afin de sélectionner les linéaments réels et d'éliminer les artefacts liés au relief ou aux aménagements anthropiques. Cette étape d'interprétation manuelle est indispensable, car les filtres détectent également des contours non structuraux. Dans le logiciel ENVI 5.3, les filtres Sobel directionnels ont permis de produire quatre images de gradient, où les pixels à forte intensité correspondent aux discontinuités les plus marquées. Les linéaments ainsi détectés ont ensuite été numérisés à l'aide de l'outil ROI (Region of Interest) pour obtenir des polylignes représentant les failles, fractures et zones de cisaillement. Ce processus, déjà utilisé avec succès par (Youan Ta, 2008) en contexte ouest-africain, permet d'obtenir une carte structurale cohérente et utile pour l'analyse des mécanismes de recharge. Enfin, les linéaments extraits ont été validés en les comparant aux structures géologiques connues, aux cartes du relief, ainsi qu'aux observations hydrogéologiques (Youan Ta, 2008).

II.3.7 Extraction des linéaments

L'extraction des linéaments est une étape clé de l'analyse hydrogéologique, ces structures constituant des couloirs privilégiés pour l'infiltration. L'utilisation de l'imagerie Sentinel-2 repose sur la sensibilité des bandes NIR (B8) et SWIR (B11, B12) aux discontinuités lithologiques et texturales, une approche validée par (Youan Ta, 2008).

Le processus débute par l'exploitation des bandes à haute résolution (10 m) pour détecter les microstructures. Après correction atmosphérique, les contrastes sont accentués par des combinaisons colorées et des analyses directionnelles, le SWIR étant particulièrement efficace pour distinguer les fractures et variations minéralogiques (Glaas et al., 2020).

Pour garantir la fiabilité de la carte structurale, une phase rigoureuse de post-traitement est appliquée. Elle comprend la vectorisation des résultats, suivie d'un nettoyage systématique :

suppression des artefacts anthropiques (routes, limites agricoles) et consolidation des segments alignés (Basile et al., 2019).

Enfin, une analyse statistique par rosace des directions identifie les familles structurales majeures. Selon (Youan Ta, 2008), les orientations NE-SW et NW-SE prédominent dans le contexte ouest-africain et jouent un rôle déterminant dans l'alimentation des aquifères. La carte finale est ensuite intégrée comme couche thématique destiné à l'analyse multicritère.

II.3.8 Identification des paramètres influençant la recharge des eaux souterraines

L'identification des facteurs potentiels de recharge du sous-bassin du Kou s'inscrit dans le cadre de la modélisation spatiale multicritère (MSMC), une approche essentielle pour l'évaluation des systèmes naturels régis par des facteurs multiples et hétérogènes (Youan Ta, 2008). Cette méthode repose sur l'intégration de deux outils complémentaires et reconnus dans la littérature : d'une part le Système d'Information Géographique (SIG) sert de plateforme pour l'acquisition, la gestion, le traitement et la superposition des données thématiques géoréférencées ; d'autre part le processus hiérarchique analytique (AHP), développé par (Saaty, 1980), est utilisé pour la hiérarchisation des facteurs. L'AHP est une méthode de prise de décision permettant de quantifier le poids (W) de chaque critère en fonction de son importance, établie par des jugements d'experts (Saaty, 1980). Les travaux de (Ake et al., 2018; Cheikh et al., 2021; Oularé et al., 2017; Yabre et al., 2023; Youan Ta, 2008) démontrent que cette approche est essentielle pour l'évaluation des systèmes naturels complexes.

- **Choix des facteurs influençant la recharge**

Dans le sous-bassin du Kou, neuf (9) facteurs d'influence ont été retenus (la géologie, le type de sol, la pente, la pluie efficace, le niveau statique, la densité de drainage, la densité des linéaments, l'occupation du sol et l'épaisseur des formations géologiques) et sont catégorisés selon leur mécanisme d'influence et se voient assigner un poids en se basant sur l'échelle établie par (Saaty, 1980) (Tableau 5).

- Les linéaments représentent les signatures superficielles d'accidents structuraux profonds tels que les failles et les fractures. Dans les formations sédimentaires consolidées, ces discontinuités génèrent une porosité secondaire qui complète ou supplante la porosité matricielle primaire (Gleeson et Novakowsk, 2008). L'analyse de la densité linéamentaire permet de cartographier l'intensité de la fracturation et de repérer les zones à haute perméabilité, agissant comme drains préférentiels pour la recharge des eaux souterraines (Krishnamurthy et al., 2000). Ce paramètre constitue un

indicateur clé pour évaluer le stockage et la circulation des eaux dans les aquifères sédimentaires fracturés. Elle est réalisée avec l'outil Density line dans le logiciel QGIS en utilisant la formule suivante :

$$\mathbf{FD} = \frac{\sum \mathbf{Lf}}{\mathbf{A}} \quad (7)$$

Avec FD la densité de fracture en Km/Km^2, A la surface de la zone en Km^2, Lf longueur totale des fractures en km^2.

- La densité de drainage est définie comme le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la superficie totale du bassin versant, exprimée en km/km^2 (Horton, 1945). Sa cartographie a été réalisée à partir du réseau hydrographique de la zone d'étude via l'outil Line Density du logiciel QGIS. La carte de densité de drainage (DD) ainsi obtenue repose sur la formule suivante :

$$\mathbf{DD} = \frac{\sum \mathbf{Lc}}{\mathbf{A}} \quad (8)$$

Avec DD, la densité de drainage en Km /Km^2, Lc, la longueur totale des cours d'eau en Km, A, la surface totale de la zone d'étude en Km^2.

- L'occupation du sol désigne la couverture biophysique de la surface terrestre. Dans cette étude, elle est appréhendée par la télédétection à partir des images Sentinel-2. Cette approche permet de traduire les réflectances électromagnétiques des objets au sol en classes thématiques, en exploitant la haute résolution spatiale (10 m) et la richesse spectrale des capteurs MSI (MultiSpectral Instrument).
- La carte des pentes a été générée par dérivation du Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), offrant une résolution spatiale de 30 m. Le traitement, incluant le calcul des inclinaisons en pourcentage et le découpage spatial selon l'emprise de la zone d'étude, a été réalisé sous l'environnement QGIS 3.34.13. Ce paramètre morphométrique est essentiel pour caractériser la cinétique du ruissellement de surface et les aptitudes à l'infiltration au sein du bassin.
- La texture des sols de la zone d'étude se répartit en cinq (5) classes (BUNASOLS, 2002) : les sols ferrallitiques, les sols hydromorphes, les sols peu évolués, ainsi que les sols à sesquioxydes et les sols bernifiés. La nature et l'épaisseur de ces sols sont déterminantes, car elles conditionnent l'infiltration des eaux pluviales vers les aquifères. Chaque classe est caractérisée par son rôle spécifique dans l'accumulation des eaux souterraines.

- La géologie est considérée comme le facteur déterminant de la perméabilité. Les formations sont hiérarchisées selon leur potentiel aquifère : les grès (roses et quartzeux) (argilites, siltites) et les dolérites.
- La pluie efficace est définie comme la différence entre le cumul des précipitations et l'évapotranspiration réelle (ETR). Cette étude s'appuie sur des données satellitaires au format raster, extraites en accès libre via la plateforme Google Earth Engine. Pour la période 1991-2020, ces rasters ont été traités et mis en forme sous QGIS 3.34.13.

- Le niveau statique correspond à la distance entre la surface du sol et le plan d'eau dans l'ouvrage, après que le niveau s'est stabilisé. Cette étude s'appuie sur la base de données des études antérieurs sur le calcule de niveau statique dans le sous bassin du Kou sur une période de 1991- 2020.

Tableau 5: Echelle fondamentale de (Saaty, 1980)

Intensité d'Importance de chaque poids	Définition
1	Faible importance
3	Importance modérée d'un facteur sur l'autre
5	Importance forte
7	Importance très forte
9	Importance extrême
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires
Réciproque (1/n)	L'importance du second facteur sur le premier

- **Matrice de comparaison par paire**

Dans cette partie, les critères sont comparés deux à deux afin d'exprimer des jugements d'importance relative. Ces jugements forment une matrice de comparaison par paires A égale à (aij) ou (aij) est l'appréciation du critère i par rapport au critère j. Pour synthétiser ces jugements et extraire un vecteur de priorité poids (W) appelé aussi poids normalisé représentant l'importance relative des critères, on calcule la moyenne géométrique de chaque ligne de la matrice, puis on normalise ces moyennes pour obtenir la somme des poids égale à 1(Saaty, 1980). La moyenne géométrique et le poids normalisé sont calculés à travers la formule suivante :

$$\mathbf{MGi} = \left(\prod_{j=1}^{n} \boldsymbol{aij} \right)^{1/n} \quad (9)$$

Où : MGi la moyenne géométrique ; n le nombre total des facteurs d'importance et A=(aij) la matrice de comparaison par paires.

$$\boldsymbol{Wi} = \frac{\mathbf{MGi}}{\sum_{k=1}^{n} \boldsymbol{MG_k}} \quad (10)$$

W_i : Poids normalisé du facteur (i)

Avec $\mathbf{0 \leq W_i \leq 1}$ et $\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{Wi} = \mathbf{1}$

- **Vérification de la cohérence des facteurs**

Au regard de tous les critères de jugement, les facteurs retenus comme des critères influençant la recharge sont les suivants : (DL ; P_{ef} ; Ep)> (P_e) > (OS) > (NS ; Dd) >(GG) > (TS). La vérification de la cohérence constitue une étape très importante dans l'Analyse décisionnelle multicritère (ADM), en particulier dans la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) développée par (Saaty, 1980). Cette procédure consiste à évaluer la cohérence interne des jugements exprimés lors de la comparaison par paires des critères. En effet, les matrices de comparaison reposent sur des appréciations humaines, lesquelles comportent inévitablement une part de subjectivité. Sans contrôle de cohérence, ces jugements pourraient introduire des contradictions logiques, compromettant la fiabilité des poids finaux utilisés dans la construction des cartes thématiques. Selon Saaty (1980), une matrice cohérente garantit que les priorités dérivées sont pertinentes, stables et représentatives de l'importance réelle des critères.

- **Calcul du vecteur**

La première étape consiste à multiplier la matrice de comparaison A par le vecteur des poids normalisés w. Ce calcul permet d'obtenir un vecteur intermédiaire noté (A·w**)**, qui représente l'effet combiné des jugements exprimés dans la matrice sur les poids attribués à chaque critère.

Mathématiquement, le calcul est le suivant :

$$\boldsymbol{A.W} = \left[\sum_{j=1}^{n} \mathbf{aij} \times \mathbf{Wj} \right] \quad (11)$$

Avec aij l'élément de la matrice A (comparaison du critère i avec j), Wj est le poids du critère j, n le nombre total des critères, dans notre cas, n=9

- **Calcule des vecteurs propres individuels**

À partir du vecteur A·w, une valeur propre individuelle (λi) est déterminée pour chaque critère selon la formule suivante :

$$\boldsymbol{\lambda i} = \frac{(\boldsymbol{A}.\boldsymbol{Wi})}{\boldsymbol{Wi}} \quad (12)$$

Où λi est le vecteur propre.

Cette opération consiste à normaliser l'effet global (A·W) par le poids relatif initial pour chaque critère. Une matrice est parfaitement cohérente si toutes les valeurs propres individuelles étaient identiques et égales au nombre de critères (n) (Saaty, 1980).

Les jugements humains introduisent de légères variations entre les vecteurs propres (λi). C'est pourquoi la valeur propre maximale est déterminée par la moyenne des (λi).

- **Détermination de la valeur propre maximale**

La valeur propre maximale (λMax) est un paramètre fondamental pour évaluer la cohérence d'une matrice de comparaison. Elle est calculée comme la moyenne des valeurs propres individuelles :

$$\boldsymbol{\lambda Max} \approx \textbf{moyen}\,(\boldsymbol{\lambda i})$$

Plus λMax est proche du nombre de critères (n), plus la matrice est cohérente. A l'inverse, une différence significative entre λmax et (n) indique des incohérences dans les jugements d'experts (Saaty, 1980).

- **Calcule de l'indice de cohérence**

L'indice de cohérence (Ic) mesure explicitement le degré d'écart entre la matrice observée et une matrice parfaitement cohérente. Il est défini par :

$$\mathbf{Ic} = \frac{\boldsymbol{\lambda Max} - \mathbf{n}}{\boldsymbol{n} - \mathbf{1}} \quad (13)$$

Un indice de cohérence nul signifie que la matrice ne comporte aucune incohérence. En revanche, plus Ic augmente, plus la cohérence diminue. L'indice de cohérence est une mesure intermédiaire utilisée ensuite pour calculer le ratio de cohérence.

L'indice aléatoire (Ia) correspond à la moyenne des valeurs de l'indice de cohérence obtenues pour un grand nombre (environ 500 matrices) de matrices générées aléatoirement de même

dimension (Saaty, 1980). Pour une matrice de taille n=9, l'indice aléatoire Ia est égal à 1.45 (Tableau 7).

Tableau 6: Valeurs aléatoires de (Saaty, 1980).

Nombre de critères	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ia	0	0.58	0.90	0.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Le ratio de cohérence (R_C) est obtenu par le rapport entre l'indice de cohérence réel et l'indice aléatoire :

$$Rc = \frac{\mathbf{Ic}}{\mathbf{Ia}} \quad (14)$$

Ce ratio est le critère de décision finale. Selon Saaty (1980), une matrice est considérée comme cohérente si :

Rc < 0.10 (10%)

Dans ce cas, les jugements sont considérés comme cohérents et les poids attribués peuvent être validés pour la suite de l'analyse multicritère.

Si Rc > 0.10, il devient nécessaire de réviser les évaluations afin de réduire les contradictions internes et d'assurer la fiabilité du modèle.

- **Calcule de l'indice de recharge**

Le calcul de l'Indice de Recharge (Ir) est une étape essentielle de l'évaluation spatiale du potentiel de recharge des nappes souterraines. Cet indice synthétise l'influence conjuguée des paramètres biophysiques et hydrogéologiques conditionnant l'infiltration. L'approche adoptée repose sur le processus d'analyse hiérarchique (AHP) de (Saaty, 1980), une méthode largement éprouvée en hydrogéologie pour intégrer des critères hétérogènes (Agogue et al., 2024; Ake et al., 2018; Oularé et al., 2017; Yabre et al., 2023).

Les paramètres ont été convertis en couches numériques normalisées à travers la méthode Min-Max (Machiwal & Jha, 2013). Cette technique harmonise des variables aux unités disparates en ramenant chaque valeur observée (Vi) sur une échelle de 0 (défavorable) à 1 (favorable), selon la formule suivante :

$$\mathbf{X_i = \frac{V_i - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}} \quad (15)$$

Avec : Xi est une valeur normalisée (comprise entre 0 et 5) ; Vi est une valeur brute du critère ; Vmin et Vmax sont les valeurs minimale et maximale du critère.

Une fois les critères normalisés et pondérés, l'indice de recharge (I_R) est obtenu par un calcul linéaire pondérée de l'ensemble des paramètres.

$$\mathbf{I_R = \sum_{i=1}^{n} W_i \times X_i} \quad (16)$$

L'équation est appliquée dans un système d'information géographique (SIG) afin d'intégrer plusieurs critères influençant la recharge des eaux souterraines. Dans cette formule (Wi**)** représente le poids attribué à un critère donné, tandis que (Xi**)** correspond à la valeur normalisée de ce critère pour chaque pixel de l'espace étudié. L'objectif est d'obtenir un indicateur spatial continu qui décrit le potentiel de recharge dans chaque zone du sous-bassin.

Dans un premier temps, chaque couche thématique (géologie, pente, pluie efficace, densité de drainage, type de sol, occupation du sol, densité des linéaments, niveau statique, épaisseur des couches de formation géologique) est importée dans le SIG sous forme de raster. Un raster est constitué de milliers de pixels, chacun représentant une petite portion du sous-bassin du Kou. Chaque pixel possède donc une valeur numérique qui traduit l'intensité du critère à cette zone. Ensuite, chaque raster est reclassé pour transformer les valeurs brutes en valeurs normalisées (Xi), sur une échelle commune (0 à 5). Cette normalisation permet de comparer des variables exprimées dans des unités différentes.

L'ensemble des rasters pondérés est additionné pixel par pixel grâce aux outils algébriques dans SIG (Raster Calculator). Le système calcule pour chaque pixel, la somme des produits (Wi × Xi) provenant de toutes les cartes thématiques. Le résultat final est une carte continue de l'indice de recharge (I_R)**,** où les valeurs élevées indiquent une forte aptitude potentielle à la recharge, et les valeurs faibles correspondent aux zones moins favorables.

- **Matrice de confusion**

La carte des zones potentielles de recharge des eaux souterraines a été validée par la matrice de confusion, utilisée pour l'évaluation des modèles spatiaux en hydrogéologie. Elle consiste à comparer les classes de recharge prédites par le modèle AHP aux observations de terrain

indépendantes, afin d'évaluer la fiabilité et la cohérence des résultats (Saaty, 1980; Yabre et al., 2023). La validation du modèle a reposé sur 33 piézomètres répartis dans le sous-bassin du Kou.

Les performances du modèle AHP ont été évaluées à l'aide de la précision globale et du coefficient de Kappa. Ce sont des indicateurs statistiques utilisés pour la validation des modèles de classification spatiale en hydrogéologie(Congalton, 2001; Yabre et al., 2023). La précision globale (Overall Accuracy) est calculée comme suit :

$$\mathbf{PG} = \frac{\mathbf{N_{pc}}}{\mathbf{N_{Pt}}} \times \mathbf{100} \quad (17)$$

Avec : PG la précision globale, N_{pc} le nombre des piézomètres correctement classés et N_{pt} le nombre total des piézomètres.

Le coefficient de Kappa (κ), quant à lui permet de mesurer l'accorde entre le modèle et les observations au-delà du hasard. Il est calculé par la formule suivante :

$$\boldsymbol{\kappa} = \frac{\mathbf{P_o} - \mathbf{P_e}}{\mathbf{1} - \mathbf{P_e}} \quad (18)$$

Avec P_o égal à la précision globale,

$$\mathbf{P_e} = \frac{\sum(\mathbf{Totale\ ligne})\mathbf{i} \times (\mathbf{Total\ colonne})\mathbf{i}}{(\mathbf{N})^{\mathbf{2}}} \quad (19)$$

La performance du modèle est interprétée sur la base de la précision globale (Overall Accuracy) et du coefficient Kappa, selon des seuils d'acceptabilité définis. Une précision globale inférieure à 50 % traduit une performance non acceptable et une faible capacité prédictive, tandis que des valeurs comprises entre 50 % et 65 % indiquent une acceptabilité faible à moyenne. Les scores situés entre 65 % et 80 % sont jugés satisfaisants, et ceux supérieurs ou égaux à 80 % témoignent d'une très bonne performance (Congalton, 2001).

