

Utilisation de la Télédétection et de l'Analyse Multicritère pour l'Identification Préliminaire des Sites Propices à la Mise en Place de Forages d'Eau Potable en Zone Rurale

Cas d'étude de la Région Ngoyo-Mununzi au Nord-Kivu, RDC

KAYOMBO RETH Nathan¹, ATWABI BYAMUNGU Patrick¹, MUHINDO BAHAVIRA Johnny^{2,4},
PALUKU LUKUMBI Michael³, PENDA HALIZA Isaac⁴, MULEY NYANDE Acacia⁵

¹ Département de Génie Rural, Institut National du Bâtiment et des Travaux Publics (INBTP), Kinshasa, RDC.

² Département du Bâtiment et des Travaux Publics, Institut National du Bâtiment et des Travaux Publics (INBTP), Kinshasa, RDC. Email : johnny.muhindo@gmail.com, (Auteur correspondant).

³ Département d'Hydraulique et Environnement, Institut National du Bâtiment et des Travaux Publics (INBTP), Kinshasa, RDC.

⁴ Direction de Géologie, Secrétariat général aux Mines, Ministère des Mines, Kinshasa RDC

⁵ Département des Sciences de l'Environnement, Université Nouveaux Horizons (UNH), Lubumbashi, RDC.



Résumé— L'accès à l'eau potable reste un défi majeur dans les zones rurales de la République Démocratique du Congo (RDC), où les communautés dépendent de sources d'eau naturelles non protégées. Cette étude vise à identifier les sites propices à l'implantation de forages en utilisant les Systèmes d'Information Géographique (SIG), la télédétection et l'Analyse Multicritère (AMC) afin d'améliorer la gestion des ressources en eau dans la région de Ngoyo-Mununzi, au Nord-Kivu.

Une combinaison de SIG, de télédétection et du Processus Hiérarchique Analytique (AHP) a été utilisée pour évaluer les facteurs environnementaux clés influençant la disponibilité des eaux souterraines. Les paramètres analysés incluent la pente, la densité de drainage, la géologie, l'occupation du sol, la précipitation, la texture du sol et l'indice de végétation (NDVI). La méthode AHP a permis de pondérer ces critères, et une analyse spatiale a été réalisée avec ArcGIS et Google Earth Engine (GEE) pour générer une carte du potentiel en eaux souterraines.

Les résultats montrent que les zones à faible pente, à densité de drainage modérée et aux formations géologiques perméables sont les plus adaptées à l'implantation de forages. La carte finale classe la zone d'étude en cinq catégories de potentiel, allant de faible à excellent. Les zones les plus favorables se situent principalement au sud et au nord-ouest de la région.

Cette étude démontre que l'approche combinant SIG et AMC basée sur l'AHP permet d'identifier efficacement les sites optimaux pour les forages, offrant ainsi une solution économique pour améliorer l'accès à l'eau en milieu rural.

Mots clés— Télédétection ; Analyse multicritère ; Hydrogéologie ; SIG ; Recharge des nappes ; Sélection de sites ; Modélisation spatiale ; Gestion de l'eau.

Abstract— Access to drinking water remains a major challenge in rural areas of the Democratic Republic of Congo, where communities rely on unprotected natural water sources. This study aims to identify suitable locations for boreholes using Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) to enhance water resource management in Ngoyo-Mununzi, North Kivu.

A combination of GIS, remote sensing, and the Analytical Hierarchy Process (AHP) was employed to evaluate key environmental factors influencing groundwater availability. Parameters such as slope, drainage density, geology, land use, precipitation, soil texture, and vegetation index (NDVI) were analyzed. The AHP method was applied to weight these criteria, and spatial analysis was conducted using ArcGIS and Google Earth Engine (GEE) to generate a groundwater potential map.

The results indicate that areas with low slopes, moderate drainage density, and permeable geological formations are the most suitable for borehole installation. The final groundwater potential map classifies the study area into five categories, ranging from low to excellent suitability. Zones with high suitability cover a significant portion of the region, particularly in the southern and northwestern parts. This study demonstrates that GIS and AHP-based MCDA can effectively identify optimal sites for boreholes, providing a cost-effective approach to improving water access in remote areas.

Keywords— Remote sensing, Multi-criteria analysis, Hydrogeology, GIS, Groundwater recharge, Site selection, spatial modeling, Water management

I. INTRODUCTION

1.1. Contexte et justification de l'étude

L'accès à l'eau potable est un défi majeur dans les zones rurales de la République Démocratique du Congo (RDC), où une grande partie de la population dépend encore des sources d'eau naturelles souvent non protégées [1]. La pollution des eaux de surface, la variabilité climatique et l'absence d'infrastructures de distribution d'eau exacerbent cette problématique, entraînant des risques sanitaires élevés pour les populations locales. Dans ce contexte, l'exploitation des eaux souterraines à travers le forage de puits constitue une solution durable pour l'approvisionnement en eau potable, notamment dans des régions où les sources de surface sont rares ou contaminées [2].

Cependant, l'implantation de forages nécessite une sélection rigoureuse des sites afin d'optimiser la rentabilité des opérations et d'assurer la durabilité des ressources exploitées [3]. Les méthodes conventionnelles de reconnaissance hydrogéologique, bien que précises, sont coûteuses et nécessitent des investigations de terrain approfondies [4]. Dans ce contexte, l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de la télédétection combinée à une analyse multicritère apparaît comme une approche innovante et efficace pour identifier les sites propices à l'installation de forages d'eau potable [5].

En effet, la télédétection permet d'analyser plusieurs paramètres environnementaux influençant la recharge et la disponibilité des eaux souterraines, tels que la pente, la densité de drainage, la géologie, l'occupation du sol, la pluviométrie et la texture du sol [6]. L'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) permet, quant à elle, de pondérer ces différents facteurs en fonction de leur importance relative dans le processus de sélection des sites de forage [7].

La présente étude s'intéresse à la région de Ngoyo - Mununzi, située au Nord-Kivu, en RDC. Cette région fait face à des défis d'accès à l'eau potable en raison de sa topographie variée, de la densité du réseau hydrographique et des caractéristiques géologiques locales. L'objectif est d'identifier les sites potentiellement favorables à la mise en place de forages en combinant les outils de télédétection, d'analyse multicritère et de SIG.

1.2. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'identifier les zones favorables à l'installation de forages d'eau potable en zone rurale à l'aide des SIG, de la télédétection et de l'analyse multicritère. Plusieurs objectifs spécifiques découlent de cet objectif général :

- Analyser les paramètres environnementaux influençant la disponibilité des eaux souterraines à l'échelle de la zone d'étude.
- Appliquer la méthode AHP pour la pondération des critères utilisés dans la sélection des sites.
- Élaborer une carte de potentiel des sites favorables à la mise en place de forages.

II. RÉVUE DE LITTÉRATURE

II.1. Introduction

L'identification des zones potentielles d'eaux souterraines est essentielle pour la gestion durable des ressources en eau. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) couplés au processus de hiérarchie analytique (AHP) sont couramment utilisés pour délimiter ces zones. Cette revue analyse plusieurs études en tenant compte des critères d'évaluation, des méthodes employées et des limites observées.

II.2. Applications du SIG et de l'AHP dans l'identification des zones potentielles d'eaux souterraines

II.2.1 Méthodologies et critères d'évaluation

Les études examinées adoptent une approche multicritères, combinant différents paramètres influençant la recharge des nappes :

- Géologie et lithologie : facteurs majeurs influençant la porosité et la perméabilité [8], [9].
- Géomorphologie : étudiée pour identifier les formations favorisant l'infiltration [10], [11].
- Pente et altitude : impactent la vitesse d'écoulement et l'accumulation d'eau [12], [13].
- Densité de drainage et linéaments : utilisée pour déterminer la connectivité et la recharge des nappes [14], [15].
- Utilisation des terres et couverture végétale : reflète l'impact anthropique sur l'infiltration ([16] ; [17]).
- Précipitations : considérées comme une source primordiale de recharge ([18] ; [8]).

II.2.2 Comparaison des résultats

Les études montrent que la combinaison SIG-AHP offre une classification efficace des zones de recharge, validée par des données de terrain. Toutefois, certaines limites persistent :

- Subjectivité des pondérations : bien que l'AHP permette une pondération structurée, il reste influencé par l'expertise des chercheurs [12].
- Disponibilité et qualité des données : un accès limité aux données sur la perméabilité et l'épaisseur des formations altérées peut affecter la précision des modèles [14], [19].
- Validation des modèles : plusieurs études déplorent le manque de vérification sur le terrain des résultats obtenus [10] ; [13].

II.3. Approche dans les zones tropicales humides et équatoriales

Contrairement aux régions arides, les zones tropicales humides présentent des défis particuliers en raison de la forte variabilité climatique et des terrains souvent instables. Plusieurs études [20], [21], [22] montrent que dans ces environnements, la profondeur de la nappe phréatique est rarement un critère pertinent en raison de sa variabilité temporelle et spatiale.

II.3.1 Spécificités des critères

Dans ces zones, la recharge dépend davantage :

- De la couverture végétale et de l'utilisation des terres ([23] ; [24]).
- De la topographie et de la pente ([25] ; [26]).
- De la densité de drainage et du type de sol ([27] ; [28]).

L'approche SIG-AHP reste efficace mais requiert des adaptations pour refléter les spécificités locales.

II.4. Cas d'étude en RDC

L'étude de Sanga et al. (2017) dans les Hauts Plateaux de l'Est de la RDC illustre l'application du SIG et de l'AHP dans un contexte équatorial. Elle met en avant les facteurs suivants :

- Topographie complexe influençant l'infiltration.
- Régime climatique avec précipitations abondantes, mais irrégulières.
- Dépendance des communautés locales aux eaux souterraines pour l'agriculture et l'approvisionnement en eau potable.

Malgré ses contributions, l'étude présente des limites, notamment l'absence de données précises sur la profondeur des nappes et des validations de terrain insuffisantes.

II.5. Conclusion

L'utilisation combinée des SIG et de l'AHP s'avère efficace pour délimiter les zones à fort potentiel en eaux souterraines. Toutefois, plusieurs défis subsistent, notamment la subjectivité des pondérations, la qualité des données disponibles et la validation des résultats. Les zones tropicales humides nécessitent une adaptation des critères d'évaluation, notamment en réduisant l'importance de la profondeur de la nappe au profit d'autres paramètres tels que la couverture végétale et la topographie.

L'étude de cas en RDC met en évidence ces spécificités et suggère la nécessité de développer des méthodes plus adaptées aux conditions locales pour améliorer la précision des prédictions et la gestion des ressources en eau souterraine.

III. MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIE

III.1. Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude est localisée dans la province du Nord Kivu, en République Démocratique du Congo (RDC), dans le Territoire de Beni. Elle est située à environ 15 kilomètres au Nord-Ouest de la Ville de Beni. Elle consiste en une délimitation rectangulaire de 35 kilomètres carrés avec sept kilomètres de longueur sur l'axe des latitudes et cinq kilomètres de largeur sur l'axe des longitudes.

Elle comprend et inclus : La localité de Ngoyo au Sud ; La localité de Mununzi au Nord ; Ainsi que toutes les différentes agglomérations situées sur l'axe Mununzi-Ngoyo ; Et une partie des agglomérations situées sur l'axe Ngoyo-Kalibo vers l'Est.

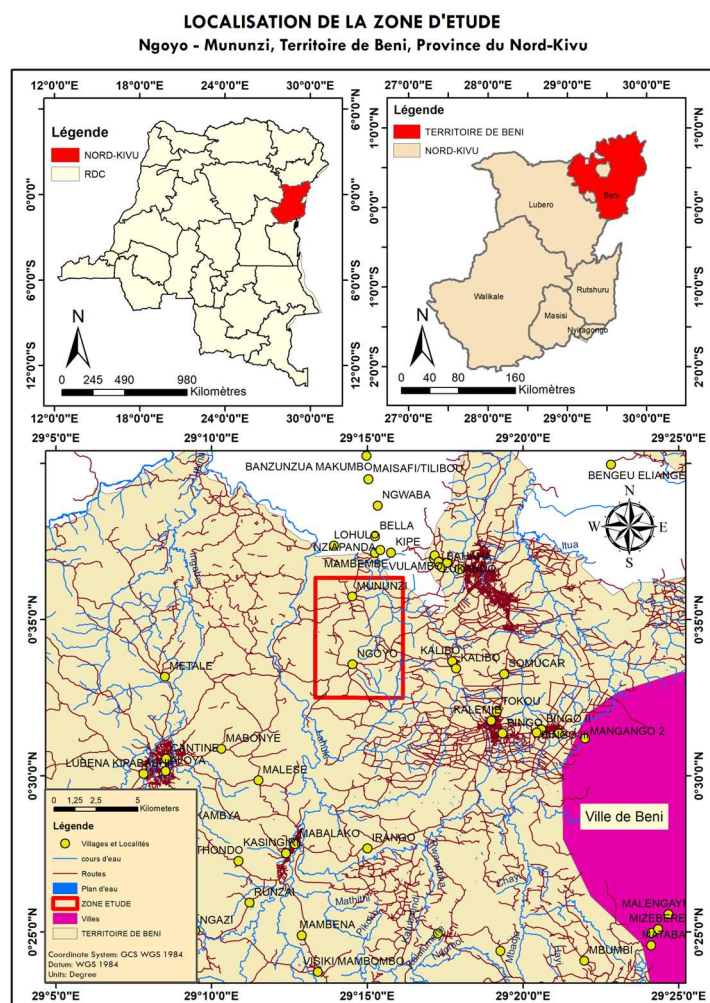


Figure 1. Localisation de la Zone d'étude

III.2. Données utilisées

L'étude repose sur plusieurs sources de données essentielles, traitées et analysées à l'aide de Google Earth Engine (GEE). Ces données couvrent divers aspects environnementaux et géotechniques et sont issues de bases de données réputées et validées scientifiquement.

a) Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Nous avons utilisé le Modèle Numérique de Terrain Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), fourni par l'USGS sous la référence USGS/SRTMGL1_003. Ce MNT, avec une résolution spatiale d'environ 30 m, permet d'extraire des paramètres topographiques comme la pente et la densité de drainage [29].

b) Occupation du sol

L'occupation du sol est issue du produit Dynamic World (GOOGLE/DYNAMICWORLD/V1), qui fournit une classification à haute résolution basée sur Sentinel-2, mise à jour en temps quasi-réel. Cet ensemble de données a été filtré sur la période allant d'octobre 2022 à septembre 2023 afin de capturer une vision globale des dynamiques d'occupation du sol durant l'année hydrologique considérée [30].

c) *Géologie*

Les données géologiques proviennent d'une carte géologique vectorielle intégrée sous forme d'une **Feature Collection** provenant de la carte Géologique de la RDC nous fournit par le Bureau d'étude DRC GREEN-EMEC. Cette base de données contient des informations sur les différentes formations lithologiques de la zone d'étude.

d) *Indice de végétation (NDVI)*

Nous avons utilisé le produit MODIS/061/MOD13Q1, qui fournit un indice de végétation normalisé (NDVI) à une résolution spatiale de 250 m et une fréquence temporelle de 16 jours. La moyenne des valeurs entre octobre 2022 et septembre 2023 a été calculée pour évaluer la couverture végétale [31].

e) *Précipitations (CHIRPS)*

Les données de pluviométrie dans ce travail sont issues de l'ensemble CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) sous la référence UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY.