Le coefficient Kappa évalue la concordance entre les classes prédites et observées en neutralisant l'accord dû au hasard (Landis & Koch, 1977). Une valeur inférieure à 0,20 indique une concordance insignifiante ; entre 0,20 et 0,40, elle est considérée comme faible, et entre 0,40 et 0,60, comme modérée. Une valeur située entre 0,60 et 0,80 est interprétée comme une bonne concordance. Enfin, un coefficient supérieur ou égal à 0,80 révèle une excellente adéquation entre le modèle et les observations(Landis & Koch, 1977; Yabre et al., 2023).

Dans le contexte spécifique de la cartographie des zones de recharge par AHP et SIG en Afrique de l'Ouest, un modèle est généralement considéré comme fiable dès lors que la précision globale atteint au moins 65 % et que le coefficient Kappa est supérieur ou égal à 0,60 (Yabre et al., 2023).

II.3.9 Méthode isotopique

L'analyse isotopique est une méthode qui permet de caractériser les processus de recharge des eaux souterraines. La méthodologie isotopique utilisée dans cette étude repose sur les travaux de(Kutangila, 2025) dans le bassin de Taoudéni. Au total, 10 échantillons sur 53 (provenant de ces travaux) ont été géoréférencés dans le sous-bassin du Kou. Ainsi notre analyse repose sur ces 10 échantillons.

- **Analyse des isotopes stables (^{2}H et ^{18}O)**

Les données isotopiques issues des travaux de (Kutangila, 2025) ont été mesurés par spectrométrie laser avec une haute précision (±0.14‰) pour (^{18}O) et (±1.6‰) pour (^{2}H) au LASI (CNESTEN au Maroc) en 2021. Les données du tritium (^{3}H) ont quant à eux ont été mesurés par scintillation liquide après l'électrolyse avec une précision de ±0.03UT au LRAE de Safx (Tunisie) en 2022.

Les résultats sont exprimés en unités delta (δ), en ‰, selon la formule suivante :

$$\boldsymbol{\delta = \left(\frac{R_{echantillon}}{R_{standard}} - 1 \right) * 1000} \quad (20)$$

Avec :

$$\begin{cases} {}^{18}\mathbf{R} = \dfrac{{}^{18}\mathbf{O}}{{}^{16}\mathbf{O}} \\ {}^{2}\mathbf{R} = \dfrac{{}^{2}\mathbf{H}}{{}^{1}\mathbf{H}} \end{cases}$$

R est le rapport isotopique de l'échantillon comparé au standard international VSMOW (Vienna Standard Means Ocean Water).

- **Diagramme de comparaison ($\delta^{2}H$ vs $\delta^{18}O$)**

Les données isotopiques stables sont analysées en traçant le diagramme de $\delta^{2}H$ en fonction de $\delta^{18}O$, permettant de les comparer à la droite météorique locale (Kutangila, 2025) régit par l'équation :

$$\boldsymbol{\delta^{2}H = 7.57\delta^{18}O + 8.33} \quad (21)$$

II.3.10 Méthode hydrogéochimique

Les données ont été collectées auprès des bases de données de différentes structures (AEM, DGRE) mais aussi au niveau de précédentes études dans la zone d'étude. Nous avons ensuite procédé à la compilation et au nettoyage des informations recueillies. Par la suite, une analyse hydrogéochimique a permis d'interpréter l'origine des eaux, les processus d'interaction eau-roche, les influences anthropiques et les dynamiques de recharge (Dakouré, 2003; Kouanda, 2019; Kutangila, 2025).

- **Calcul du bilan ionique**

Pour garantir la qualité des analyses, un contrôle qualité a été effectué par le calcul du bilan ionique, qui repose sur l'équilibre électrique entre les charges des cations et les charge des anions. Le bilan ionique est calculé par la formule suivante :

$$\mathbf{BI}(\%) = \frac{\sum \mathbf{Cations}\left(\frac{\mathbf{meq}}{\mathbf{L}}\right) - \sum \mathbf{Anions}\left(\frac{\mathbf{meq}}{\mathbf{L}}\right)}{\sum \mathbf{Cations}\left(\frac{\mathbf{meq}}{\mathbf{L}}\right) + \sum \mathbf{Anions}\left(\frac{\mathbf{meq}}{\mathbf{L}}\right)} * \mathbf{100} \quad (22)$$

Une erreur obtenue par le bilan ionique (BI) égale à ±5 % est considérée comme acceptable et indique une précision satisfaisante dans les analyses (Dakouré, 2003; Kouanda, 2019; Kutangila, 2025).

L'interprétation géochimique des résultats s'appuie sur l'utilisation du diagramme de Piper. Le diagramme de Piper permet de classifier les eaux selon leur faciès hydrochimique.

- **Traitement statistique des données hydrochimie**

Le traitement statistique des données hydrochimiques a été réalisé par l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette technique, décrite par (Jolliffe, 1986), est très importante pour synthétiser l'information issue de variables corrélées tout en limitant la perte de données. La diagonalisation de la matrice de corrélation a permis d'extraire les axes Dim 1 et Dim 2. Comme le soulignent (Abdi & Williams, 2010), ces deux dimensions absorbent les plus fortes valeurs propres et renferment l'essentiel de la variance. Alors que Dim 1 illustre la tendance majeure de variation des eaux, Dim 2 révèle des dynamiques secondaires indépendantes.

II.3.11 Quantification de la recharge

- **Méthode de fluctuation piézométrique**

La méthode de fluctuation piézométrique (Water Table Fluctuation, WTF) constitue un outil de référence pour estimer la recharge des nappes à partir de l'évolution temporelle du niveau de la

surface libre. Son utilisation est décrite dans de nombreux travaux menés en contextes climatiques variés (Hendrickx & Walker, 1997; Kutangila, 2025) .

Le niveau piézométrique correspond à la hauteur de la colonne d'eau nécessaire pour équilibrer la pression hydrostatique mesurée dans l'ouvrage. Les variations de ce niveau traduisent les réponses directes de l'aquifère à l'infiltration, aux écoulements souterrains et aux pertes par évapotranspiration.

L'approche de la méthode de fluctuation piézométrique (WTF) repose sur le bilan des eaux souterraines exprimé par :

$$\mathbf{\Delta S = R - Qb - ET - Qs + Qe} \quad (23)$$

Avec : ΔS la variation du stockage de la nappe, R la recharge, Q_b l'écoulement de base, ET l'évapotranspiration issue de la nappe, Q_s est le flux sortant, y compris les pompages, Q_e est le flux entrant.

La variation du stockage souterrain résulte des apports liés à la recharge et aux écoulements entrants dans le bassin, de l'écoulement de base vers les sources, de l'évapotranspiration souterraine et des écoulements sortants du bassin (Healy, 2010). Toutefois, sur un pas de temps mensuel suivant l'infiltration, la recharge peut être estimée directement à partir de l'expression suivante :

$$\mathbf{R = Sy \times \frac{\Delta h}{\Delta t} + (Q_b + Q_s)} \quad (24)$$

Avec R la recharge, Δh la variation de la charge piézométrique pendant la période considérée Δt, Sy la porosité de drainage, Q_b le débit de base et Q_s le débit sortant.

La variation de la charge piézométrique Δh est définie par :

$$\mathbf{\frac{\Delta h}{\Delta t} = H2 - H1} \quad (25)$$

Où H est défini par la formule suivante :

$$\mathbf{H = Z - n} \quad (26)$$

Avec : Z l'altitude de l'ouvrage, n la profondeur de l'eau mesurée dans le piézomètre, H la charge piézométrique.

La méthode suppose que la porosité de drainage (Sy) reste constante dans le temps, supposant une stabilité des propriétés de l'aquifère.

Pour l'application de cette méthode, 34 piézomètres du réseau local situés dans le sous-bassin du Kou ont été retenus. Ces ouvrages présentent des séries temporelles suffisamment complètes pour l'analyse des fluctuations piézométriques avec un pas de temps mensuel.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1 Résultats de la cartographie des zones potentielles de recharge

III.1.1 Analyse en composantes principales sentinel-2

L'Analyse en Composantes principales (ACP) (figure 4) réalisée sur les bandes multispectrales Sentinel-2 a permis de réduire la redondance spectrale et de mettre en évidence les informations les plus significatives utiles des dynamiques de surface dans le sous-bassin du Kou. Les résultats montrent que les trois premières composantes principales concentrent l'essentiel de la variance totale contenue dans les données, ce qui confirme l'efficacité de l'ACP pour simplifier un jeu de données multispectral à haute redondance(Jensen, 2015; Jia & Richards, 1999). La composante principale (PC1) renferme la plus grande part de la variance avec 91%. Elle reflète principalement la luminosité générale de la scène. Les zones fortement réfléchissantes (sols nus secs, surfaces anthropiques) y apparaissent et se différencient des zones plus sombres, qui traduisent les zones de végétation, les sols humides, les eaux de surface. Cette composante correspond généralement à l'axe maximal de variabilité des données multispectrales(Jensen, 2015). L'analyse en composantes principales (ACP) a permis de mettre en évidence les contrastes spectraux et de réduire la quantité de données à analyser sans perte d'information essentielle.

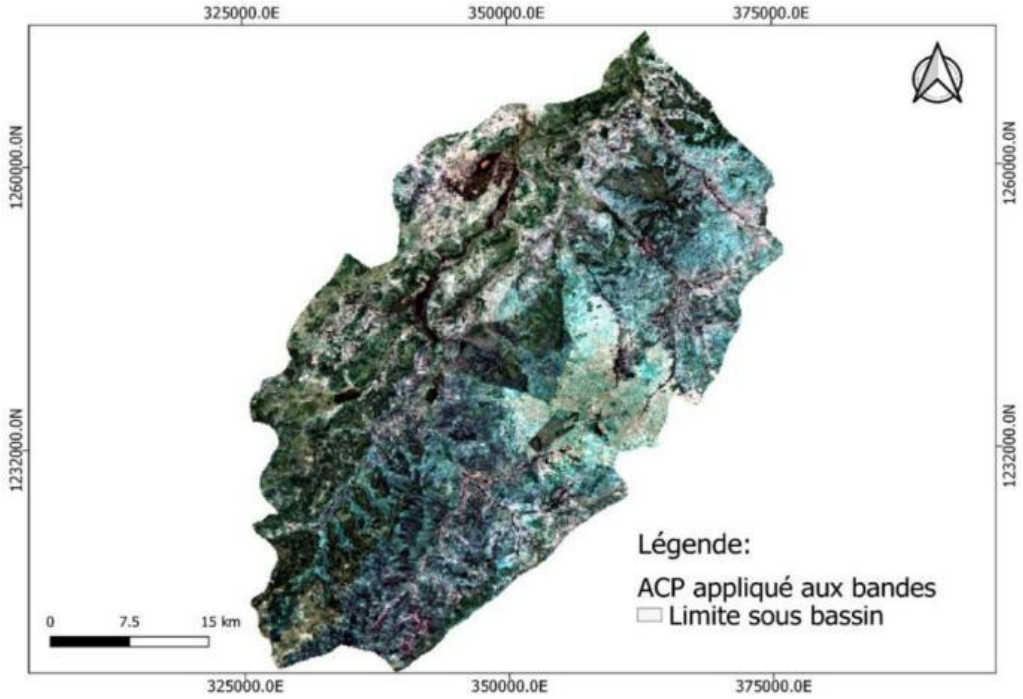


Figure 4: Analyse en composantes principales

III.1.2 Rapport des bandes

L'application des rapports de bandes spectrales a permis de révéler des contrastes précis liés à l'humidité des sols, à la santé de la végétation et à la nature des formations de surface dans le sous-bassin du Kou.

L'analyse de ces combinaisons B8/B4 (NIR/Rouge) (Figure 6), B11/B12 (SWIR1/SWIR2) (Figure 5)**,** B3/B11 (Vert/SWIR1) (Figure 7) montent des résultats significatifs en fournissant une image de ton noir a texture rugueuse et grossière, caractérisé par un réseau de drainage de type dendritique de type treillis. Plusieurs anomalies linéaires se distinguent principalement à travers les rapports combinés, notamment NIR/Red et SWIR/SWIR. Ces linéaments apparaissent sous forme d'alignements contrastés, indiquant probablement des fractures, fissures (Youan Ta, 2008).

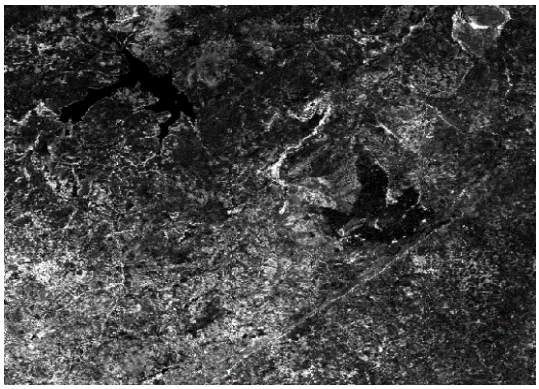


Figure 6: B8/B4

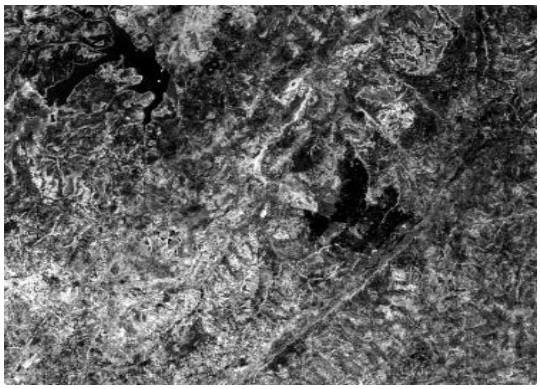


Figure 5: B11/B12

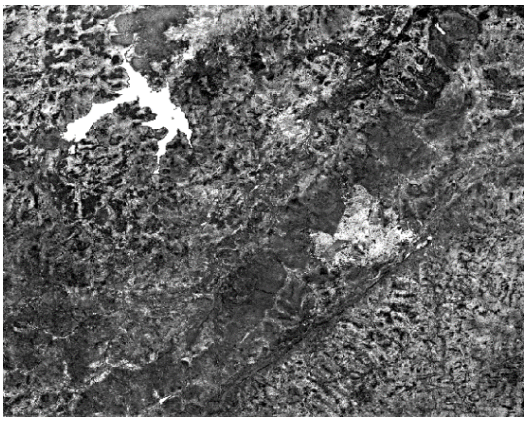


Figure 7: B3/B11

III.1.3 Analyse des indices biophysiques

- **NDVI**

L'analyse du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) dans le sous-bassin du Kou montre une forte variation saisonnière avec les valeurs comprises entre -0,44 et 1 en saison pluvieuse et de -0,64 à 0,87 en saison sèche (Figure 8). Pendant la saison pluvieuse, les valeurs supérieures à 0,5 traduisent une végétation dense et en bonne santé (Rouse et al., 1974). En saison sèche, les valeurs élevées se restreignent principalement aux zones irriguées, aux zones de végétations denses. Les valeurs de NDVI inférieur à 0,5 traduisent une végétation stressée (Rouse et al., 1974).

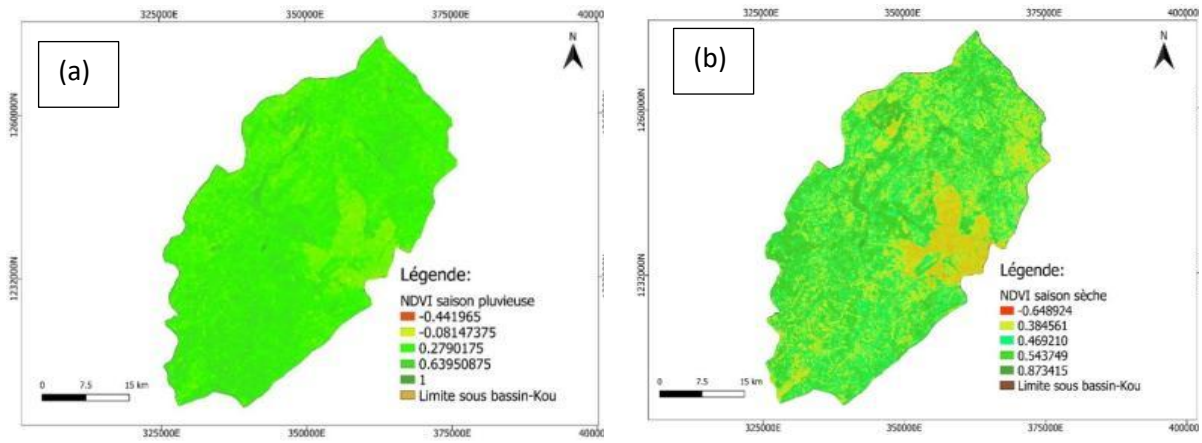


Figure 8: (a) NDVI saison de pluie, (b) NDVI saison sèche

- **NDWI**

Le NDWI (Normalized Difference Water Index) varie entre -0.81 et 0.66 en saison pluvieuse et entre -1 et 0,42 en saison sèche (Figure 9). En période de pluies, les valeurs positives proches de 0,66 indiquent une forte humidité de surface et la présence des eaux de surface dans les rivières, mares et bas-fonds, un remplissage des rivières et bas-fonds. En saison sèche, la diminution du maximum NDWI (0.66) est observée jusqu'à 0,42 et l'extension des valeurs négatives jusqu'à -1 reflète un déficit hydrique (Gao, 1996; McFEETERS, 1996; Xu, 2006).

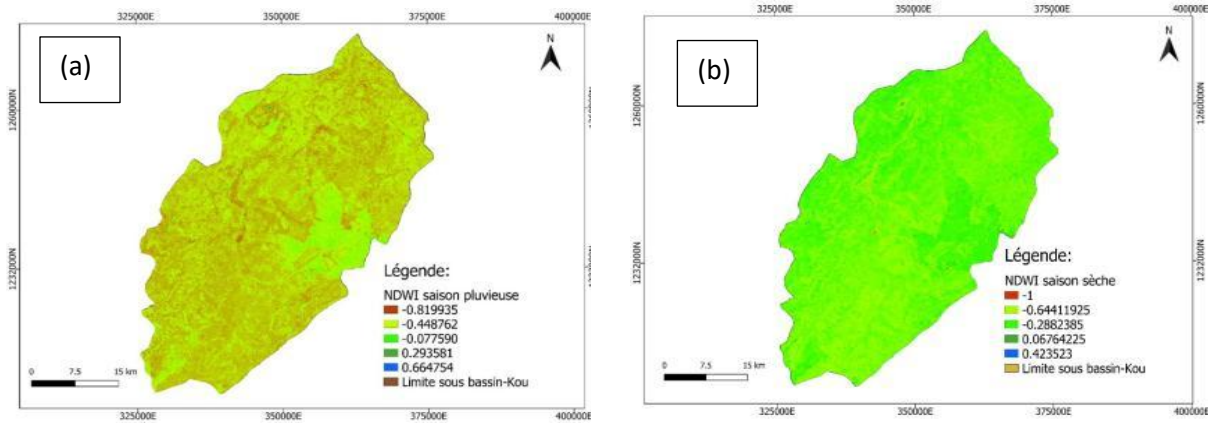


Figure 9: (a) NDWI saison de pluie, (b) NDWI saison sèche

- **MNDWI**

Le MNDWI (Modified NDWI) présente des valeurs comprises entre -0,83 et 0,30 en saison pluvieuse et entre -1 et 0,20 en saison sèche (Figure 10). En période de pluies, les valeurs positives proches ou égale à 0,30 observées pendant la saison de pluie traduisent une forte présence des eaux libre**.** En revanche, les valeurs plus faibles en saison sèche avec un max MNDWI de 0.20 indiquent un déficit hydrique et une réduction des plans d'eau. Le MNDWI apparait comme un indicateur de la disponibilité en eau (Xu, 2006).