Ce jeu de données fournit des estimations journalières des précipitations à une résolution de 5 km, permettant d'évaluer les tendances de la pluviosité sur la période étudiée [32].

f) *Texture des sols*

Nous avons utilisé la base OpenLandMap/SOL/SOL_TEXTURE-CLASS_USDA-TT_M/v02, qui fournit des données sur la texture des sols classifiée selon les normes de l'USDA. Ces données permettent d'évaluer la capacité de rétention en eau et le degré de compacité des sols [33].

III.3. *Traitement des données*

III.3.1 *Préparation des données dans ArcGIS*

a) *Délimitation de la Zone d'étude*

La zone d'étude est délimitée dans ArcGIS et exporté en Shapefile qui sera importé dans Google Earth Engine pour délimiter et découper les données à y utiliser.

b) *Calcul de la densité de drainage*

La densité de drainage est une mesure qui exprime la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface. Grace au MNT SRTM nous avons calculé la densité de drainage dans ArcGIS en utilisant en suivant les étapes ci-après :

ÉTAPE 1 : PRÉPARATION DES DONNÉES

1. Télécharger le MNT SRTM

- Importer le Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM dans ArcGIS.

ÉTAPE 2 : GÉNÉRATION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

2. Calcul du sens d'écoulement (Flow Direction)

- ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction.
- Utiliser le MNT corrigé (résultat de Fill) comme Input surface raster.
- Sauvegarder la sortie.

3. Calcul de l'accumulation de flux (Flow Accumulation)

- ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation.

- Entrer le raster obtenu à l'étape précédente comme Input flow direction raster.
- La sortie montre les cellules accumulant le ruissellement.

4. Extraction du réseau hydrographique

- Utiliser une condition pour extraire les rivières :
 - Raster Calculator (Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator).
- Convertir le raster binaire obtenu en vecteur (rivières) :
 - Conversion Tools > From Raster > Raster to Polyline.

ÉTAPE 3 : CALCUL DE LA DENSITE DE DRAINAGE

6. Utilisation de l'outil 'Line Density'

- ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Density > Line Density.
- Sélectionner le réseau hydrographique vectorisé comme Input polyline features.
- Définir la résolution de sortie et le rayon d'analyse selon l'échelle d'étude.
- Lancer le calcul pour obtenir la carte de densité de drainage.

ÉTAPE 4 : NORMALISATION ET EXPORTATION

7. Normalisation

- Les résultats sont normalisés sur une valeur de 0 à 100 à l'aide des minimum et maximum régionaux

8. Exportation des résultats

- La carte est exportée pour être utilisée dans Google Earth Engine.

c) Préparation de la carte géologique à importer dans GEE

Les couches géologiques présentes dans la zone d'étude sont exportées depuis le shapefile de la carte de géologie de la RDC, pour être importé plus tard dans Google Earth Engine.

III.3.2 Traitement dans Google Earth Engine

a) Collecte et prétraitement des données

Le traitement commence par charger et préparer les jeux de données spatiales nécessaires à l'analyse :

1. Modèle Numérique de Terrain (MNT) :
 - Source : SRTMGL1_003 (USGS)
 - Utilisation : Calcul de la pente, qui influence l'infiltration de l'eau.
2. Occupation du sol :
 - Source : Dynamic World (Google)
 - Utilisation : Identification des types d'occupation du sol favorables à l'infiltration.
3. Carte géologique :
 - Importée dans Google Earth Engine depuis ArcGIS
4. Densité de drainage normalisée :
 - Importé dans Google Earth Engine à partir de ArcGIS
5. Indice de Végétation (NDVI) :
 - Source : MODIS/061/MOD13Q1

- Utilisation : Estimation de la couverture végétale, qui peut influencer l'infiltration et la rétention d'eau.
- 6. Pluviométrie :
 - Source : CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data)
 - Utilisation : Calcul de la somme annuelle des précipitations, un facteur clé pour la recharge en eau souterraine.
- 7. Texture des sols :
 - Source : OpenLandMap/SOL/SOL_TEXTURE-CLASS_USDA-TT_M
 - Utilisation : Déterminer la capacité du sol à retenir ou à laisser percoler l'eau.

b) Normalisation des critères quantitatifs

Après l'acquisition des données, chaque critère est normalisé pour les ramener sur une échelle commune (0 à 100).

c) Reclassification des critères qualitatifs

Certains critères doivent être reclassifiés en fonction de leur influence sur la recharge en eau souterraine :

- Lithologie :

Différents types de roches ont des propriétés différentes de perméabilité :

- Roche imperméable → Faible score
- Roche poreuse/perméable → Score élevé

- Occupation du sol :

Les classes d'occupation sont reclassifiées en fonction de leur influence sur l'infiltration de l'eau.

Exemples :

- Forêts → Score élevé (bonne infiltration)
- Zones urbaines → Score faible (surface imperméable)

- Texture des sols :

- Sols sableux/perméables → Haute pondération
- Sols argileux → Faible pondération

d) Pondération des critères

Chaque critère est pondéré selon son importance dans l'évaluation de la recharge en eau souterraine, les pondérations utilisées sont celle trouvées en utilisant la Matrice AHP. Chaque critère normalisé est multiplié par sa pondération.

e) Calcul de la carte finale des zones favorables et Exportation des résultats

Les critères pondérés sont additionnés pour générer une carte finale des zones favorables :

- La division par 100 ramène les valeurs dans une plage cohérente.
- La carte finale est ajoutée à la carte GEE :
- Chaque critère intermédiaire est aussi affiché pour validation.
- Et toutes les cartes sont exportées pour visualisation sur ArcGIS :

III.3.3 Visualisation et Classification dans ArcGIS

La Classification des résultats en classes de potentiel faibles, modéré, élevé et très élevé est ensuite réalisée dans ArcGIS.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Calcul des pondérations

IV.1.1 Matrice de comparaison

En se basant sur les études précédentes, voici une estimation plus réaliste des comparaisons entre ces critères. Les valeurs sont ajustées pour refléter les observations scientifiques disponibles. Cette matrice est une estimation fondée sur des études de terrain et des analyses d'experts dans le domaine de l'hydrologie et des sciences de l'eau. L'explication de cette matrice a été donnée dans les généralités et cadre théorique.

Tableau 1. Matrice de Comparaison AHP utilisée

Critères	Pente	Occupation du Sol	Densité Drainage	Texture du Sol	Géologie	Pluviométrie	NDVI
Pente	1	2	2	2	3	3	4
Occupation du Sol	1/2	1	2	2	3	3	4
Densité Drainage	1/2	1/2	1	2	2	2	3
Texture du Sol	1/2	1/2	1/2	1	2	2	2
Géologie	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	2
Pluviométrie	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	2
NDVI	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1/2	1

IV.1.2 Calcul des pondérations et validation de la cohérence

a) Pondérations

Les pondérations finales obtenues à partir de la matrice AHP sont les suivantes :

Tableau 2. Pondérations utilisées dans cette étude

Critères	Poids (%)
Pente	27.6
Occupation du sol	22.6
Densité de drainage	15.9
Texture des sols	12.4
Lithologie	8.1
Pluviométrie	8.1
NDVI (végétation)	5.2

Ces pondérations reflètent l'importance relative de chaque critère en fonction des comparaisons pair-à-pair effectuées dans la matrice.

b) Validation des pondérations

La « Consistency Ratio » (CR) a été calculée pour valider la cohérence de la matrice AHP. Un CR inférieur à 0,1 indique une pondération cohérente et fiable. Le CR trouvé est de 0,02 très inférieur à 0,1 ce qui garantit de la cohérence des pondérations et des critères utilisées.

Ces critères et pondérations illustrent une approche systématique et scientifiquement rigoureuse pour identifier les zones favorables à la recharge et à l'exploitation des eaux souterraines.

IV.2. Cartes des critères utilisés

IV.2.1 Géologie

Pour évaluer la favorabilité à l'infiltration et les zones propices à l'implantation de forages, nous avons attribué des scores aux formations Granite, Kibalien, et Roches vertes, en se basant sur des études hydrogéologiques de la région.

a) Granite (Score : 20/100)

Les granites sont généralement des roches ignées compactes et peu poreuses. Cependant, leur capacité à héberger des aquifères dépend des fractures et des altérations. Les zones altérées ou fracturées dans les granites peuvent permettre une certaine infiltration et contenir des réserves d'eau, bien que leur capacité soit souvent limitée. Les granites fracturés dans la région de Lubero montrent une faible productivité en eau en raison de leur faible porosité primaire, malgré une certaine perméabilité liée aux fractures [34].

b) Kibalien (Score : 50/100)

Le Kibalien, qui regroupe principalement des schistes et des quartzites, présente une perméabilité variable. Les quartzites sont peu perméables, mais les schistes fracturés ou altérés permettent une infiltration modérée. Cette formation peut également contenir des aquifères discontinus, souvent associés à des failles et des fractures. Le bassin de Beni, des aquifères discontinus ont été identifiés dans les schistes fracturés du Kibalien, bien que leur capacité de recharge soit limitée [35].

c) Roches vertes (Score : 70/100)

Les roches vertes, composées principalement de metabasites et de métavolcanites, présentent une bonne capacité à héberger des aquifères dans les zones altérées ou faiblement métamorphisées. Ces zones offrent souvent une porosité secondaire accrue. Les fractures et altérations rendent ces formations plus favorables à l'infiltration et au stockage d'eau. Les metabasites altérées dans les roches vertes de la région de Butembo sont bien reconnus pour leur rôle dans la recharge des aquifères locaux [36].

IV.2.2 Texture des sols

La zone d'étude est principalement composée d'argile (Clay) avec une petite zone au sud constitué d'argile limoneuse (figure 2.b). La capacité d'infiltration des sols dépend de leur texture, et il existe des liens directs entre la composition du sol et la vitesse d'infiltration. Pour attribuer des poids à notre modèle multicritère, nous avons tenu compte du fait que les sols argileux (Cl) ont un poids faible pour l'infiltration (30%), car ils sont moins propices à l'infiltration rapide de l'eau. Les sols argileux-limoneux (ClLo) auraient un poids modéré (50%) pour l'infiltration, étant donné que la présence de limon améliore la structure du sol et permet une meilleure infiltration que l'argile pure.

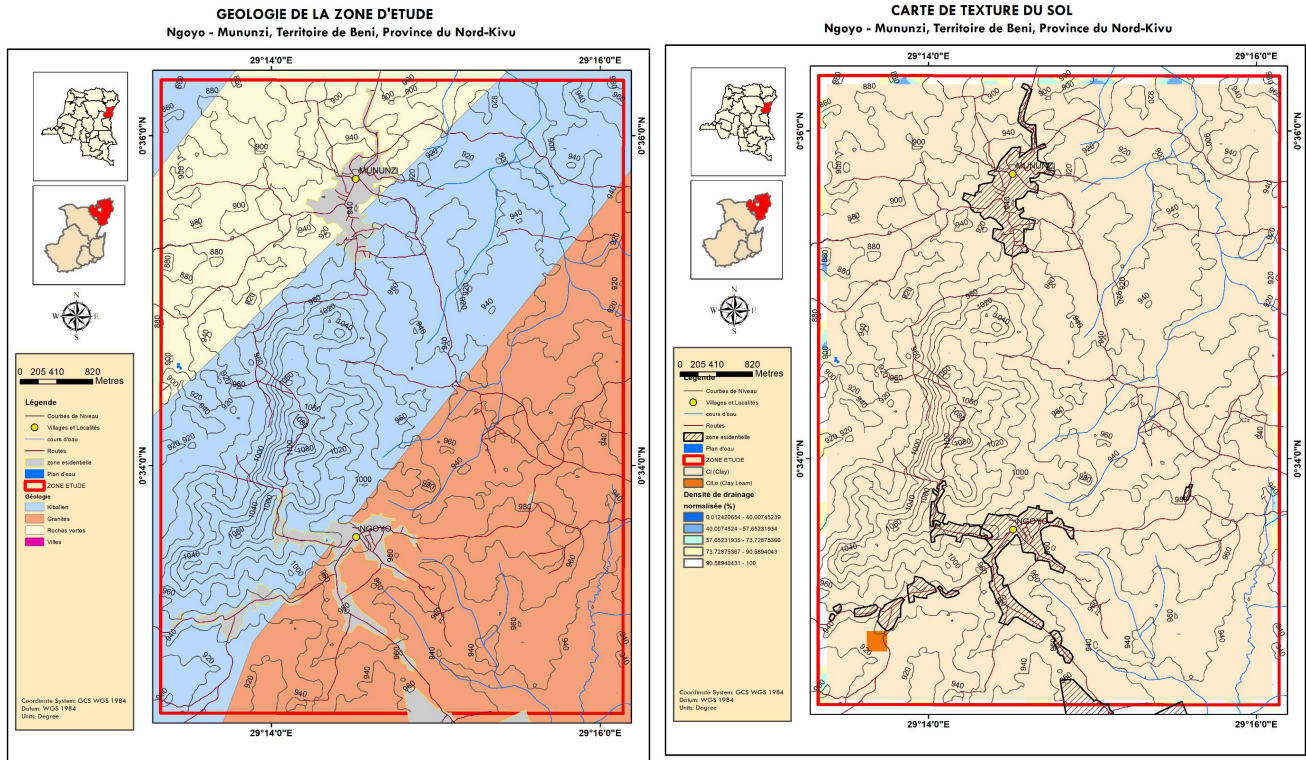


Figure 2. Carte Géologique (2.a) et de texture du sol (2.b) de la Zone d'étude

IV.2.3 Topographie

La topographie de cette région est caractérisée par des collines et des montagnes au sud-ouest avec un axe orienté Sud-Ouest - Nord-Ouest. Au Nord Est et Nord-Ouest se situe les lieux les moins élevées en altitude.

Le point le plus élevé dans la zone se situe à 1105 mètres d'altitude et le plus bas à 856 mètres d'altitudes. La médiane des altitudes dans la Zone est de 941.8 mètres.

Deux coupes topographiques A-B et C-D, respectivement orientées ouest vers sud-est et sud-ouest vers nord-est montrent des profils représentés dans la figure 3.d. Ces coupes ont été réalisées grâce au logiciel Surfer.