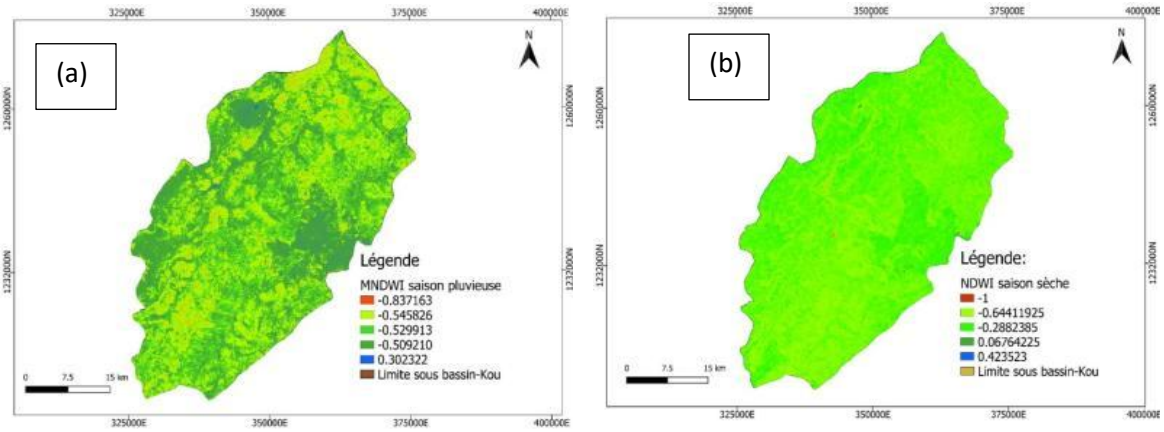


Figure 10: (a) MNDWI saison de pluie ; (b) MNDWI saison sèche

- **NDBI**

Le NDBI (Normalized Difference Built-Up Index) varie entre -0,65 et 0,62 en saison pluvieuse et entre -0,52 et 0,60 en saison sèche (Figure 11). Les valeurs positives correspondent aux zones urbanisées (Zha et al., 2003). Les valeurs négatives correspondent à des zones non bâties (Weng, 2012).

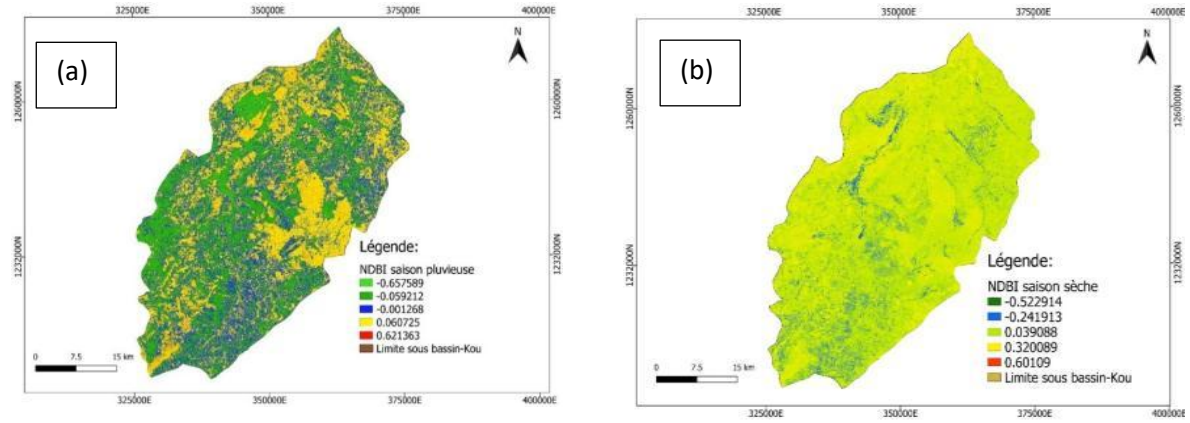


Figure 11: (a) NDBI saison de pluie ; (b) NDBI saison sèche

- **LSWI**

Le LSWI **(**Land Surface Water Index**),** calculé à partir des bandes NIR et SWIR, varie entre -0,52 et 0,60 en saison pluvieuse et entre -0,45 et 0,53 en saison sèche (Figure 12)**.** Les valeurs positives indiquent la présence des eaux de surface et une zone de végétation dense tandis que les valeurs négatives correspondent à des espaces imperméables(Gao, 1996; Xiao et al., 2005).

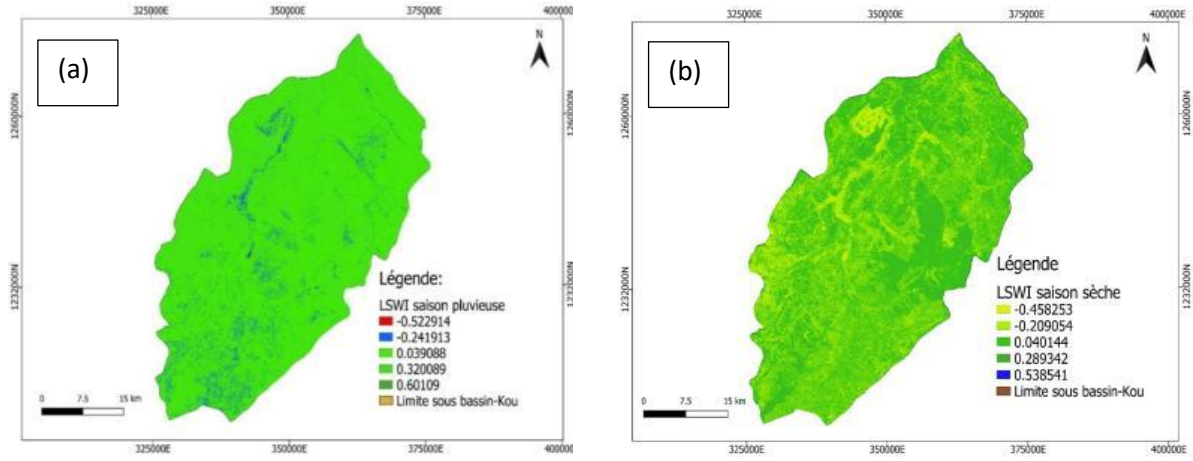


Figure 12: (a) LSWI saison de pluie ; (b) LSWI saison sèche

❖ **NDMI**

Le NDMI (Normalized Difference Moisture Index**)**, indicateur de l'humidité des zones de végétation et du sol, varie entre -0,62 et 0,65 en saison pluvieuse et entre -0,60 et 0,52 en saison sèche (Figure 13). Les valeurs positives correspondent à des sols avec forte teneur en eau et une végétation saine. Les valeurs négatives reflètent une faible teneur en eau dans le sol et une végétation stressée(Wilson & Sader, 2002).

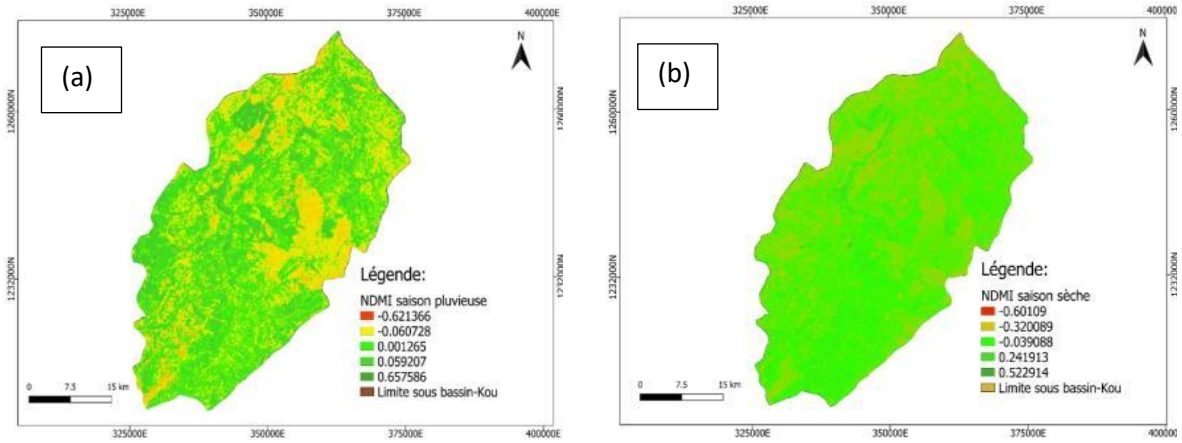


Figure 13: (a) NDMI saison de pluie ; (b) NDMI saison sèche.

❖ **Classification de l'occupation des sols sentinelle-2**

La classification supervisée (Figure 14) des images Sentinel-2, acquises en saisons de pluie et sèche, a permis d'élaborer une carte détaillée de l'occupation du sol. Six classes principales ont été identifiées : la végétation dense, les parcelles irriguées, les parcelles agricoles, les zones d'infrastructures, les plans d'eau et les prairies. Les résultats montrent que les zones de végétation dense, bien qu'encore dominantes, sont en régression progressive, principalement

converties en zones agricoles(Zougmoré et al., 2018). Les cultures connaissent une expansion continue, particulièrement dans les périmètres irrigués de Nasso et Bama (Wellens et al., 2008).

Les zones urbaines s'étendent, notamment autour de Bobo-Dioulasso. Quant aux plans d'eau et zones humides, ils présentent une forte variabilité saisonnière, avec des maximas observés en saison des pluies et une diminution marquée en saison sèche.

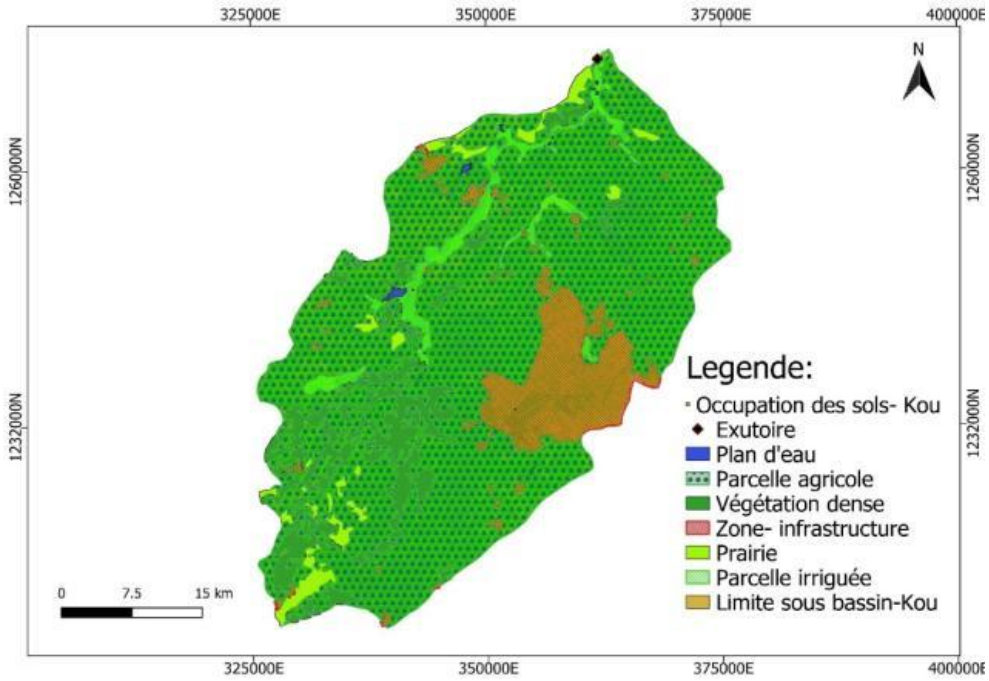


Figure 14: Occupation des sols à partir des indices biophysiques

III.1.4 Composition colorée

Dans le but d'optimiser l'analyse optique et d'adapter le rendu visuel à la perception humaine, plusieurs compositions colorées ont été élaborées :

La composition en couleurs naturelles (B4, B3, B2) (Figure 15 : (a)) montre une représentation de l'occupation du sol dans le sous-bassin du Kou. Elle révèle une prédominance des zones agricoles en nuances brun-beige autour de, des savanes arborées en vert, et les cours d'eau en bleu foncé ou noir en raison de leur forte absorption du rayonnement. Utilisée comme référence, elle permet de comparer les contrastes des autres compositions et d'identifier la végétation dense (Youan Ta, 2008).

Les résultats issus de la composition en fausses couleurs (B12, B8, B4) (Figure 15 : (b)) mettent en évidence la végétation active grâce à la forte réflectance de la chlorophylle (Jensen, 2015). Les zones de végétation dense situées le long du Kou apparaissent en rouge vif, signe d'une

activité photosynthétique marquée et d'une humidité élevée. Les sols agricoles et nus virent au rosé ou bleu clair, révélant les contrastes entre hauts plateaux et plaines alluviales sédimentaires (Youan Ta, 2008).

Composition géologique SWIR (B12, B11, B4) (Figure 16 :(a)) a permis de distinguer les contrastes lithologiques et les unités d'altération dans les milieux sédimentaires, grâce à leur sensibilité aux minéraux argileux, à l'humidité et aux textures (Drury et al., 2010). Les altérations profondes se distinguent en brun-rouge foncé, tandis que les roches compactes ou sables indurés apparaissent en vert ou bleu (Youan Ta, 2008).

La composition mixte humidité-altération (B11-B8-B4) (Figure 16 : (b)) a permis d'identifier les zones humides, les surfaces altérées et les sols nus. La bande B11, sensible à l'humidité et à certaines argiles, permet de faire ressortir les sols gorgés d'eau qui apparaissent en teintes jaune-vert. Les zones fortement altérées, où dominent les argiles et les matériaux fins, apparaissent en rouge orange, tandis que les zones sèches et sableuses montrent des tons plus bleu-gris (Youan Ta, 2008).

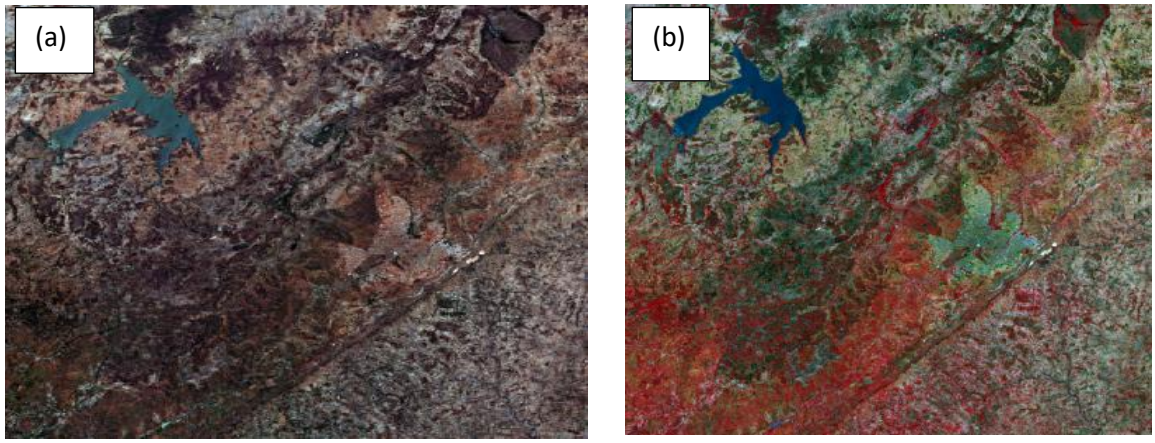


Figure 15 : (a) Composition en couleurs naturelles (B4, B3, B2), (b) Composition en fausse couleurs (B12, B8, B4)

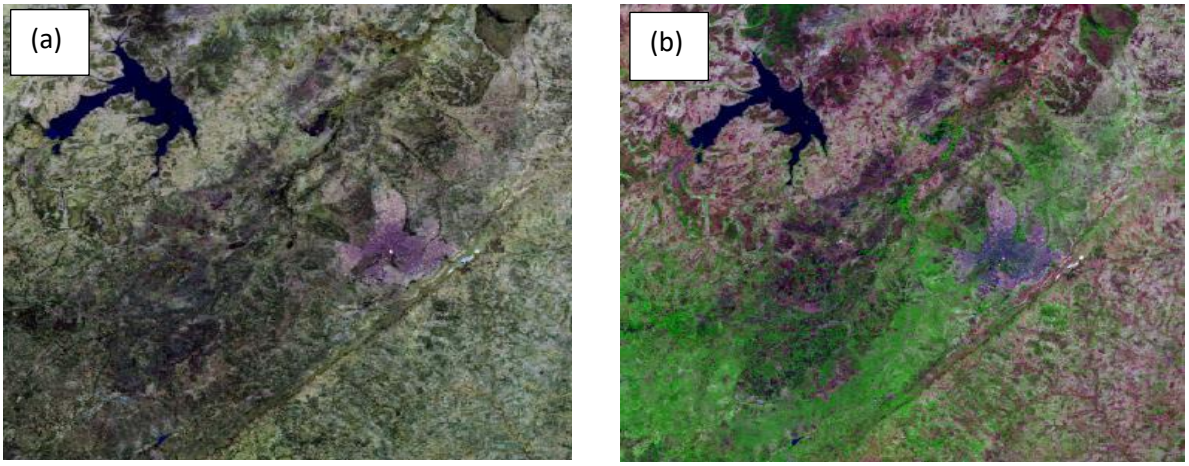


Figure 16: (a) Composition mixte humidité-altération (B12, B11, B4) ; (b) Composition géologique (B11, B8, B4)

III.1.5 Application des filtres Sobel

L'application du filtre Sobel a permis d'extraire les zones de ruptures spatiales et les gradients spectraux radiométriques associés aux structures géologiques et morphologiques du sous-bassin du Kou. Les résultats obtenus montrent une nette amélioration de la lisibilité des structures orientées, comparée à l'image initiale. Les images issues du filtrage Sobel révèlent un réseau de linéaments structuraux bien marqué selon les directions N-S (Figure 18), NE-SW (Figure 19), NW-SE (Figure 20) et E-W (Figure 17). Les structures détectées au nord et au centre du sous-bassin apparaissent particulièrement denses. Elles sont généralement associées à des zones de roches fracturées ou altérées, qui constituent des aquifères potentiels ou des conduits d'infiltration favorables à la recharge. Les images filtrées montrent également des zones où les linéaments sont très discontinus, indiquant une altération avancée. Ces résultats corroborent les interprétations géologiques existantes et confirment l'importance des discontinuités orientées comme contrôles majeurs de la recharge des eaux souterraines.

Enfin, l'application du filtre Sobel a permis d'obtenir une carte structurale préliminaire qui servira de base à l'extraction des linéaments dans les étapes suivantes. La qualité de la détection, marquée par des contours nets et une bonne continuité des structures principales, montre la pertinence du filtre Sobel pour les études hydrogéologiques, comme souligné par (Jensen, 2015).