La pente varie de 0 à 32 degré dans la région avec une médiane de 5,8 degré. La répartition de la pente est donnée dans la carte de la figure 3.b.

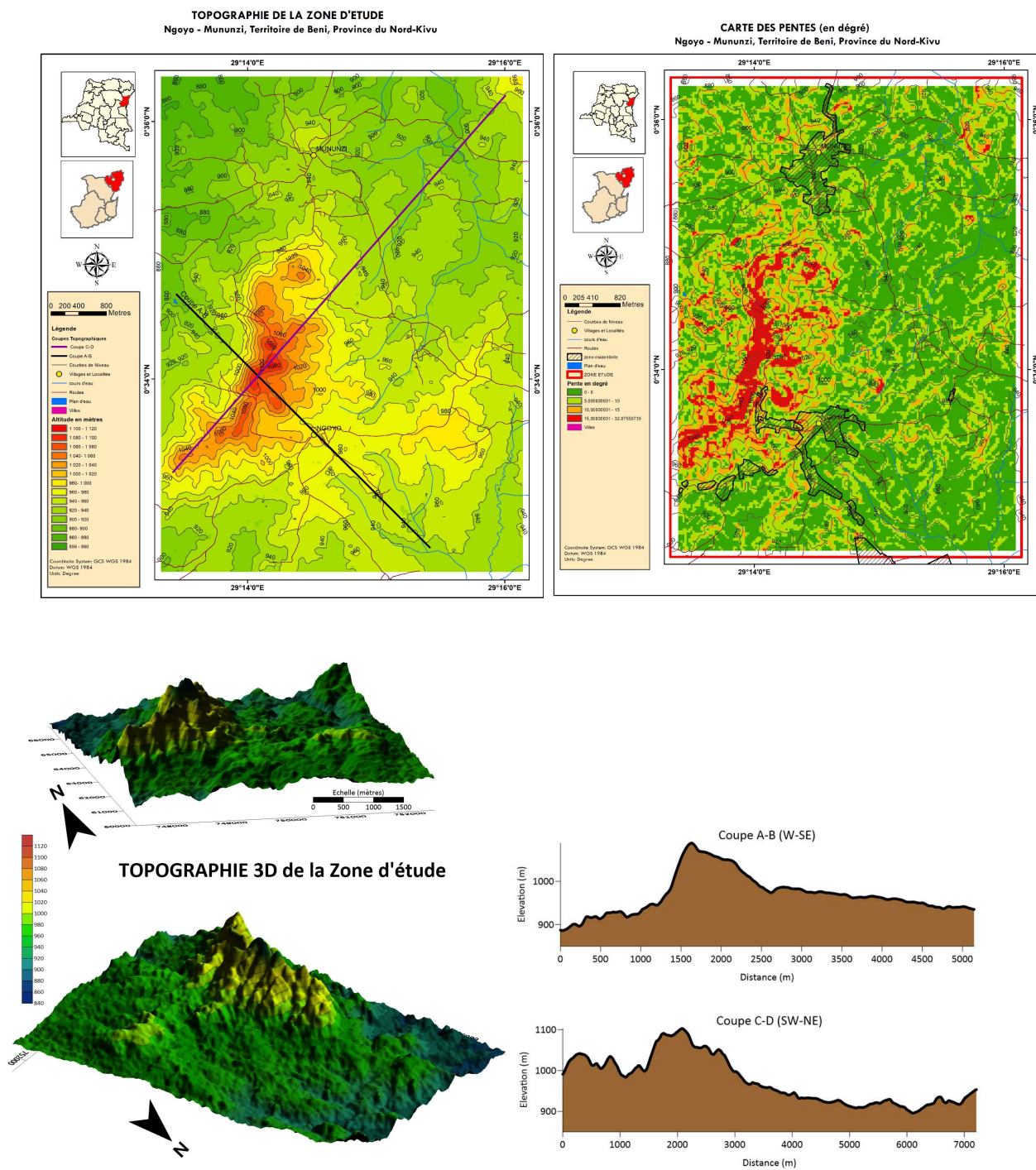


Figure 3. Topographie de la Zone d'étude : 3.a : carte topographique ; 3.b : Carte des pentes ; 3.c : Topographie 3D ; 3.d : Coupes topographiques

IV.2.4 Autres critères

L'occupation du sol, la densité de drainage, la pluviométrie et la végétation sont présentés dans la figure 4 ci dessous.

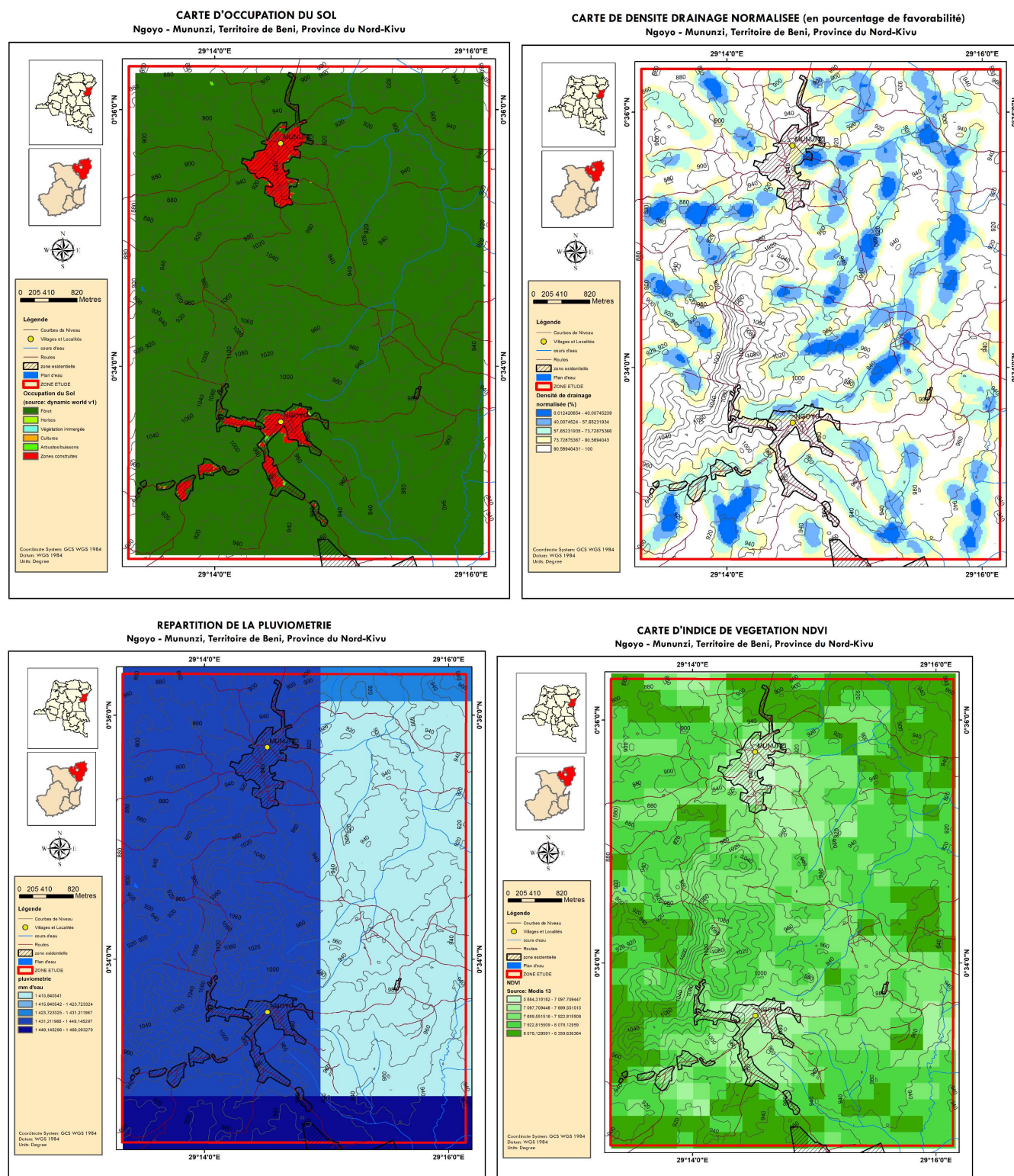


Figure 4. Cartes des autres critères. 4.a : Occupation du Sol ; 4.b : Densité de drainage ; 4.c : Précipitations (CHIRPS) ; 4.d : Indice de végétation (NDVI)

IV.3. Résultats de l'analyse multicritère

IV.3.1 Présentation de la carte des zones favorables

L'AHP a été réalisé en intégrant les sept critères pour générer des zones de favorabilité à l'implantation des forages d'eau dans la région de Ngoyo-Mununzi. Le résultat final est classé en cinq (5) zones selon la méthode des ruptures naturelles (Natural break) (Jenks) dans ArcGIS : très faible, faible, modéré, bon, excellent.

Le pourcentage de favorabilité varie de 37,49% à 79,86% dans la zone d'étude. Les valeurs de rupture obtenue avec la méthode des ruptures naturelles sont 45,97% ; 55,77% ; 60,92 % et 65,90%. Les classes de favorabilité sont donc :

- **Très faible** : 37,49% - 45,97%
- **Faible** : 45,97% - 55,77%
- **Moyenne** : 55,77% - 60,92%
- **Bonne** : 60,92% - 65,90%
- **Excellente** : 65,90% - 79,86%

La carte de favorabilité à l'implantation de forage d'eau (Fig. 5) montre un potentiel en eaux souterraines important étant donné que les zones de favorabilité bonne à excellente couvrent la majorité de la zone d'étude. Les zones les plus propices à l'implantation des forages d'eau dans la zone d'étude sont principalement situées au sud et au nord-ouest.

Les zones les moins favorables en termes de potentiel en eaux souterraines sont concentrées du centre ouest à l'est.

IV.3.2 Analyse de la fiabilité des résultats

Les résultats obtenus à partir de l'approche combinant télédétection et analyse multicritère révèlent que certaines zones de la région étudiée présentent un potentiel élevé pour l'implantation de forages. Les facteurs hydrogéologiques intégrés dans le modèle, notamment la pente, l'occupation du sol, la densité de drainage, la géologie, la texture du sol, la pluviométrie et la couverture végétale ont contribué à une cartographie détaillée des zones favorables.

L'utilisation du Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM a permis de dériver des paramètres clés tels que la pente et la densité de drainage. Ces paramètres sont essentiels pour estimer la probabilité de recharge des nappes et la faisabilité des forages. Une pente modérée à faible est généralement favorable à l'infiltration et limite le ruissellement excessif, ce qui favorise la recharge des nappes phréatiques. Dans les résultats obtenus, les zones les plus favorables correspondent justement à ces conditions, validant ainsi la pertinence du modèle.

L'indice de densité de drainage, dérivé du réseau hydrographique, a également joué un rôle important dans la sélection des sites. Une densité de drainage modérée indique une recharge potentiellement favorable des nappes par infiltration. Dans les zones où cette densité est très faible, le potentiel hydrogéologique est réduit, car l'infiltration est limitée par des formations géologiques peu perméables.

IV.3.3 Comparaison avec d'autres approches et études similaires

L'analyse comparative avec d'autres études menées en RDC et en Afrique subsaharienne sur l'identification des sites propices aux forages montre des similitudes dans les facteurs déterminants. Plusieurs études, citées dans notre revue de littérature, ont également démontré que la pente, l'occupation du sol et la densité de drainage sont des variables clés pour l'identification des sites favorables aux forages d'eau souterraine.