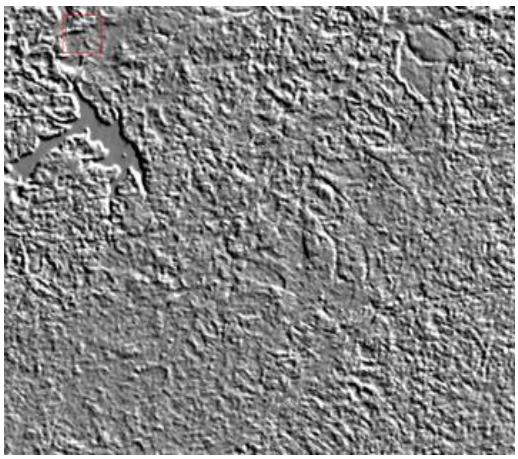


Figure 19: Filtre Sobel NE-SW

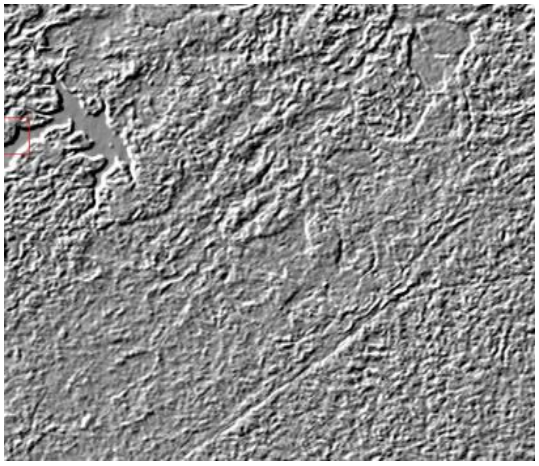


Figure 20: Filtre Sobel NW-SE



Figure 18: Filtre Sobel N.-S.



Figure 17: Filtre Sobel E-W

III.1.6 Extraction des linéaments

Les résultats de l'extraction des linéaments (Figure 21) mettent en évidence des directions dominantes qui apparaissent de manière continue sur la carte, notamment au centre et au nord du sous-bassin. Les directions N-S et E-W sont également bien représentés, même s'ils apparaissent moins denses que les orientations NE-SW et NW-SE. Les linéaments N-S, souvent associés à des fractures tardives ou à des réactivations tectoniques récentes, se concentrent principalement dans la partie occidentale du sous-bassin. Quant aux linéaments E-W, ils traversent la zone d'étude et semblent contrôler plusieurs unités de surface et segments de drainage. La répartition spatiale des linéaments montre également une forte densité dans la moitié nord du sous-bassin, où les fractures apparaissent de manière dense et parfois superposée (Koussoube & Savadogo, 2017; Youan Ta, 2008).

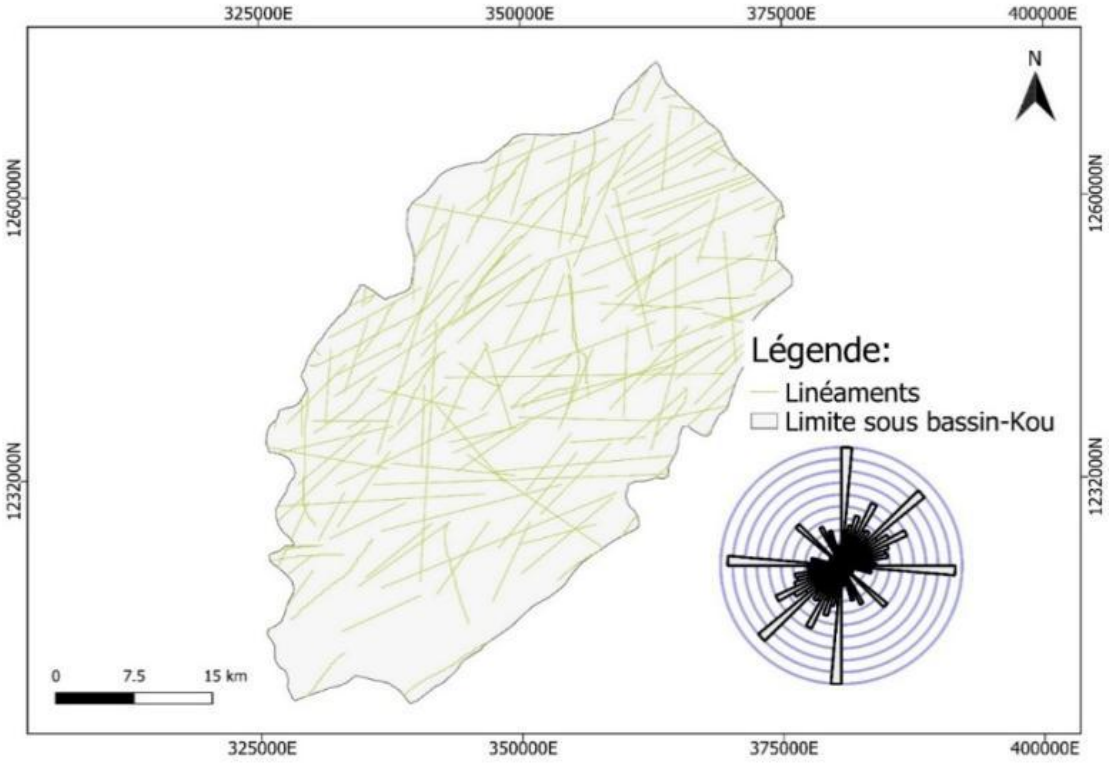


Figure 21: Extraction des linéaments

III.1.7 Calcule de poids normalisés

L'analyse de nos données montre que les pondérations obtenues via le (Tableau 10) sont conformes aux exigences méthodologiques de (Saaty, 1980). En effet, la somme des poids normalisés de l'ensemble des facteurs est égale à 1, validant ainsi la cohérence interne de notre distribution.

Cette étape a servi de base à la détermination des poids spécifiques pour chaque caractéristique des cartes (Tableau 11), en intégrant les neuf facteurs sélectionnés. L'élaboration d'une matrice normalisée a permis de vérifier la pertinence des facteurs d'influence. Les tests de fiabilité effectués affichent un ratio de cohérence (R_C) de 0,02 % (Tableau 11), un résultat nettement inférieur au seuil critique des 10 % préconisé par la méthode AHP (Saaty, 1980).

Tableau 7:Comparaison par paire entre les couches thématiques

i/j	DL	Ep	OS	P_e	Dd	P_{ef}	TS	GG	NS	MG	∑W	W_i(normalisé)
DL	1	1	1.27	1.17	1.4	1	2.33	2	1.4	1.33	12.6	0.14
Ep	1	1	1.27	1.17	1.4	1	2.33	2	1.4	1.33	12.6	0.14
OS	0.79	0.79	1	0.92	1.1	0.79	1.83	1.57	1.1	1.05	9.88	0.11
P_e	0.86	0.86	1.09	1	1.2	0.86	2	1.71	1.2	1.14	10.8	0.12
Dd	0.71	0.71	0.91	0.83	1	0.71	1.67	1.43	1	0.95	8.98	0.1
P_{ef}	1	1	1.27	1.17	1.4	1	2.33	2	1.4	1.33	12.6	0.14
TS	0.43	0.43	0.55	0.5	0.6	0.43	1	0.86	0.6	0.58	5.39	0.06
GG	0.5	0.5	0.64	0.58	0.7	0.5	1.17	1	0.7	0.67	6.29	0.07
NS	0.71	0.71	0.91	0.83	1	0.71	1.67	1.43	1	0.95	8.98	0.1
∑Totale											88	1

GG : formation géologique ; P_{ef} (mm) : pluie efficace ; P_e : pente ; E_p : épaisseur des couches ; Dd : densité de drainage ; DL : densité des linéaments ; TS : type de sol ; OS : occupation des sols ; NS : niveau statique.

Tableau 8: Matrice normalisée

i/j	DL	Ep	OS	Pe	Dd	Pef	TS	GG	NS	∑Wn	λi	λMax	Ic	R_C
DL	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	1.29	9			
Ep	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	1.29	9			
OS	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	1.01	9			
Pe	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	1.1	9			
Dd	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.33	0.1	0.1	0.1	1.15	11.3			
Pef	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	1.29	9			
TS	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.56	9.17			
GG	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.64	9			
NS	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.92	9			
											83.4	9.27	0.03	0.02< 10%

III.1.8 Carte des zones de potentiel de recharge

L'identification des zones préférentielles de recharge (Figure 22) repose sur une intégration systémique de plusieurs variables thématiques, dont l'interaction détermine l'aptitude d'un site à l'infiltration profonde. Dans le contexte du sous-bassin du Kou, la caractérisation spatiale s'appuie sur la méthode d'analyse hiérarchique des processus (AHP) associés aux outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG), a permis de mettre en évidence une répartition spatiale contrastée du potentiel de recharge. La carte réalisée comporte cinq classes de recharge (Tableau13), la classe très faible occupe 5% de surface du sous-bassin avec une recharge qui varie de 0 à 30%, la recharge faible occupe une surface de 20% avec une recharge estimée de 30 à 45%, la recharge modérée occupe 38% de surface du sous-bassin avec un indice de

recharge estimée de 45 à 60%, la classe de recharge forte occupe 25% avec un indice de recharge qui varie de 60 à 72% et la recharge très forte quant à elle occupe une surface de 12% avec une recharge estimée de 72 à 100%. Ces classes expliquent l'influence combinée des facteurs hydrogéologiques, topographiques et hydrologiques. Les résultats montrent une prédominance des zones de recharge modérée à forte, réparties sur l'ensemble du sous-bassin, dans les zones de centres et méridionale, les conditions d'infiltration sont favorisées par les pentes faibles à moyennes, une couverture pédologique favorable et une densité de fractures élevée. Les zones de faibles à très faibles recharge sont moins nombreuses et se concentrent dans les zones présentant des conditions défavorables à l'infiltration, en lien avec des pentes plus marquées, des formations géologiques moins perméables, une occupation du sol contraignante. Plusieurs localités dans le sous-bassin, telles que Koumi, Samagan, Moamy et Flande, se situent majoritairement dans des zones de recharge modérée à forte, expliquant les conditions favorables à l'alimentation des aquifères exploités pour l'approvisionnement en eau. D'autres localités, telles que Sakabi, Dinderesso et Bana, se trouvent à la transition entre des zones de recharge modérée et faible, traduisant une variabilité spatiale des conditions de recharge. Les localités situées dans des zones de faible recharge sont situées autour de Bobo-Dioulasso et réparties de manière faible dans le sous-bassin du kou.

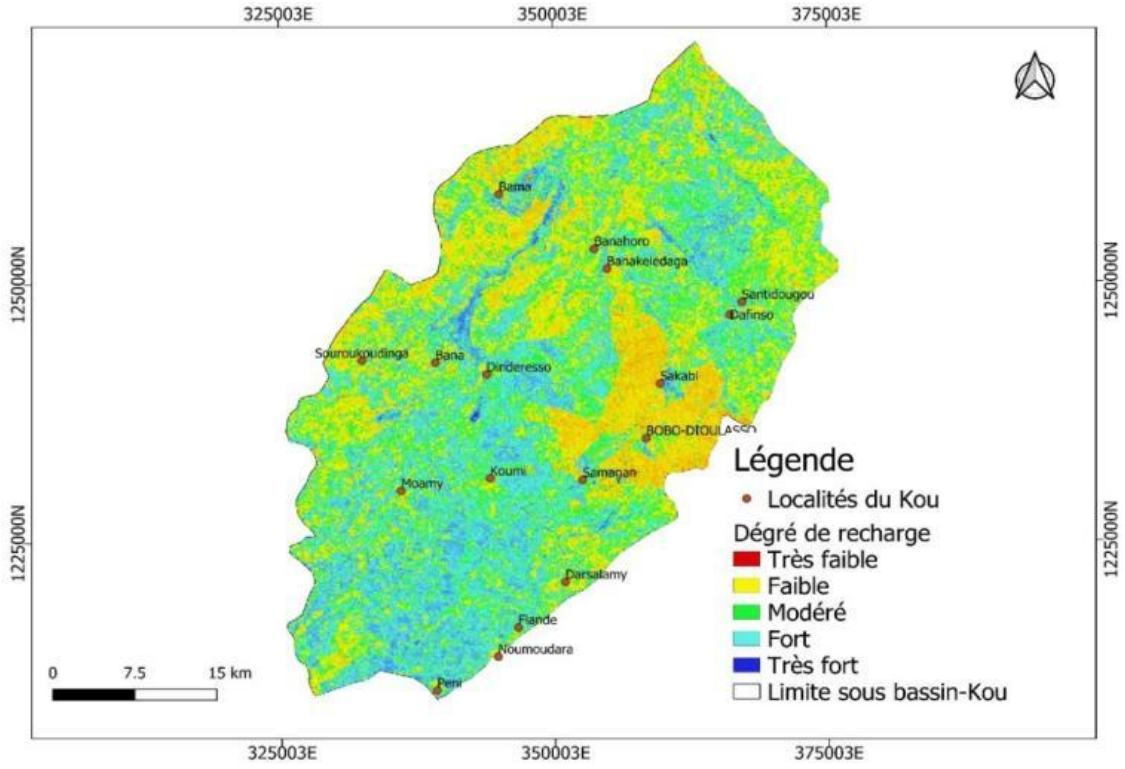


Figure 22: Zone potentielle de recharge

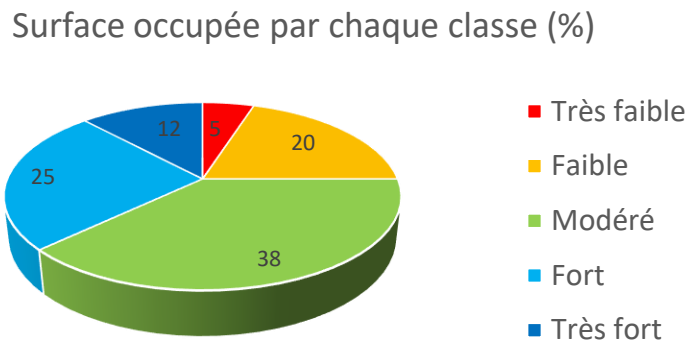


Figure 23: Surface occupée par chaque classe

Tableau 9: Classe et indice de recharge

Classes de zones favorables de recharge	Indices de recharge Ir (%)
Très faible	0-30
Faible	30-45
Modérée	45-60
Forte	60-72
Très forte	72-100

III.1.9 Validation de la carte de recharge par la matrice de confusion

La matrice de confusion a permis de comparer chaque classe de recharge prédite par le modèle (AHP) aux observations issues des 33 piézométriques du réseau piézométrique nationale dans le sous-bassin du Kou. La superposition spatiale des 33 piézomètres (Figure 24) avec la carte de degré de recharge a permis d'associer pour chaque piézomètre une classe de recharge prédite et une classe de recharge observée. Les résultats montrent que 24 piézomètres sur 33 piézomètres sont correctement classés et correspondent à une précision globale (Overall Accuracy) de 72.7% (Tableau15). Cette valeur indique une performance satisfaisante du modèle à l'échelle du sous-bassin. Le coefficient de kappa calculé est de 0.65% explique une bonne concordance entre les résultats du modèle et les observations terrain. Les erreurs de classification observées concernent les confusions entre les classes adjacentes qui reflètent la continuité spatiale des processus de recharge des aquifères dans le sous-bassin du Kou.

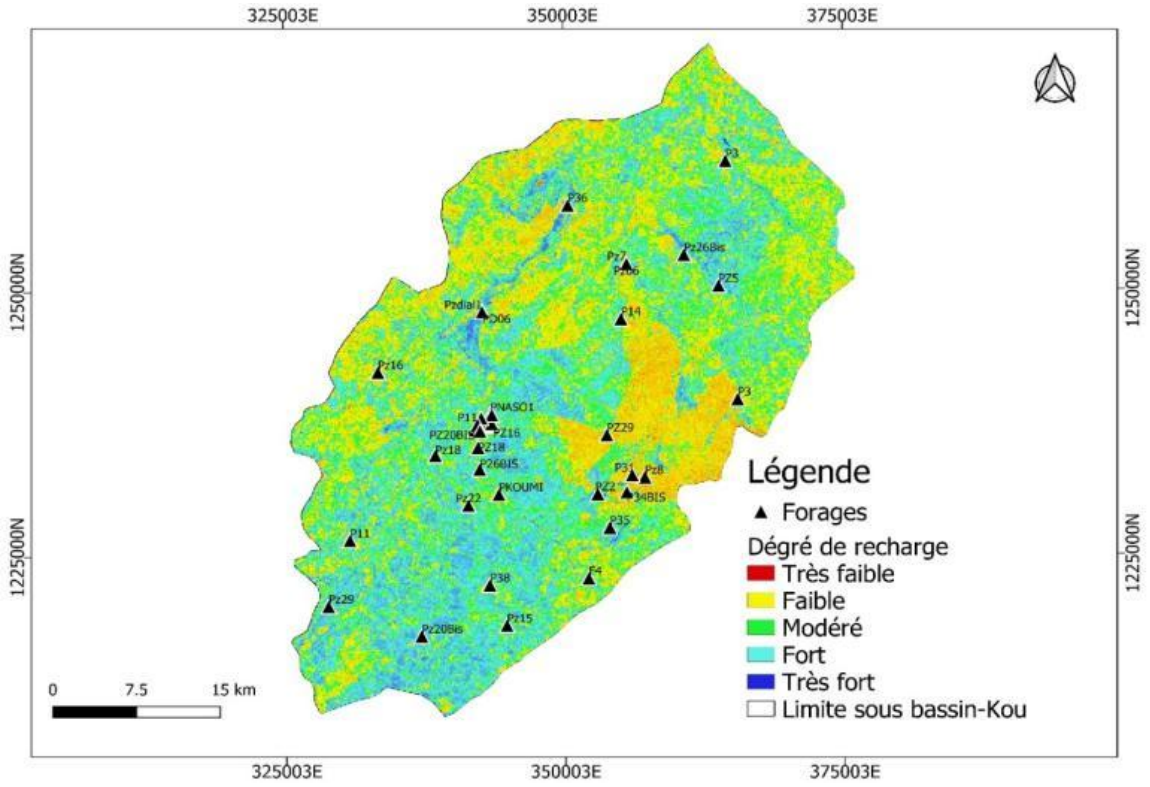


Figure 24: Cartes de validation des zones potentielles de recharge

Tableau 10: Matrice de confusion, valeur de précision globale et coefficient de kappa

Classe AHP/classe Terrain	Très faible	Faible	Modérée	Forte	Très Forte		OA (%)	P_e	Coef K
Très faible	4	1	0	0	0	4			
Forte	0	5	1	0	0	7			
Modérée	0	2	6	1	0	9			
Forte	0	0	2	5	1	8			
Très forte	0	0	0	1	4	5			
Totale	4	8	9	7	5	33	72.7	0.215	0.65

III.2 Hydrogéochimie

Les analyses hydrochimies ont porté sur 48 échantillons d'eau, incluant des forages, des puits piézométriques et des eaux de surface couvrant les différents compartiments hydrogéologiques du bassin.

III.2.1 Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques (Figure 25) mesurés sur le terrain ont permis de caractériser l'état et le fonctionnement hydrogéochimique des eaux souterraines du sous-bassin du Kou. La température des eaux échantillonnées varie entre 25 et 29,8°C, ce qui explique l'influence directe des conditions climatiques locales, car elles sont proches des températures moyennes

atmosphériques (31°C) et des aquifères peu profonds (Dakouré, 2003a). Le pH varie de 5 à 8,2, ce qui montre que les eaux échantillonnées sont majoritairement neutres et légèrement basiques. Les valeurs de pH légèrement acides peuvent être associées à une recharge récente ou à l'influence des sols superficiels riches en CO_2. La conductivité électrique est comprise entre 11,5 et 580µS/cm, montrant une minéralisation faible à modérée des eaux souterraines du sous-bassin. Les conditions d'oxydoréduction, caractérisées par des valeurs positives du potentiel redox et la présence d'oxygène dissous, témoignent d'un milieu globalement oxydant. Les paramètres physico-chimiques mesurés présentent des valeurs globalement conformes aux normes de qualité en vigueur au Burkina Faso, traduisant l'absence de dégradation chimique significative des eaux souterraines. Ces résultats corroborent les travaux de (Kutangila, 2025) et témoignent de l'existence d'une recharge active ainsi que d'un fonctionnement hydrogéochimique faiblement évolué des aquifères du sous-bassin du Kou.

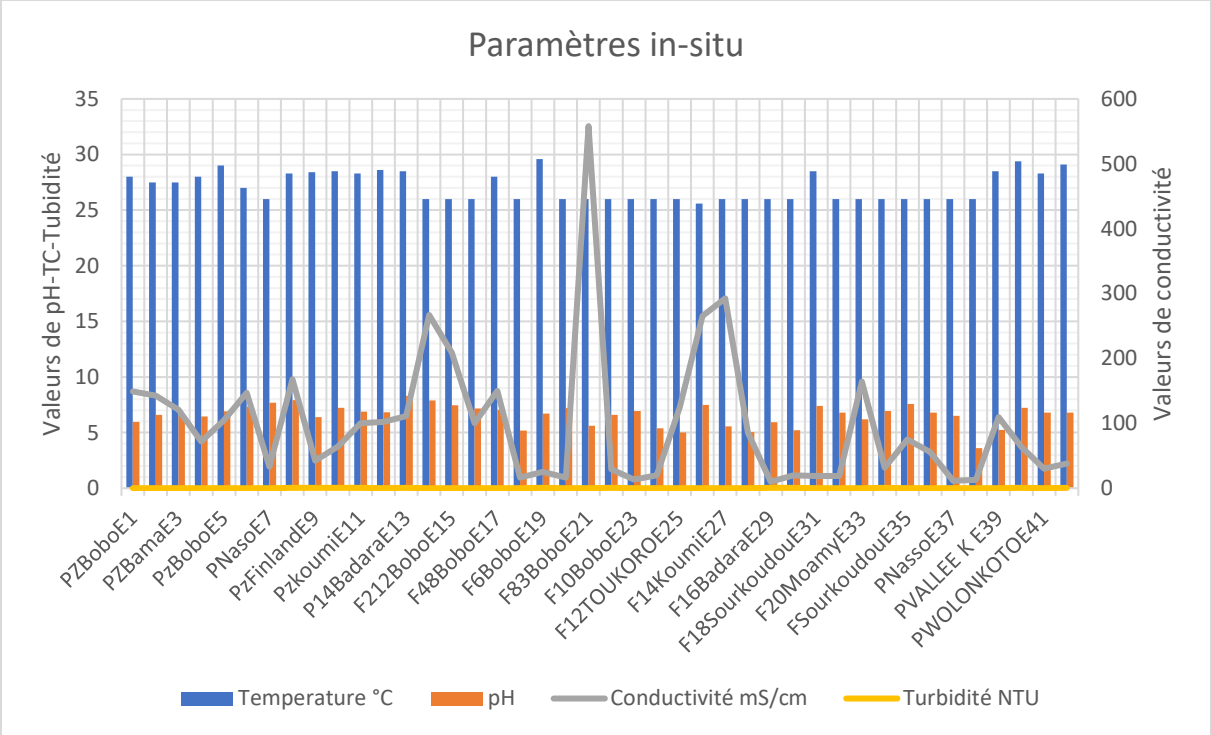


Figure 25: Paramètre in situ

III.2.2 Analyse en composantes principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) (Figure 26), appliquée aux données hydrochimiques des eaux souterraines du bassin du Kou, a permis de synthétiser l'information contenue dans le jeu de données initial. Les deux premières composantes principales captent respectivement 26,5 % (Dim 1) et 17,7 % (Dim 2) de la variance, soit un cumul de 44,2% de

l'inertie totale. Ce taux permet de caractériser les processus physico-chimiques majeurs régissant la qualité des ressources en eau de la zone d'étude.

Le plan factoriel se structure autour de deux gradients principaux : l'axe F1 oppose les eaux à forte minéralisation (F1+) aux eaux peu minéralisées (F1-), tandis que l'axe F2 traduit l'état de maturité chimique, distinguant les eaux présentant une évolution géochimique avancée (F2+) des eaux de recharge récente peu évoluées (F2-) (Sauret, 2013).

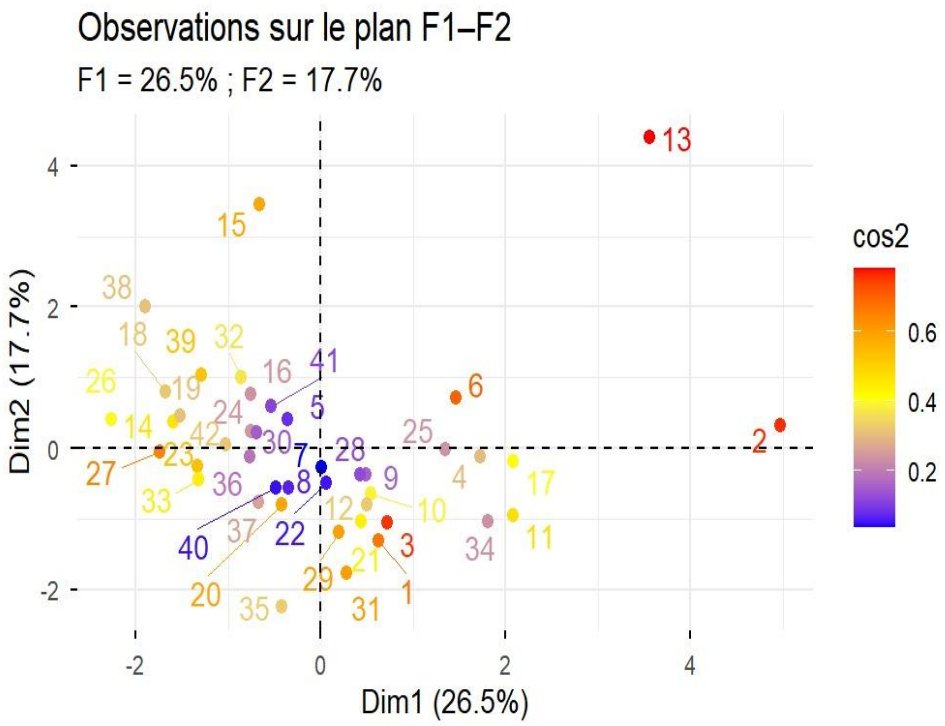


Figure 26: Répartition des individus

III.2.3 Qualité de représentation des variables (cos²)

La représentation des variables par le cos² (Figure 27) montre que les variables Na^+, SO_4^{2-}, K^+, Mg^{2+}, Cl^- et NO_3^- sont bien représentées sur le plan factoriel (Dim 1-Dim 2). Les ions Ca^{2+} et HCO_3^- présentent des valeurs de cos² plus faibles, suggérant l'intervention de facteurs supplémentaires non entièrement expliqués par les deux premiers axes (Sauret, 2013).

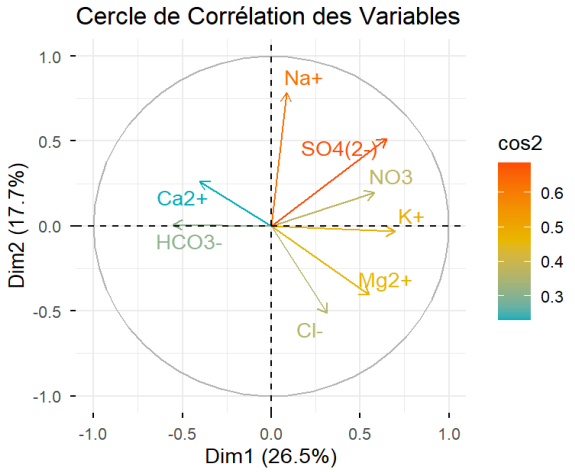


Figure 27: Représentation des variables par Cos2

III.2.4 Matrice de corrélation

La matrice de corrélation (Tableau 16) montre une corrélation très forte entre le potassium (K^+) et les sulfates (SO_4^{2-}) avec un coefficient (r = 0,84). Cette corrélation forte suggère une origine commune, liée à l'utilisation d'engrais chimiques (sulfates de potassium) dans les zones de cultures du sous-bassin. Selon (Dakouré, 2003) les activités agricoles dans la région influencent significativement la signature chimique des eaux souterraines par l'apport de sels fertilisants.

Cette dynamique est renforcée par les corrélations observées entre les chlorures (Cl^-) et les sulfates (SO_4^{2-}) avec (r = 0,73), ainsi qu'entre les chlorures (Cl-**)** et le potassium (K^+) avec (r = 0,73). En contexte soudano-sahélien, ce groupe d'ions traduit souvent une signature anthropique (rejets domestiques et agricoles) (Sauret, 2013).

Tableau 11: Matrice de corrélation

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	HCO_3^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Ca^{2+}	1							
Mg^{2+}	-0,18	1						
Na^+	-0,26	0,02	1					
K^+	-0,19	0,22	-0,14	1				
Cl-	-0,24	0,27	-0,08	0,73	1			
HCO_3^-	0,14	-0,36	-0,23	-0,11	0,01	1		
NO_3^-	-0,19	0,01	-0,17	0,21	0,11	0,11	1	
SO_4^{2-}	-0,15	0,38	-0,14	0,84	0,73	-0,08	0,34	1

III.2.5 Contrôle qualité des analyses chimiques

Le contrôle de la qualité des analyses chimiques a été effectué par le calcul du bilan ionique, basé sur l'équilibre électrique entre les cations et les anions. Les résultats montrent que plus de 95% des échantillons présentent une erreur de bilan ionique inférieure à ±5 %, seuil généralement perçu pour des analyses fiables. Ces résultats attestent de la bonne qualité analytique des données hydrochimies.

III.2.6 Diagramme hydrogéologique des faciès

Le résultat issu de diagrammes de Piper (Figure 28) a permis de mettre en évidence une distribution relativement homogène des échantillons, traduisant une composition chimique dominée par les ions bicarbonate (HCO_3^-) des anions. La majorité des points se positionne dans le champ des eaux bicarbonatées, qui montre une faible contribution des anions chlorure (Cl^-) et sulfate (SO_4^{2-}). Les échantillons portés sur les cations se concentrent principalement dans le champ dominé par le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}), avec une faible représentation du sodium (Na^+) et du potassium (K^+). Cette distribution explique une dominance des cations alcalino-terreux, caractéristique des eaux souterraines issues de la dissolution modérée des minéraux carbonatés et silicatés du substratum. La projection des échantillons dans le losange central du diagramme de Piper montre que la majorité des eaux appartient au faciès bicarbonaté calcique à calco-magnésien. Quelques échantillons présentent une légère évolution vers des faciès bicarbonatés sodiques, traduisant une variation spatiale de la composition chimique et une évolution progressive des eaux le long des axes d'écoulement souterrain.

Le diagramme de Piper révèle que les eaux sont faiblement minéralisées et chimiquement peu évoluées, cohérentes avec une alimentation majoritairement contrôlée par la recharge météorique et une interaction eau roche limitée dans le temps. Cette signature hydrochimique est caractéristique d'un système aquifère dynamique, caractérisé par une circulation rapide des eaux souterraines dans le sous-bassin du Kou (Dakouré, 2003; Kouanda, 2019; Kutangila, 2025; Sauret, 2013).

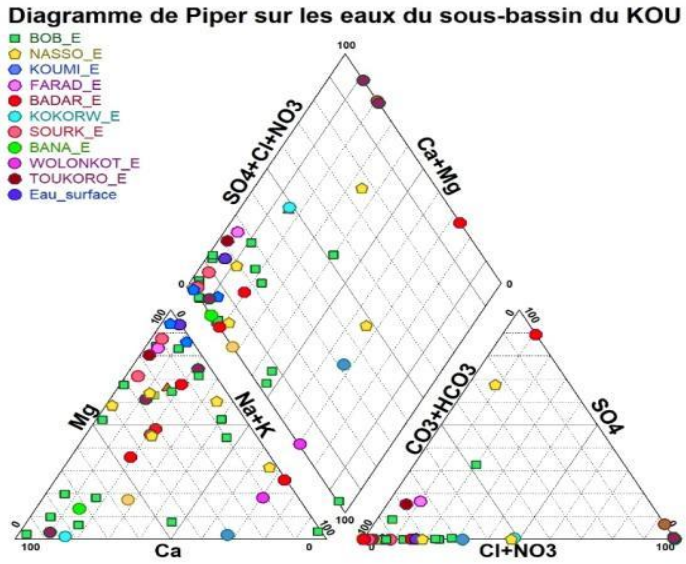


Figure 28: Diagramme de piper

III.3 Analyses isotopiques

III.3.1 Diagramme δ^2H Vs $\delta^{18}O$

L'analyse des isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}O$ et δ^2H) (Figure 29) a permis de mieux appréhender le mécanisme de recharge des eaux souterraines dans le sous-bassin du Kou.

Les échantillons alignés sur la droite météorique locale suggèrent une origine météorique des eaux souterraines, avec une infiltration rapide des précipitations sans modification isotopique significative. Cela indique que l'eau de pluie s'infiltre dans le sol sans subir d'évaporation en surface. Cette signature est caractéristique des zones perméables, les zones alluviales et les zones ou la nappe est peu profondes. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de (Kutangila, 2025), qui montrent que les eaux souterraines alignées sur la droite météorique reflètent une recharge récente et peu affectée par les processus d'évaporation.

Les échantillons situés en dessous de la droite météorique locale présentent un enrichissement en oxygène18 par rapport au deutérium, ce qui traduit l'influence de processus d'évaporation partielle avant ou au début de l'infiltration. Cette signature peut s'expliquer par l'évaporation des eaux de pluie à la surface du sol, l'infiltration des différée après stockage superficiel, la stagnation des eaux dans les plaines inondables. Ces observations concordent avec celles de (Dakouré, 2003; Kouanda, 2019; Kutangila, 2025), qui montrent que, dans les environnements semi-arides, l'évaporation avant l'infiltration modifie la signature isotopique des eaux de recharge localisée contrôlée par les zones de drainage.

Les échantillons situés au-dessus de la droite météorique locale peuvent traduire des processus de mélange. Ces mécanismes sont liés à un mélange entre les eaux de recharge récentes et les eaux de recharge anciennes stockées dans l'aquifère, une contribution de précipitations isotopique très pauvre, une recharge rapide à partir des événements pluvieux extrêmes. Cette signature isotopique concorde avec les travaux (Dakouré, 2003; Kouanda, 2019; Kutangila, 2025).

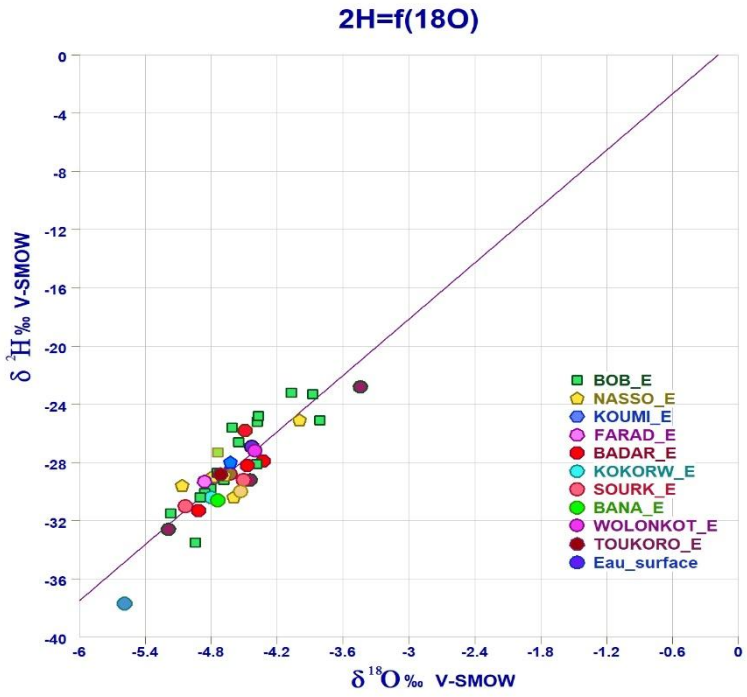


Figure 29: Relation 2H Vs 18O

III.3.2 Résultats du tritium (^3H)

L'analyse des teneurs en tritium (^3H) en comparaison avec les signatures isotopiques stables ($\delta^{18}O$) (Figure 30) a permis de vérifier les informations sur l'origine et le temps de séjours des eaux souterraines du sous-bassin du Kou. Selon (Lindsey et al., 2019), les intervalles actuels avérée sur le niveau des teneurs en tritium ne permettent pas de différencier les eaux anciennes et les eaux récentes. Le résultat issu de cette analyse a permis de mettre en évidence une relation cohérente entre la signature isotopique de l'eau et son degré de renouvellement.

- Les teneurs en tritium inférieures à 0.30 (UT) : Ces valeurs suggèrent que les eaux sont anciennes ou fossiles, isolées du cycle hydrologique actuel provenant des aquifères profonds ;
- Les teneurs en tritium variant entre 0.30 et 3 (UT) : Cet intervalle met en évidence les eaux issues d'un mélange, combinant les apports récents et anciens ;

- Les teneurs en tritium supérieures à 3 (UT) : Il s'est agi des Eaux récentes.

La tendance observée montre que les teneurs en tritium diminuent lorsque le temps de résidence des eaux augmente, tandis que les signatures en $\delta^{18}O$ restent majoritairement d'origine météorique. Cette évolution met en évidence la coexistence, dans le sous-bassin du Kou, de réservoirs à recharge rapide et de compartiments des aquifères qui se renouvellent lentement, confirmant un fonctionnement hydrogéologique contrasté, mais dominé par une alimentation pluviale (Dakouré, 2003; Kutangila, 2025).