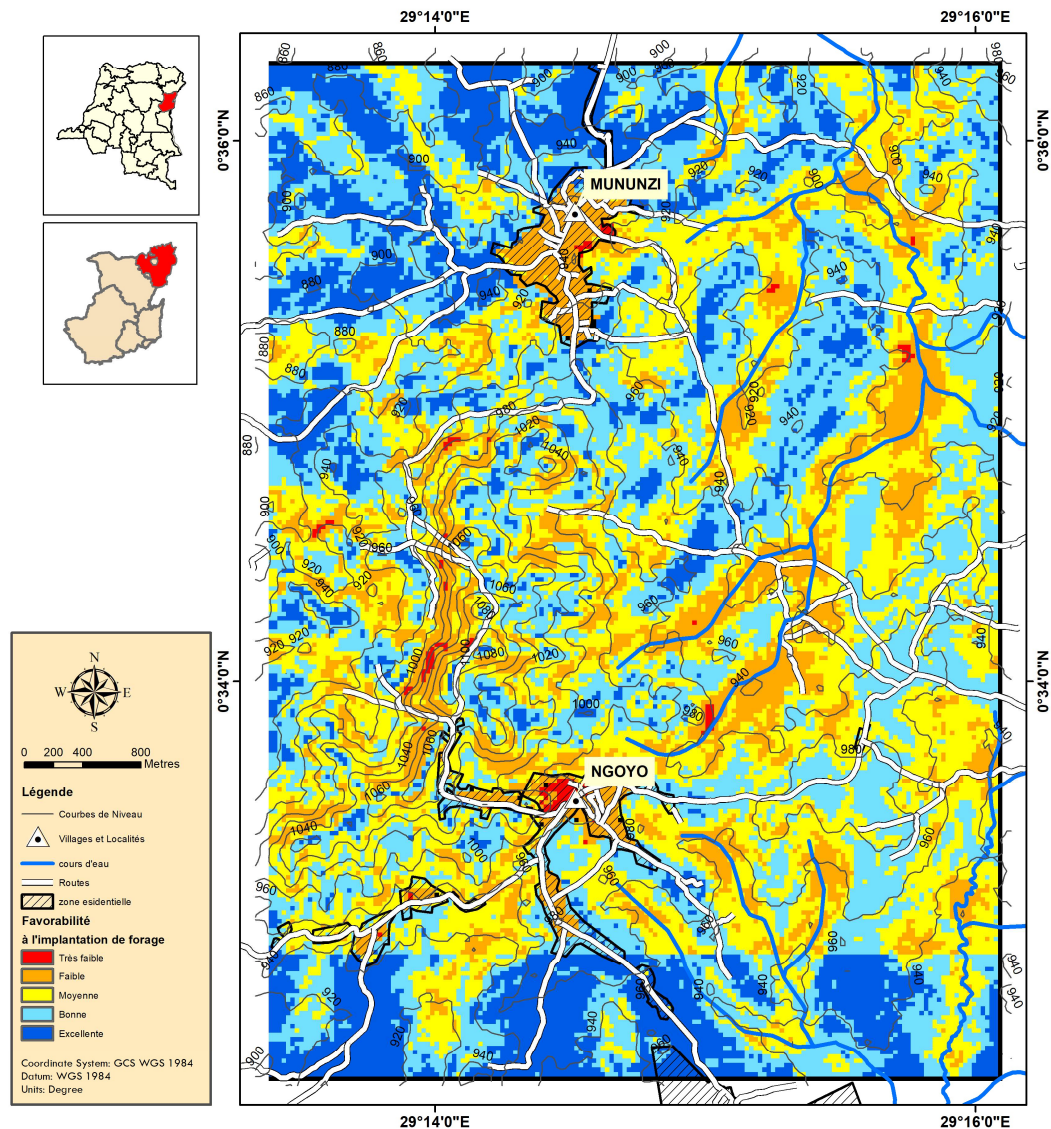


Figure 5. Carte des zones propices à l'implantation des forages

V. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

V.1. Synthèse des résultats obtenus

Dans le cadre de cette étude, l'utilisation combinée de la télédétection et de l'analyse multicritère a permis de réaliser une identification préliminaire des sites les plus propices à la mise en place de forages d'eau potable dans la région de Ngoyo - Mununzi, au Nord-Kivu, en République Démocratique du Congo. À travers l'exploitation de différents critères géospatiaux : la pente, l'occupation du sol, la densité de drainage, la géologie, la texture du sol, la pluviométrie et la couverture végétale, plusieurs conclusions majeures ont pu être tirées.

Premièrement, la pente a montré une influence déterminante sur la distribution des ressources en eau, les zones de faible pente étant généralement les plus adaptées pour l'installation de forages, en raison de leur meilleure capacité de collecte d'eau. L'analyse de l'occupation du sol a mis en évidence que les zones agricoles et les zones boisées sont des secteurs privilégiés pour l'implantation

de forages, ces espaces étant moins susceptibles d'être impactés par des activités industrielles ou urbaines à forte consommation d'eau.

Quant à la densité de drainage, Une densité de drainage modérée indique une recharge potentiellement favorable des nappes par infiltration. Dans les zones où cette densité est très faible, le potentiel hydrogéologique est réduit, car l'infiltration est limitée par des formations géologiques peu perméables. La géologie, quant à elle, a montré que les terrains constitués de formations géologiques perméables, sont les plus propices à l'infiltration et à la rétention d'eau. La texture du sol, qui fait référence à la proportion de sable, limon et argile, a également été un critère crucial, les sols argileux étant moins aptes à permettre une infiltration rapide de l'eau.

L'analyse de la pluviométrie a permis de constater que la variation des précipitations est négligeable dans la région. Enfin, la couverture végétale a permis de déterminer les zones les moins exposées aux risques d'évaporation excessive, facilitant ainsi la conservation des ressources en eau souterraine.

L'intégration de ces critères à l'aide de la télédétection a facilité l'élaboration d'un modèle de prédiction des zones les plus favorables à l'implantation de forages. Cette approche multicritère a non seulement permis d'optimiser le choix des sites, mais a également amélioré la précision des décisions en matière de gestion des ressources en eau, en tenant compte des spécificités environnementales de la région de Ngoyo - Mununzi.

V.2. Recommandations pour la mise en place de forages

Sur la base des résultats obtenus, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour la mise en place de forages d'eau potable dans la région de Ngoyo - Mununzi.

V.2.1 Zones prioritaires pour l'installation de forages

Les sites les plus appropriés pour l'implantation de forages se trouvent principalement dans les zones présentant une faible pente, une densité de drainage modérée et une géologie favorable. Ces zones devraient être prioritaires pour les études de faisabilité approfondies, en raison de leur potentiel de recharge rapide et de durabilité des nappes phréatiques. De plus, les zones agricoles et les zones boisées à forte pluviométrie sont également des candidats idéaux, car elles bénéficient d'une recharge continue en eau grâce aux précipitations.

V.2.2 Stratégies d'optimisation de la gestion des ressources en eau

Afin de garantir la durabilité et l'efficacité des forages, il est recommandé de suivre une approche intégrée de gestion des ressources en eau. Cela inclut l'élaboration d'un plan de gestion de l'eau qui tienne compte de la variabilité saisonnière de la pluviométrie et des besoins en eau des communautés locales. Des efforts doivent être déployés pour encourager la conservation de l'eau dans les zones où la végétation est dense, afin de réduire les risques d'évaporation et d'optimiser la recharge des nappes phréatiques.

En outre, une surveillance continue des sites de forage doit être mise en place pour évaluer la stabilité des nappes phréatiques et ajuster les stratégies de gestion en fonction des fluctuations de la demande en eau. Des mesures de protection des zones critiques, telles que des forages protégés par des périmètres de sécurité autour des sources, doivent être considérées afin de limiter les risques de contamination.

Enfin, pour renforcer la durabilité du système, il est recommandé de favoriser des techniques de forage et de pompage adaptées aux spécificités locales, en mettant l'accent sur l'utilisation de technologies peu coûteuses et faciles à entretenir pour les populations rurales. Une formation des communautés locales à l'entretien des infrastructures d'eau potable et à la gestion des ressources en eau serait également bénéfique pour assurer la pérennité des forages.

V.3. Limites et contraintes de l'étude

Bien que la méthodologie adoptée ait permis une cartographie pertinente des sites potentiels, certaines limites doivent être soulignées :

- Résolution des données : L'utilisation du MNT SRTM (30 m de résolution), bien que courante en hydrogéologie, peut introduire des incertitudes dans la détection fine des variations topographiques locales. Une résolution plus fine, issue de levés LiDAR ou de drones, pourrait améliorer la précision des résultats.
- Données hydrogéologiques locales : Le modèle n'intègre pas directement des données précises sur la conductivité hydraulique des formations géologiques locales ni sur les débits réels des nappes. L'intégration de données issues de campagnes de forages et de tests de pompage améliorerait la fiabilité de la sélection des sites.
- Facteurs anthropiques : L'occupation du sol et l'exploitation des ressources en eau par les populations locales peuvent influencer la recharge et la qualité de l'eau souterraine. Une analyse socio-économique approfondie pourrait enrichir l'approche en intégrant des considérations liées à l'accessibilité et à la durabilité des forages.

VI. CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était d'identifier préliminairement les sites propices à la mise en place de forages d'eau potable dans la région de Ngoyo - Mununzi, au Nord-Kivu, en République Démocratique du Congo, en utilisant une approche basée sur la télédétection et l'analyse multicritère. L'application de critères géospatiaux tels que la pente, l'occupation du sol, la densité de drainage, la géologie, la texture du sol, la pluviométrie et la couverture végétale a permis d'élaborer un modèle intégré facilitant l'identification des zones les plus adaptées à l'exploitation des ressources en eau souterraine.

Les résultats ont montré que les zones présentant une faible pente, une géologie favorable (formées de roches perméables), une densité de drainage modérée, ainsi qu'une couverture végétale modérée sont les plus propices à l'installation de forages d'eau potable. Ces résultats soulignent l'efficacité de la télédétection et de l'analyse multicritère dans la gestion des ressources en eau, en permettant une évaluation précise et rapide des zones les plus adaptées à l'implantation d'infrastructures hydrauliques.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Bureau d'Etude « DRC GREEN Engineering and Mining Environment Consulting (DRC GREEN-EMEC) » pour la possibilité qu'elle nous a offerte à travers son département de SIG et Télédétection de réaliser toutes les recherches ayant trait à ce travail.