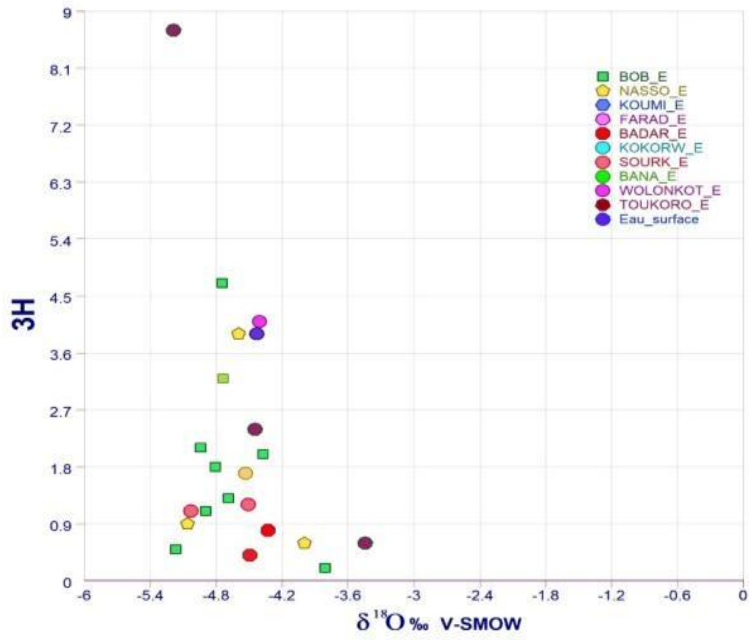


Figure 30: Relation 3H Vs 18O

III.4 Evaluation de recharge

L'application de la méthode de fluctuation piézométrique (Water Table Fluctuation WTF) (Figure 31) aux données piézométriques du sous-bassin du Kou a permis d'estimer la recharge annuelle des eaux souterraines à partir des variations saisonnières du niveau de la nappe.

Les estimations de la recharge annuelle (R) montrent une forte hétérogénéité spatiale, avec une valeur de recharge comprise entre 0,67-129,12 mm/an. Les pics d'infiltration se concentrent autour des points Pz16, Paem7 et Pz2. Cette réactivité du niveau de la nappe s'explique par des conditions de surface optimales : des altérites épaisses, une perméabilité importante et un relief plat qui limite le ruissellement. Les zones où se trouvent le P31, P14 affichent une recharge très faible soit 0,67 mm/an.

Les fortes recharges apparaissent ainsi localisées, ce qui confirme le caractère spatial hétérogène du processus de recharge souligne par (Dakouré, 2003). La recharge estimée par la méthode WTF reste cohérente avec le contexte climatique soudanien du sous-bassin du Kou, marqué par une saison des pluies concentrée et des pertes importantes par évapotranspiration (Tirogo, 2016). Ces résultats suggèrent que la recharge des eaux souterraines est contrôlée par les pluies intenses de la saison humide, avec une infiltration préférentielle dans les zones hydrogéologique favorables, et confirment que le caractère hydrodynamique dans le sous-bassin du Kou étant très dynamique et se diverge des conditions à l'utilisation rigoureuse de la méthode de fluctuation piézométrique soulignée par (Dakouré, 2003; Kutangila, 2025)

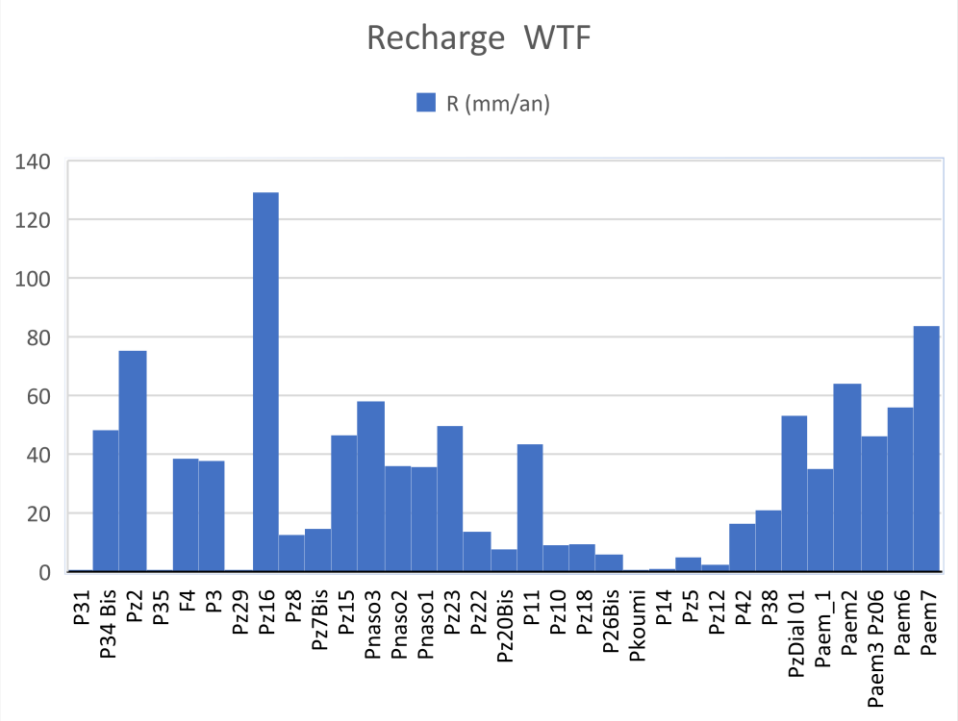


Figure 31: Estimation de la recharge

IV. LIMITES DE L'ÉTUDE

Bien que l'approche adoptée combinant l'analyse multicritère (AHP), l'hydrogéochimie, l'isotopie et la méthode WTF, offre une compréhension satisfaisante des processus de recharge du sous-bassin du Kou, notre étude comporte des incertitudes inhérentes aux méthodes et aux données utilisées. Premièrement, la fiabilité de la cartographie par analyse multicritère (AHP) dépend de la précision des données géospatiales. L'utilisation de la télédétection (Sentinel-2, MNT) impose une résolution qui peut occulter des hétérogénéités lithologiques ou structurales locales. De plus, malgré la validation par le ratio de cohérence et la validation du modèle AHP par la matrice de confusion avec une précision globale 72.7% et le coefficient de kappa 0,65 indiquant une performance satisfaisante et une concordance entre le modèle et les observations

de terrain, la pondération des critères conserve une part de subjectivité, pouvant influencer la délimitation fine des zones potentielles de recharge.

Deuxièmement, la quantification de la recharge par la méthode des fluctuations piézométriques (WTF) repose sur des hypothèses simplifiées. En absence de tests de pompage sur chaque site, l'utilisation de valeurs moyennes pour le coefficient d'emmagasinement (Sy) peut induire des biais dans l'estimation des volumes d'eau infiltrés. Par ailleurs, la complexité du système aquifère, présentant des conditions d'un système captive et de semi-captive, peut fausser l'interprétation des variations du niveau d'eau, qui ne refléteraient pas uniquement une recharge verticale directe.

Enfin, les approches hydrochimiques et isotopiques sont limitées par la fréquence temporelle des prélèvements. Les analyses fournissent une représentation instantanée qui ne capte pas toujours la réactivité immédiate du système lors d'événements pluviométriques extrêmes. La présence de tritium (^{3}H) a certes révélé un mélange d'eaux anciennes et récentes, mais la difficulté à quantifier précisément ces proportions limite la détermination du taux exact de renouvellement annuel.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude s'est concentrée sur la contribution à une meilleure connaissance sur la recharge des eaux souterraines dans le sous-bassin du Kou au Burkina Faso, à travers une compréhension de ses mécanismes, de la cartographie des zones potentielles de recharge et de sa quantification. Pour la cartographie des zones potentielles de recharge, l'utilisation de l'analyse multicritère (AHP) couplée aux SIG a mis en évidence que 75 % du territoire a un taux de recharge compris entre 45 et 72% du sous-bassin présente un potentiel de recharge allant de modéré à très fort, contre un potentiel de recharge de très faible à faible couvrant 25% de surface avec un taux de recharge estimé entre 0 et 45% principalement contrôlée par la structure lithologique la densité de fracturation et la pluie efficace. La validation du modèle par les données de terrain avec une précision globale de 72.7% et le coefficient de Kappa égale à 0,65 ainsi qu'un ratio de cohérence inférieure à 10% soit 0.02 confirmant la fiabilité de cette approche.

Les analyses hydrogéochimiques et isotopiques ont révélé que la minéralisation des eaux est régie par l'hydrolyse des silicates et la dissolution des carbonates, tout en signalant des impacts anthropiques localisés. L'analyse des isotopes stables (^{18}O ,^{2}H) démontre que les ressources en eau proviennent de précipitations météoriques, particulièrement lors d'épisodes pluvieux de forte intensité. La détection de tritium (^{3}H) met en évidence une coexistence entre des masses d'eau anciennes et des apports récents, ce qui traduit une cinétique de renouvellement relativement faible de l'aquifère. Parallèlement, l'usage de la technique WTF évalue l'infiltration efficace dans une fourchette de 0,67 à 129,12 mm/an, illustrant une variabilité marquée selon le contexte spatial et temporel des pluies.

Bien que le potentiel de recharge soit significatif, la vulnérabilité de la ressource face à la variabilité climatique et aux pressions anthropiques nécessite une surveillance accrue pour garantir sa pérennité.

Dans l'optique d'approfondir ces travaux et lever les incertitudes identifiées, nous recommandons plusieurs axes de recherche suivants :

- Modélisation hydrodynamique 3D : Passer d'une évaluation cartographique à une modélisation numérique d'écoulement type FEFLOW pour simuler les réponses de l'aquifère face à différents scénarios de prélèvements et de changements climatiques.
- Optimisation des constantes hydrodynamiques : Il est préconisé de mener des tests de pompage sur un maillage de puits plus serré. Cela permettra d'affiner la valeur du coefficient

d'emmagasinement (Sy) et, par conséquent, de fiabiliser les calculs de recharge en limitant les marges d'erreur.

- Suivi temporelle haute résolution : Mettre en place un suivi mensuel des signatures chimiques et isotopiques stables, radioactifs et les gaz rares sur un cycle hydrologique complet pour mieux comprendre les cinétiques de transfert dans la zone non saturée.
- Évaluation de la vulnérabilité à la pollution : Associer les cartes de recharge avec une analyse de l'occupation du sol pour cartographier les zones à risque de contamination, notamment dans les secteurs maraichers et urbains du bassin.
- Installation de stations de recharge artificielle : Étudier la faisabilité technique de dispositifs de recharge assistée dans les zones de faible potentiel pour compenser les déficits liés à la décharge.

BIBLIOGRAPHIE

Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. WIREs Computational Statistics, 2(4), 433-459. https://doi.org/10.1002/wics.101

Agogue, D. H., Aretouyap, Z., Tchato, S. C., Ngog II Legrand, C., Djomdi, E., Nague Madadjeu, N., Nguimfack Nguimgo, C., & Ndinchout Kpoumie, A. (2024). Application of analytical hierarchy process to assess groundwater potential for a sustainable management in the Menoua Division. Heliyon,10(2), e24310. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24310

Ake, G. E., Kouame, K. J., Koffi, A. B., & Jourda, J. P. (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) 129-144. https://doi.org/10.7202/1051696ar

Basile, D. M. G. G., Rigobert, T., Dawaï, D., Martial, F. T. P., Salomon, A., & Claude, B. J. (2019). Geological Mapping of the Panafrican Mokong Gneisess and Granitoides (Far North Cameroon): Contribution of Semi-automatic Processing from Landsat 8 OLI/TIRS Images. Journal of Geosciences and Geomatics, 7(2), 80-87. https://pubs.sciepub.com/jgg/7/2/4

BUNASOLS. (2002). Etude Morphopédologique des Provinces du Houet et du Tuy, Rapport Technique N°126, Juillet 2002.

Cheikh, Faye., Solly, B., Dièye, S. (2021). Evaluating of the potential groundwater zones using GIS and remote sensing case study of Sandougou sub-basin. (Gambia Basin). Université Assane Seck de Ziguinchor. http://rivieresdusud.uasz.sn/xmlui/handle/123456789/309

Congalton, R. G. (2001). Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. International journal of wildland fire, 10(4), 321-328. https://doi.org/10.1071/WF01031

Coulidiati, T. F. A., Biaou, A. C., Faye, M. D., Yonaba, R., Sauret, E. S. G., Compaoré, N. F., & Koïta, M. (2025). Groundwater Vulnerability in the Kou Sub-Basin, Burkina Faso: A Critical Review of Hydrogeological Knowledge. Water, 17(9), 1317. https://doi.org/10.3390/w17091317

Dakouré, D. (2003). Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso-Mali) -Essai de modélisation [Thèse de Doctorat]. Université Paris VI-Pierre et Marie Curie.

Derouane, J. (2008). Modélisation hydrogéologique du bassin sédimentaire (Rapport final). Direction Générale des Ressources en Eau. Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques. Ouagadougou Burkina Faso.

Dianati, A., Rasouli-Sadaghiani, M. H., Asadzadeh, F., Sepehr, E., & Aqdam, K. K. (2025). A PCA-based standardized spectral index from Sentinel-2 for modeling soil macronutrients in the Miandoab region, Iran. Scientific Reports, 15, 41023. https://doi.org/10.1038/s41598-025-25034-z

Drury, E., Jacob, D. J., Spurr, R. J. D., Wang, J., Shinozuka, Y., Anderson, B. E., Clarke, A. D., Dibb, J., McNaughton, C., & Weber, R. (2010). Synthesis of satellite (MODIS), aircraft (ICARTT), and surface (IMPROVE, EPA-AQS, AERONET) aerosol observations over eastern North America to improve MODIS aerosol retrievals and constrain surface aerosol concentrations and sources. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D14). https://doi.org/10.1029/2009JD012629

Faye, M. D. (2022). Caractérisation et modélisation du transfert de polluants dans un aquifère fracturé en milieu de socle (Sous bassin versant de la Sissili-Burkina Faso) [Thèse de Doctorat]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (Institut 2iE)

Gao, B.-C. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote sensing of environment, 58(3), 257-266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

Glaas, C., Vidal, J., Patrier, P., Beaufort, D., & Genter, A. (2019). Contribution of SWIR to the Clay Signature of Permeable Fracture Zones in the Granitic Basement. Overview of Soultz and Rittershoffen wells. In European Geothermal Congress. https://cnrs.hal.science/hal-02435184v1

Gleeson et Novakowsk. (2008). Identifying watershed-scale barriers to groundwater flow: Lineaments in the Canadian Shield. Geological Society of America Bulletin 121 (3-4), 333-347 https://doi.org/10.1130/B26241.1

Hagolle, O., Colin, J., Coustance, S., Kettig, P., d'Angelo, P., Auer, S., Doxani, G., & Desjardins, C. (2021). Sentinel-2 surface reflectance products generated by CNES and DLR: Methods, Validation and Applications. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 51, 9-15.

Healy, R. W. (2010). Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745

Hendrickx, J. M. H., & Walker, G. R. (1997). Recharge from precipitation. In Recharge of Phreatic Aquifers in Semi-Arid Areas. (pp. 19-111). Routledge

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological society of America bulletin, 56(3), 275-370. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2

Huet. M. (2015). Comparaison De Méthodes D'estimation De La Recharge Des Aquifères : Exemple De La Région Charlevoix-Haute-Côte-Nord. (Mémoire de maitrise). Université du Québec à Chicoutimi

Institut de Recherche pour le Développement. (2015). Changement climatique : Quels défis pour le sud. IRD édition https://hal.science/hal-01848330v1

Jensen, J. R. (2015). Remote sensing of the environment an earth resource perspective.

Jia, X., & Richards, J. A. (1999). Segmented principal components transformation for efficient hyperspectral remote-sensing image display and classification. Institut of Electrical and Electronics Engineers. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37(1), 538-542.

Jolliffe, I. T. (1986). Graphical Representation of Data Using Principal Components. In I. T. Jolliffe, Principal Component Analysis (p. 64-91). Springer New York.

Kagambega. (2022). Le Kou : Un bassin versant en plein mutation dans l'Ouest du Burkina Faso.

https://www.infosciencesculture.com/sites/default/files/2022-08/Article_KAGAMBEGA.pdf

Kouanda, B. (2019). Modélisation Intégrée du Complexe Mouhoun supérieur-Sourou dans le contexte des changements climatiques [Thèse de Doctorat]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Koussoube, Y., & Savadogo, A. N. (2017). Champs Captants Sur Mégafractures Du Socle Et Généralisation Des Réseaux D'adduction D'eau Potable En Milieu Rural : Concept Et Faisabilité. Rév. Ivoir. Sci. Technol, 30, 235-251.

Krishnamurthy, J., Mani, A., Jayaraman, V., & Manivel, M. (2000). Groundwater resources development in hard rock terrain-An approach using remote sensing and GIS techniques. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2(3-4), 204-215. https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85015-1

Kutangila, S. M. (2025). Ajout de la dimension eau souterraine dans la compréhension et la gestion des ressources en eau partagées dans la région du Sahel. Cas du bassin de

Taoudéni. [Thèse de Doctorat]. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. Biometrics, 363-374.

Lindsey, B. D., Jurgens, B. C., & Belitz, K. (2019). Tritium as an indicator of modern, mixed and premodern groundwater age. [Publisher: cabdirect.org]. Scientific Investigation Report. https://doi.org/10.3133/sir20195090

Machiwal, D., & Jha, M. K. (2014). Characterizing rainfall–groundwater dynamics in a hard-rock aquifer system using time series, geographic information system and geostatistical modelling. Hydrological Processes, 28 (5), 2824-2843 https://doi.org/10.1002/hyp.9816

Mashala, M. J., Dube, T., & Ayisi, K. K. (2025). Seasonal and Spatial Dynamics of Surface Water Resources in the Tropical Semi-Arid Area of the Letaba Catchment: Insights from Google Earth Engine, Landscape Metrics, and Sentinel-2 Imagery. Hydrology, 12(4), 68. https://doi.org/10.3390/hydrology12040068

McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7), 1425-1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Memon, A. V., Shah, N. V., Patel, Y. S., & Parangi, T. (2025). Enhancing Land Use/Land Cover Analysis with Sentinel-2 Bands: Comparative Evaluation of Classification Algorithms and Dimensionality Reduction for Improved Accuracy Assessment. Nature Environment and Pollution Technology, 24(2), B4264. https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i02.B4264

NASA. (2024, septembre 5). Sentinel-2 Multispectral Imager [Instrument]. Earth Science Data Systems, NASA. https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/sentinel-2-msi

Oularé et al.,. (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(36). https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p192

Rouse, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. No. E75-10354)

Saaty. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation.: 19 p.

Sauret. (2008). Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou. [Mémoire DEA]. Université de Liège

Sauret. (2013). Etude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso) [Thèse de Doctorat]. Université de Liège.

Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Flint, L. E., Gaye, C. B., Edmunds, W. M., & Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. Hydrological Processes. An International Journal, 20(15), 3335-3370. https://doi.org/10.1002/hyp.6335

Seguin.J.J., Lanini, S., Cabellero, Y., Amraoui, N., & Croiset, N. (2016). Méthode d'évaluation de la recharge des nappes complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines. BRGM/RP-65635-FR, 229 p., 106 ill., 49 tabl., 7 ann.

Sogreah, I. (1994). Etude des ressources en eau souterraine de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso (Rapp.Tech. Rapport final). Direction des Etudes et de la Planification. Ministère de l'eau. Ouagadougou, Burkina Faso.

Sorensen, J. P. R., Gahi, N. Z., Guug, S., Verhoef, A., Koïta, M., Sandwidi, W. J. P., Agyekum, W. A., Okrah, C., George Darling, W., Lawson, F. M. A., MacDonald, A. M., Vouillamoz, J.-M., & Macdonald, D. M. J. (2024). Groundwater recharge is diffuse in semi-arid African drylands: Evidence from highly instrumented observatories. Journal of Hydrology, 636, 131227. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131227

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., & Edmunds, M. (2013). Groundwater and climate change. Nature climate change, 3(4), 322-329.

Tirogo, J. (2016). Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso [Thèse de Doctorat]. Université Pierre et Marie Curie Paris-VI. Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Traoré, F. (2012). Optimisation de l'utilisation des ressources en eau du bassin du Kou pour des usages agricoles [Thèse de Doctorat]. Université de Liège.

UNESCO. (2015). Eaux souterraines et changement climatique : Petits Etats Insulaires en Développement. Programme Hydrologique International. Parie. UNESSCO, Division des sciences de l'eau.

Wellens, J., Traoré, F., Compaoré, N. F., Dakouré, D., Derouane, J., & Tychon, B. (2008). Elaboration du bilan d'eau du bassin versant du Kou et analyse critique des principaux composants. https://hdl.handle.net/2268/172888

Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. Remote sensing of Environment, 117, 34-49. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030

Wilson, E. H., & Sader, S. A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. Remote Sensing of Environment, 80(3), 385-396. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2

Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Frolking, S., Li, C., Salas, W., & Moore III, B. (2005). Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. Remote sensing of environment, 95(4), 480-492. https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.009

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025-3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179

Yabre, S., Koussoubé, Y., Gaë, S. É. S., Yalo, N., & Silliman, S. (2023). Identification of groundwater potential zones in Samendeni Watershed in sedimentary and semi-arid contexts of Burkina Faso, using analytic hierarchy process (AHP) method and GIS. American Journal of Climate Change, 12(1), 172-203. https://doi.org/10.4236/ajcc.2023.121009

Youan Ta. (2008). Contribution à La Teledection Et Des Systhemes D'informations Geographiques à La Prospection Hydrogeologique Du Socle Precabrien D'afrique De L'ouest : Cas De La Region De Bondoukou (nord-Est De La Cote D'ivoire). [Thèse de Doctorat]. Université de Cocody, 237p.

Zérah, Y., Valero, S., & Inglada, J. (2024). Physics-constrained deep learning for biophysical parameter retrieval from Sentinel-2 images: Inversion of the PROSAIL model. Remote Sensing of Environment, 312, 114309. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114309

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing, 24(3), 583-594. https://doi.org/10.1080/01431160304987

Zougmoré, R. B., Partey, S. T., Ouédraogo, M., Torquebiau, E., & Campbell, B. M. (2018). Facing climate variability in sub-Saharan Africa: Analysis of climate-smart agriculture opportunities to manage climate-related risks. Cahiers Agricultures (TSI), 27(3), 1-9.