Ce travail s'appuie sur les recherches menées dans le cadre d'un mémoire intitulé « *Utilisation de la Télédétection et de l'Analyse Multicritère pour l'Identification Préliminaire des Sites Propices à la Mise en Place de Forages d'Eau Potable en Zone Rurale : Cas d'étude de la Région Ngoyo-Mununzi au Nord-Kivu, RDC* » par KAYOMBO RETH Nathan et ATWABI BYAMUNGU Patrick, dirigé et codirigé respectivement par PALUKU LUKUMBI Michael et MUHINDO BAHAVIRA Johnny. Ce mémoire a été défendu publiquement à l'Institut National du Bâtiment et des Travaux Publics (INBTP) en Janvier 2025.

REFERENCES

- [1] Mukendi, T., Kalonji, B., & Mayimbo, K. (2018). Access to drinking water and sanitation in rural Congo: Challenges and perspectives. *Journal of African Development Studies*, 10(1), 24-35.
- [2] Gaye, C. B., & Tindimugaya, C. (2019). Sustainable groundwater management in Africa: Role of science and technology. *Groundwater*, 57(2), 158-166.
- [3] Tessema, A. A., Tilahun, S. A., & Guzman, C. D. (2020). "GIS-based groundwater potential assessment using the Analytical Hierarchy Process (AHP) approach in the Upper Blue Nile basin, Ethiopia." *Hydrological Processes*, 34(2), 377-395.
- [4] MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Dochartaigh, B. É. Ó., & Taylor, R. G. (2012). Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environmental Research Letters*, 7(2), 024009.
- [5] Rahmati, O., Melesse, A. M., & Samani, A. N. (2016). "Assessing groundwater recharge potential using GIS-based multi-criteria decision analysis approach in Iran." *Geocarto International*, 31(1), 79-97.

- [6] Díaz-Alcaide, S., & Martínez-Santos, P. (2019). Mapping groundwater potential in data-scarce environments using remote sensing and GIS: A case study in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 64(4), 456-472.
- [7] Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98.
- [8] Machiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2011). "Assessment of groundwater potential in a semi-arid region of India using remote sensing, GIS and MCDM techniques." *Water Resources Management*, 25(5), 1359-1386.
- [9] Kumar, S., Ahmed, S., & Krishnamurthy, N. S. (2014). Delineation of groundwater potential zones in a hard rock terrain of South India using GIS and Analytical Hierarchy Process. *Journal of Earth System Science*, 123(4), 715-728.
- [10] Shekhar, S., & Pandey, A. C. (2014). Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain of India using remote sensing, geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques. *Geocarto International*, 29(8), 906-921. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.894584>
- [11] Jha, M. K., Chowdary, V. M., & Chowdhury, A. (2010). Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. *Hydrogeology Journal*, 18(7), 1713-1728.
- [12] Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., & Dixon, B. (2015). GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4186-6>
- [13] Oh, H. J., Kim, Y. S., Choi, J. K., Park, E., & Lee, S. (2011). GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, 399(3-4), 158-172.
- [14] Rahmati, O., Melesse, A. M., & Varouchakis, E. A. (2019). GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: A Case Study from the Dembecha Area, Ethiopia. *Scientific Reports*, 9, 19476. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>
- [15] Magesh, N. S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 189-196. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.10.007>
- [16] Faye, C., Solly, B., Dièye, S., & Fall, A. (2021). Évaluation des zones potentielles d'eaux souterraines avec l'utilisation des SIG et de la télédétection : Cas du sous-bassin de la Sandougou. *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences*, 4(1), 54-67. <https://doi.org/10.48346/IMIST.PRSM/ajlp-gs.v4.i1.20827>
- [17] Pinto, D., Shrestha, S., Babel, M. S., & Ninsawat, S. (2015). Delineation of groundwater potential zones in the Comoro watershed, Timor Leste using GIS, remote sensing and analytic hierarchy process (AHP) technique. *Applied Water Science*, 7(2), 503-519. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0270-6>
- [18] Saha, S., Agrawal, A., & Gautam, S. K. (2012). GIS-based multicriteria decision analysis for groundwater potential zoning in a hard rock terrain of Madhya Pradesh, India. *Environmental Earth Sciences*, 67(4), 1077-1089.
- [19] Mendez, A. A., Perez, R. S., & Orellana, A. P. (2022). Delineation of groundwater potential zones using GIS and Analytic Hierarchy Process (AHP): Case study of the Napo River Basin, Ecuador. *Environmental Earth Sciences*, 81(4), 1257. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10311-2>
- [20] Santos, J. P., Costa, C. A., & Oliveira, T. A. (2021). Delineation of groundwater potential zones using GIS and AHP: Case study in the Amazon Basin, Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 66(12), 1940-1957. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1963430>

- [21] Kouadio, A. A., Yao, G. L., & N'Guessan, K. L. (2020). Groundwater potential mapping in a humid tropical region using GIS and AHP: A case study in the San Pedro Basin, Ivory Coast. *Environmental Earth Sciences*, 79(6), 182. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08655-2>
- [22] Diallo, M. A., Camara, D. O., & Sow, S. (2022). Groundwater potential mapping using GIS and AHP in the Guinean Highlands: A case study of the Kankan Region, Guinea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-9856-3>
- [23] Akinsanmi, S. A., Oguntimehin, I. O., & Oyeade, A. (2020). Groundwater potential zone mapping using GIS and AHP in the humid tropical region of Nigeria: A case study of the Ondo State. *Environmental Earth Sciences*, 79(4), 123. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08647-2>
- [24] Sampath, K. M., Ramachandra, T. V., & Anuradha, M. (2021). Groundwater potential zone mapping in tropical humid regions using GIS and AHP: A case study of the Western Ghats, India. *Journal of Environmental Management*, 287, 112258. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112258>
- [25] Nguyen, T. H., Tran, D. V., & Pham, K. T. (2024). Groundwater potential zones delineation using GIS and AHP: A case study in the Mekong Delta, Vietnam. *Water Resources Management*, 38(1), 229-244. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03382-y>
- [26] Ariyo, O. S., Olorunfemi, S. O., & Afolabi, J. O. (2019). Groundwater potential zones delineation using GIS and AHP: A case study of the humid tropical region of southwestern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, 27(2), 561–577. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01957-4>
- [27] Chidiebele, A. A., Olatunji, O. I., & Olayanju, M. T. (2019). Delineation of groundwater potential zones using GIS and AHP: Case study of the tropical humid zone in southwestern Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 78(7), 222.
- [28] Hassan, M. M., Alhaji, B. I., & Adeyemi, A. A. (2020). Groundwater potential mapping using GIS and AHP for tropical humid regions: Case study of Kwara State, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 219. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8129-4>
- [29] Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- [30] Brown, C., Xie, Z., & Kumar, P. (2022). Dynamic World: Near Real-Time Land Cover Classification from Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112750. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112750>
- [31] Huete, A., Didan, K., Miura, T., et al. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- [32] Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- [33] Hengl, T., de Jesus, J. M., Heuvelink, G. B., et al. (2017). SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning. *PLoS ONE*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- [34] Kavyavu Kambale (2017). Étude hydrogéologique du bassin versant topographique de la rivière Kimemi et son impact environnemental sur Butembo. Consulté sur Memoire Online.
- [35] Kakule Kasereka (2015). Hydrogéologie de la région de Beni : caractérisation des aquifères et gestion des ressources en eau. Publication interne, Université de Kisangani.
- [36] Mukulumanya L., Kambale C., et al. (2018). Potentialité des aquifères dans les métavolcanites et metabasaltes du Nord-Kivu. *Journal Africain des Sciences Hydrologiques*, 12(3), 45-56.