ANNEXES

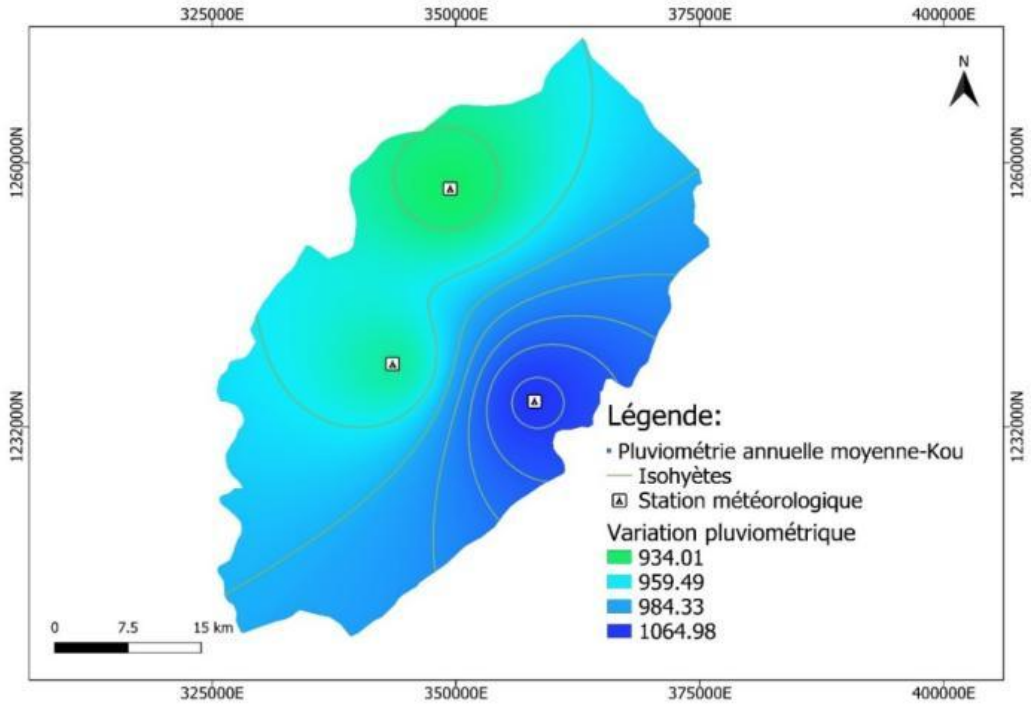


Figure 32: Pluviométrie moyenne annuelle

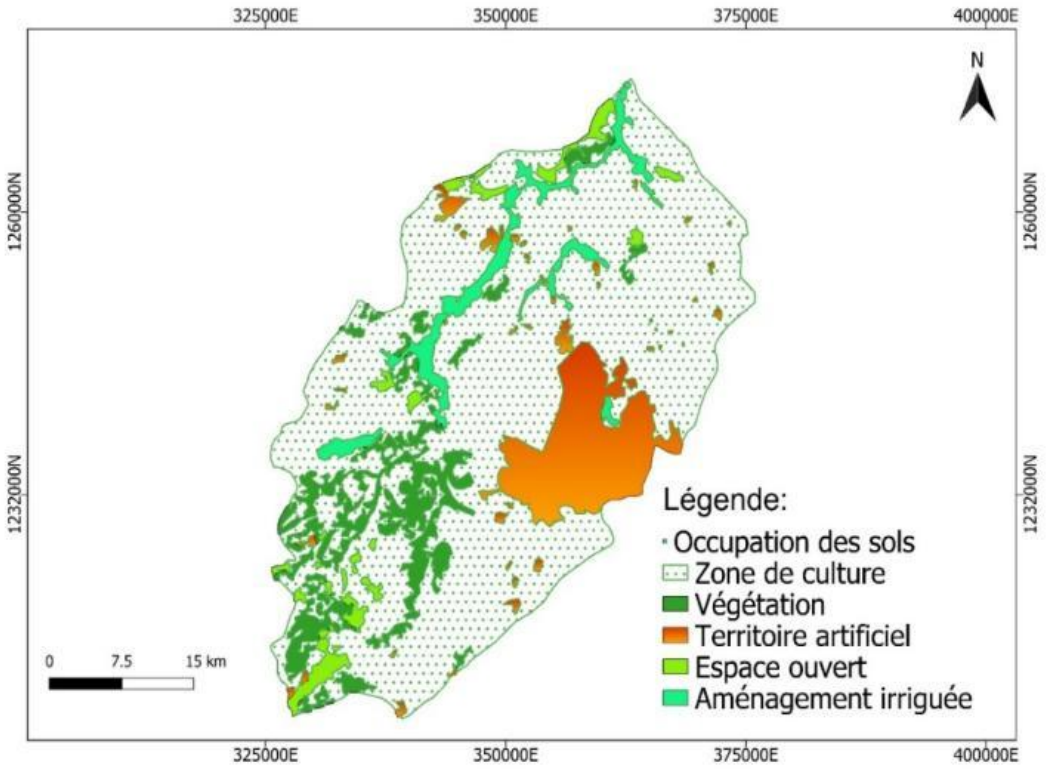


Figure 33: Occupation des sols

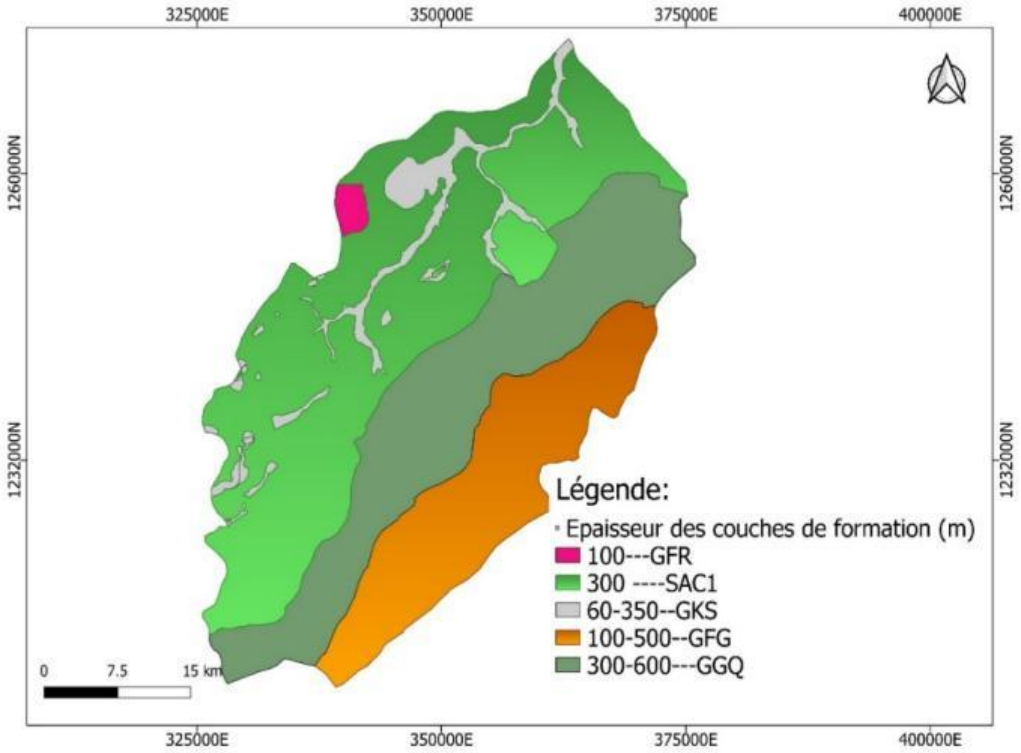


Figure 34: Facteur épaisseur des couches de formation

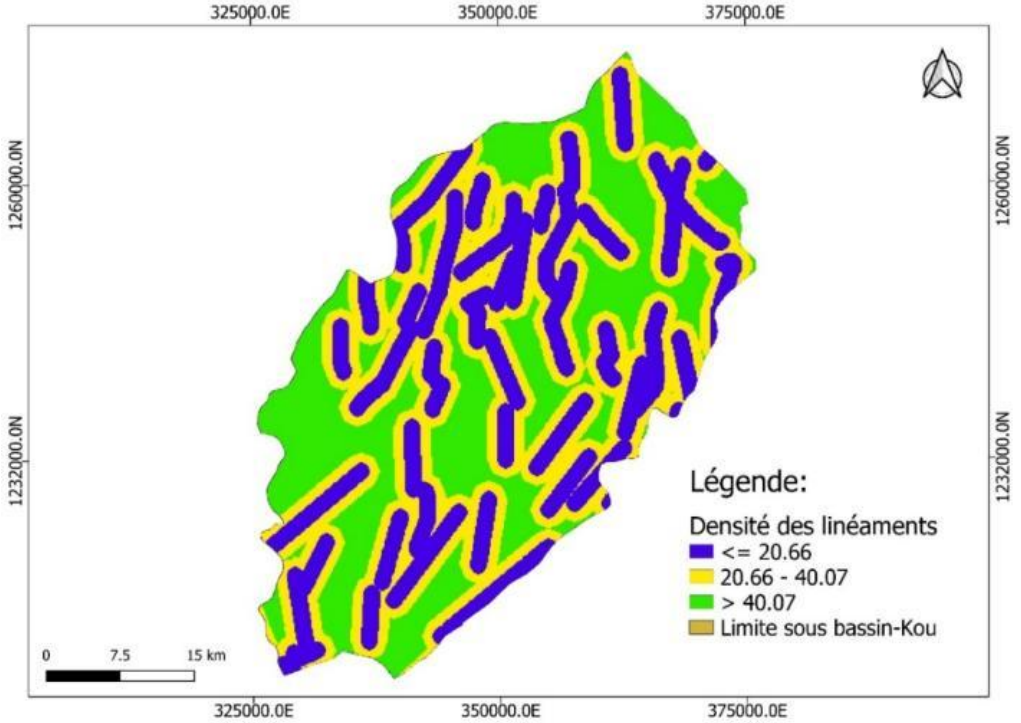


Figure 35: Densité des linéaments

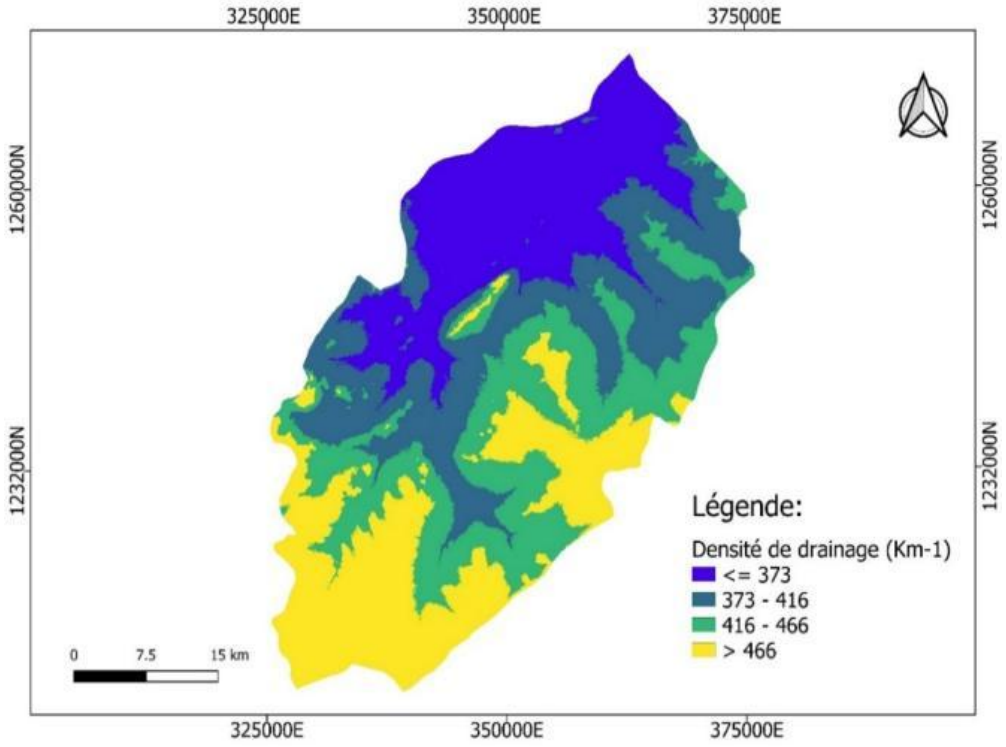


Figure 36: Densité de drainage

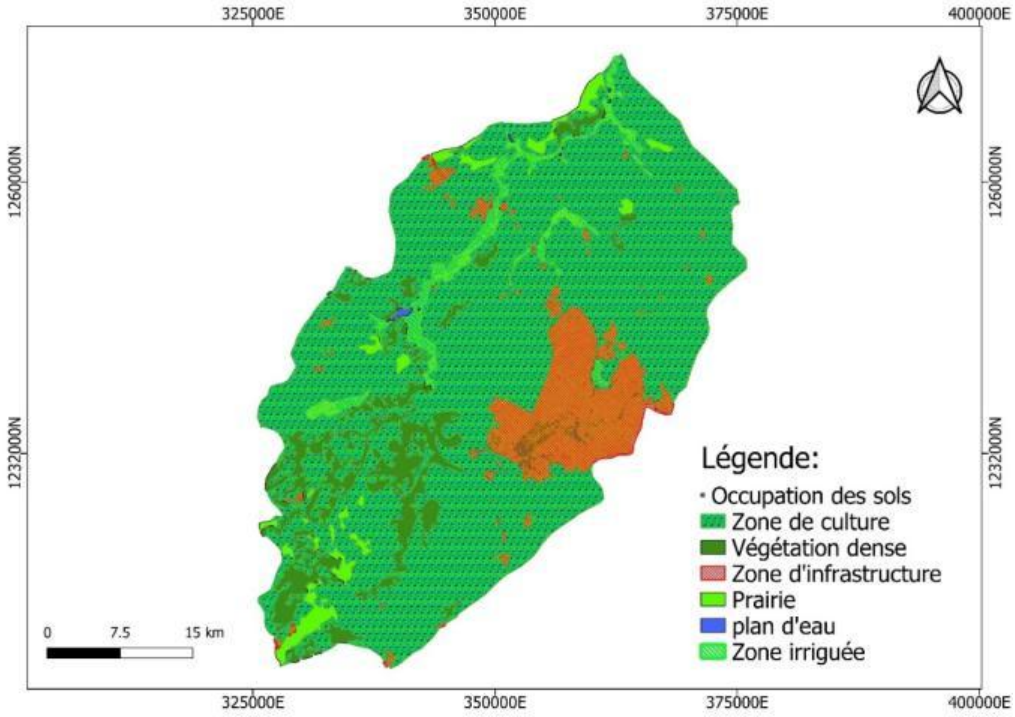


Figure 37: Occupation de sols sentinel-2

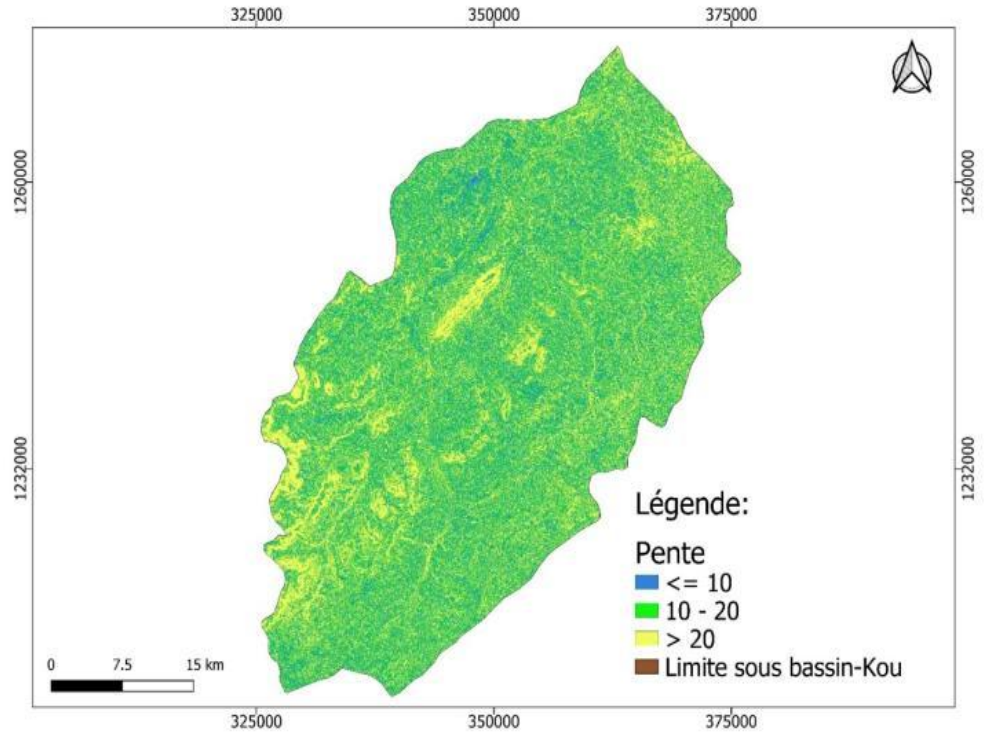


Figure 38: Pente

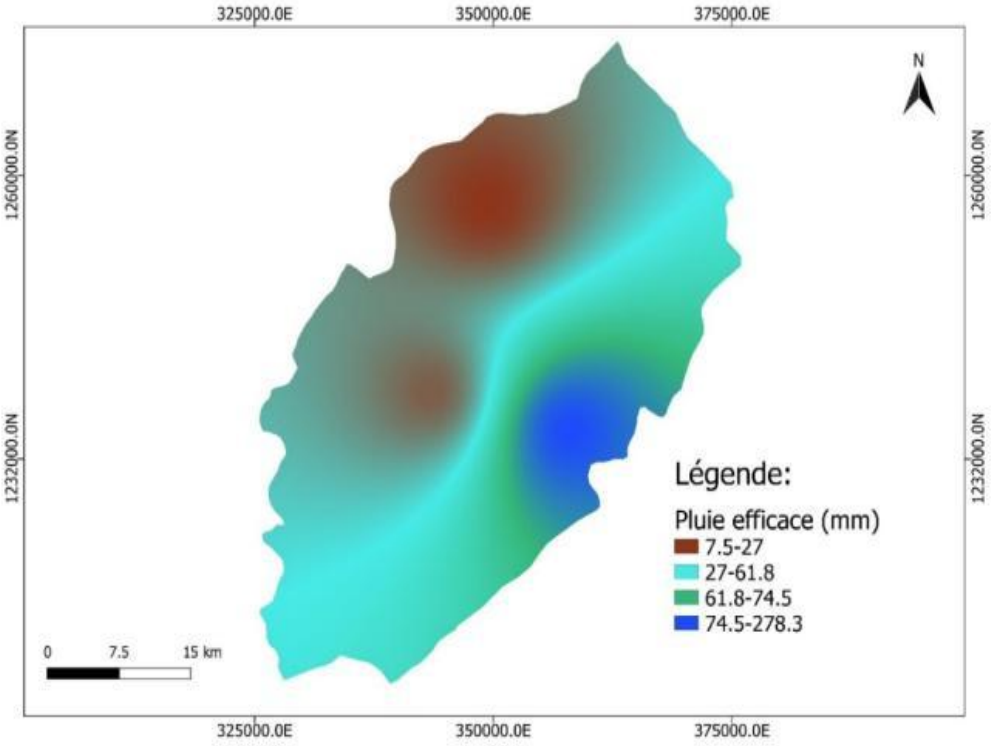


Figure 39: Pluie efficace

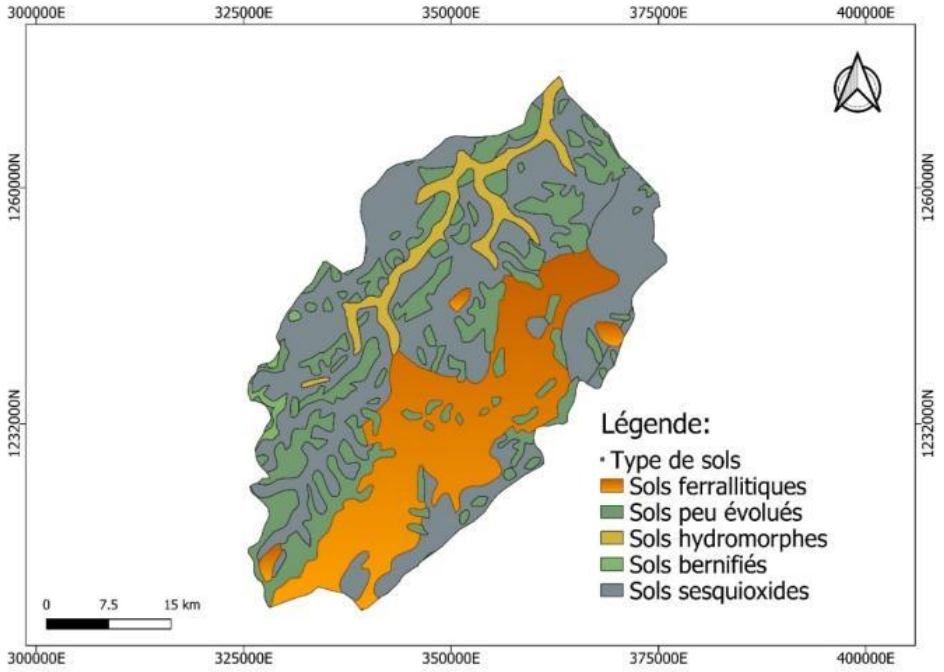


Figure 40: Types des sols

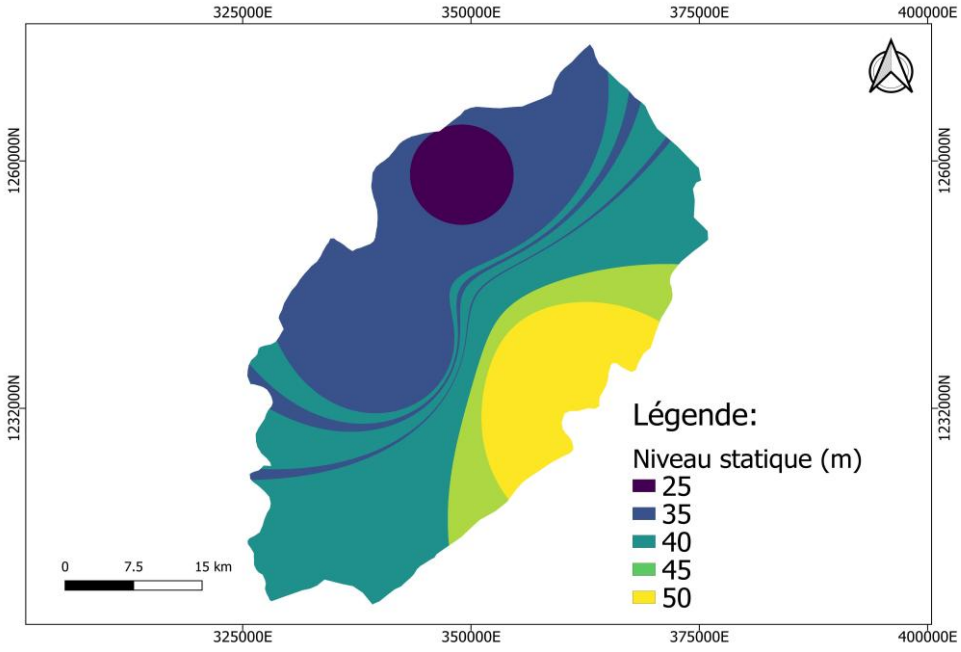


Figure 41: Niveau statique

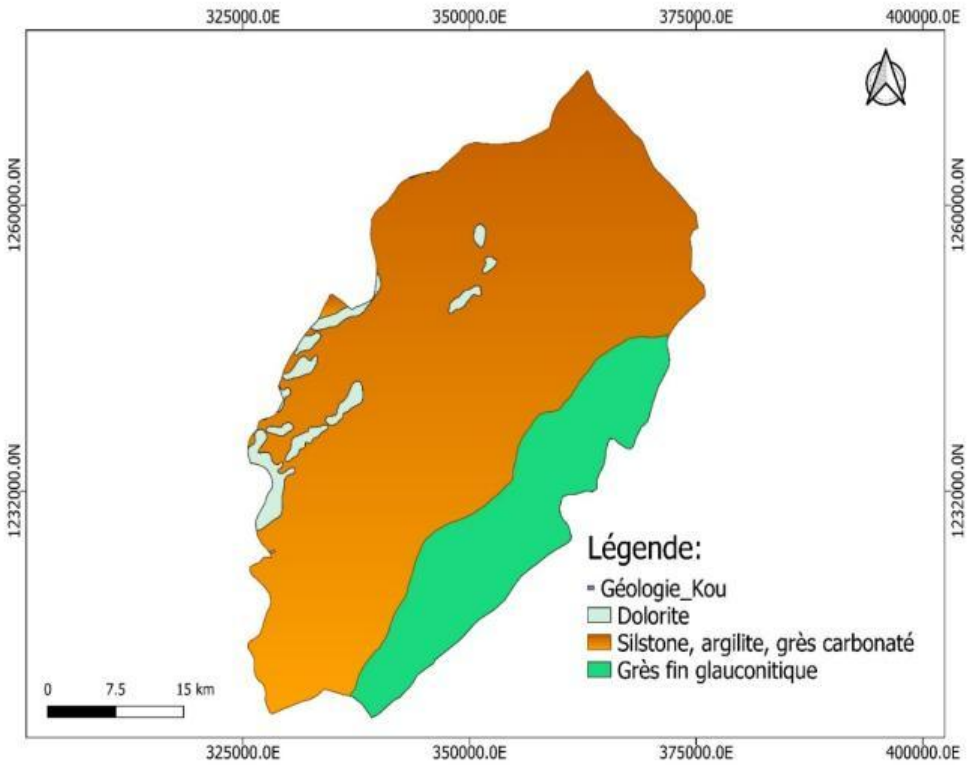


Figure 42: Géologie

Tableau 12: Facteurs de recharge

N°	Facteur d'influence	Catégorisation de chaque facteur	Poids global (Cote/Importance)
1	Densité des linéaments	Valeur linéaire (km/km2)	7
2	Épaisseur des couches lithologique	Profondeur du sol et des formations	7
3	Occupation du sol	Type de couverture terrestre et état de la couverture	5.5
4	Pente	Type de terrain	6
5	Densité de drainage	Valeur linéaire (km/km²)	5
6	Pluie efficace	Quantité et distribution spatio-temporelle des précipitations	7
7	Type de Sol	Texture et profondeur du sol	3
8	Géologie	Type de roche, degré d'altération, présence de joints, fractures, faille	3.5

9	Niveau statique	Profondeur du toit de la nappe phréatique	5

Tableau 13: Poids des caractéristiques en fonction de leurs degrés d'infiltration

Facteur pondéré	Classe de Caractéristique (Contexte du Kou)	Degré d'Infiltration	Poids assigné	MG	(Wi) normalisé
1 Densité des linéaments (km/km2)					
	[> 50]	Très Forte	7	2.09	0.41
	[40.07-50]	Forte	6	1.79	0.35
	[20.66-40.07]	Moyenne	3	0.89	0.18
	[10-20.66]	Très Faible	1	0.29	0.06
2 Épaisseur des couches (m)					
	GGQ [300-600]	Très Forte	7	2.19	0.44
	GFG [100-500]	Forte	5	1.56	0.31
	SAC1, GKS [60-350]	Moyenne	3	0.94	0.18
	GFR [100]	Faible	1	0.31	0.06
3 Pente (%)					
	[0 - 5%]	Très Forte	6	1.87	0.39
	[5- 10%]	Forte	5	1.56	0.36
	[10- 20%]	Moyenne	3.5	1.09	0.18
	[> 20%]	Faible	1	0.3	0.06
4 Géologie					
	Dolorite	Très forte	7.5	2.14	0.43
	Grès fin glauconitique	Moyenne	5	1.43	0.29
	Siltstone, argilite, carbonate, grès	Faible	4	1.14	0.23
5 Niveau statique (m)					
	[45-50]	Très Forte	7	2.09	0.41
	[40-45]	Forte	6	1.79	0.35
	[35-40]	Moyenne	3	0.89	0.18
	[25-35]	Faible	1	0.29	0.06

6 Densité de Drainage (km/km2)					
	[> 373]	Très Forte	7	2.07	0.52
	[373-416]	Forte	5.5	1.62	0.41
	[416-466]	Faible	1	0.32	0.08
7 Occupation des sols					
	Végétation dense	Très Forte	7.5	1.76	0.29
	Mosaïque culture Végétation moyenne	Forte	6	1.52	0.25
	Eaux de surface	Forte	7	1.29	0.22
	Cultures intensives/prairie.	Moyenne	4.5	1.17	0.19
	Zones d'infrastructure	Très Faible	1	0.23	0.04
8 Types de sols					
	Sols ferrallitiques	Très Forte	7.5	1.78	0.29
	Sols peu évolués	Forte	6.5	1.54	0.25
	Sols sesquioxydes	Moyenne	5.5	1.3	0.22
	Sols hydromorphes	Moyenne	5	1.18	0.19
	Sols bernifiés	Très faible	1	0.24	0.04
9 Pluie efficace (mm)					
	[7.5-27]	Très faible	1	0.268	0.054
	[27-61.8]	Moyenne	5	1.34	0.27
	[61.8-74.5]	Forte	5.5	1.476	0.297
	[74.5-278.3]	Très forte	7	1.879	0.378

Tableau 14: Filtre Sobel dimension 7.7

1	2	3	4	3	2	1
2	3	4	5	4	3	2
3	4	5	6	5	4	3
0	0	0	0	0	0	0
-6	-4	-5	-6	-5	-4	-3
-2	-3	-4	-5	-4	-3	-2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1

a) Filtre Sobel de direction N-S

1	2	3	0	-3	-2	-1
2	3	4	0	-4	-3	-2
3	4	5	0	-5	-4	-3
4	5	6	0	-6	-5	-4
3	4	5	0	-5	-4	-3
2	3	4	0	-4	-3	-2
1	2	3	0	-3	-2	-1

b) Filtre Sobel de direction E-O

0	1	2	2	3	3	4
-1	0	3	4	4	5	3
-2	-3	0	5	6	4	3
-2	-4	-5	0	5	4	2
-3	-4	-6	-5	0	3	2
-3	-5	-4	-4	-3	0	1
-4	-3	-3	-2	-2	-1	0

c) Filtre Sobel de direction NE-SO

4	3	3	2	2	1	0
3	5	4	4	3	0	-1
3	4	6	5	0	-3	-2
2	4	5	0	-5	-4	-2
2	3	0	-5	-6	-4	-3
1	0	-3	-4	-4	-5	-3
0	-1	-2	-2	-3	-3	-4

d) Filtre Sobel de direction NO-SE

Tableau 15: Synthèse de calcul des indices biophysiques

Indice	Définition	Plage de valeurs	Interprétation	Source
NDVI	Indice de végétation qui évalue la densité et la santé de la végétation	-1 à +1	<0 : eau / nuages, 0-0,2 : sol nu, 0,2 -0,5 : végétation faible à modérée, >0,5 : végétation dense	(Rouse et al., 1974)
NDWI	Indice de l'eau de surface	-1 à +1	>0 : probable présence d'eau, ≤0 : sol ou végétation	(McFEETERS, 1996)

MNDWI	Indice amélioré pour extraire l'eau urbaine / surface d'eau en milieu urbain	-1 à +1	>0 : eau, ≤0 : non-eau (sol, bâtiments)	(Xu, 2006)
NDMI	Indice d'humidité de la végétation et du sol	-1 à +1	<0 : zones sèches, 0-0,3 : humidité faible à modérée, >0,3 : zones humides / végétation hydratée	(Gao, 1996)
LSWI	Indice de teneur en eau du sol et de la végétation	-1 à +1	>0 : humidité élevée, <0 : faible humidité	(Xiao et al., 2005)
NDBI	Indice pour détecter les zones artificialisées	-1 à +1	>0 : zone bâtie, <0 : sol nu, végétation ou eau	(Zha et al., 2003)

Tableau 16: Données hydrogéochimies

	Nom	Anions(r	Ca	Mg	Na	K	Fer	Fe(II)	Fe(III)	Mn	Sr	Li+	Al	NH4	H3O+	HCO3	CO3	Cl	SO4	PO4	NO3	NO2
1	PZBOboE1	0.13273	0.8	21.36	0.1	9.5							0%		0.00195	7.6		0	0		0.5	
2	PZBOboE2	2.02200	5.66	23.79	1	57							0%		0.08742	58.56		9.4	31.7		8.5	
3	PZBAE3	0.63299	8	17.42	0.8	12.2							0%		0.19633	20.13		9.48	0.01		2.2	
4	PzBoboE4	1.35150	8.13	18.1	2.4	12.2							0%		3.93716	62.22		6.23	0		9.34	
5	PzBoboE5	1.21350	9.6	0.96	2.7	14.4							0%		0.07722	71.78		0	0.03		2.26	
6	PzNasoE6	0.49989	3.2	21.36	15.3	13.6							0%		0.07336	7.32		0	16.14		2.72	
7	PnasoE7	0.10998	20.04	17.96	0.7	0.9							0%		0.02911	6.71		0	0		0	
8	PzPi?niE8	4.73980	20.04	32.05	5.3	12.8							0%		0.01771	289.1		0	0.03		0.07	
9	PzFinlandE9	0.32208	20.04	18.96	14.1	2.6							0%		0.00520	0		9.61	0.14		2.98	
10	PzDiardougouE10	0.02603	20.04	16.49	5.5	14.7							0%		0.01971	0		0	0.08		1.51	
11	PzkoumiE11	0.46082	18.43	24.75	1	13.4							0%		0.18529	0		11.47	0.01		8.5	
12	PkoumiE12	0.03730	1.6	17.96	9.1	1.4							0%		0.30208	0		0	0.01		2.3	
13	P14BadaraE13	1.43320	0.4	13.58	63	17.1							0%		0.00956	0		5.48	61.41		0	
14	F1 BoboE14	5.13630	6	1.02	0.5	2.2							0%		0.00143	312.93		0.24	0.04		0	
15	F212BoboE15	2.77410	0.8	1.45	76	0.4							0%		0.11671	168.36		0.49	0.05		0	
16	F32BoboE16	1.44060	27.66	1.94	1.6	1.5							0%		0.24152	87.84		0	0.05		0	
17	F48BoboE17	0.49610	4.6	35.68	12	16.9							0%		0.00016	23.18		0	0.04		7.07	
18	F5Dial01E18	0.20769	78.48	1.21	0.5	3.3							0%		0.08147	12.2		0	0		0.48	
19	F6BoboE19	1.82240	78.4	12.61	4.9	4.1							0%		0.00261	111.19		0	0		0	
20	F72BoboE20	1.88100	24.75	16.99	0.5	1.3							0%		0.00308	100.04		7.98	0.04		0.96	
21	F83BoboE21	0.56074	3.04	25.77	1.6	8.2							0%		0.00451	24.4		5.32	0.16		0.46	
22	F9BoboE22	1.89750	24.04	31.3	1	0.3							0%		0.00429	100.04		3.01	8		0.4	
23	F10BoboE23	3.78310	1.2	4.85	0	0.6							0%		0.00341	224.48		3.55	0.11		0.1	