IDENTIFICATION DES ZONES POTENTIELLES POUR UNE RECHARGE DURABLE DES NAPPES PHREATIQUES SOUS L'INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE AU NORD-EST DU LAC TCHAD, AU TCHAD

IDENTIFICATION OF POTENTIAL AREAS FOR SUSTAINABLE GROUNDWATER RECHARGE UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE IN THE NORTH-EAST OF LAKE CHAD, CHAD.

1- DINGAMADJI Mardochée, Institut National de l'Eau, Université d'Abomey- Calavi, République du Benin, Tel : (+229)0156055538, dingamadjimardoche35206@gmail.com.
2- Julien G. ADOUNKPE, Laboratoire d'Ecologie Appliquée, Université d'Abomey Calavi, 01BP526.Tel : (+229)0195963541, julvictoire@yahoo.com
3- ABDERAMANE Hamit, Université de N'Djamena, République du Tchad, Tel : (+235) 66 23 93 22, abderamanehamit@gmail.com
4- MAHAMAT NOUR Abdallah, Laboratoire d'Hydro-Géosciences et Réservoirs, Université de N'Djamena, Tel : +235 99 16 67 53, mnourabdallah@gmail.com

RESUME

Les ressources en eau souterraine de la bordure nord-est du lac Tchad font face à des pressions croissantes en raison des changements climatiques et de la croissance démographique. La présente étude vise à déterminer les zones potentielles de recharge durable des eaux souterraines de la bordure nord-est du lac Tchad. La méthode de l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP), la Méthode d'Influence Multiple (MIF) ainsi que les approches des systèmes d'information géographique (SIG) ont été utilisées pour faciliter l'analyse des divers facteurs impactant le potentiel de recharge des eaux souterraines dans la zone d'étude. Les cartes des zones potentielles de recharge des eaux souterraines ont été modélisées en attribuant des poids à six paramètres incluant les précipitations, la géologie, la pente, la texture du sol, la densité de drainage et l'occupation du sol, en fonction de leur impact sur la disponibilité des eaux souterraines. Pour les cartes des zones potentielles de recharge des eaux souterraines futures, les scénarios optimistes et pessimistes RCP4.5 et RCP8.5, respectivement, ont été utilisés. Les résultats des deux méthodes ont révélé cinq zones potentielles de recharge des eaux souterraines : très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée. Le sud et le sud-ouest, caractérisés par une pluviométrie élevée et une pente douce, présentent un potentiel de recharge des eaux souterraines élevé. Les résultats de la validation révèlent que les valeurs de validation du modèle AHP pour la période historique correspondent à celles de l'AUC de la courbe ROC estimées à 0,68, tandis qu'elles sont de 0,74 et 0,64 respectivement, en fonction des cartes du potentiel de recharge des eaux souterraines obtenues sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Dans le cadre de la méthode MIF, l'analyse du diagramme ROC a mis en évidence une valeur de l'AUC estimée à 0,62 pour la période de référence. Pour la période future, les graphiques de l'AUC ont montré des valeurs de 0,72 et 0,68 respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. En identifiant les zones favorables à la recharge durable des aquifères dans le contexte du changement climatique, la présente étude contribuerait de manière significative à l'élaboration de stratégies de gestion des eaux souterraines efficaces et durables dans la zone d'étude.

Mots clés : Potentiel de recharge des eaux souterraines ; changement climatique ; AHP ; MIF ; Nord-est du lac Tchad

ABSTRACT
Groundwater resources on the north-eastern shore of Lake Chad are facing increasing pressure due to climate change and population growth. This study aims to identify potential areas for sustainable groundwater recharge on the north-eastern shore of Lake Chad. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method, the Multiple Influence Method (MIF), and the Geographic Information System (GIS) approach were used to facilitate the analysis of the various factors impacting groundwater potential in the study area. Maps of potential groundwater areas were modelled by assigning weights to six parameters based on their impact on groundwater availability: rainfall, geology, slope, soil texture, drainage density, and land use. For the maps of potential future groundwater areas, the optimistic and pessimistic scenarios, RCP4.5 and RCP8.5, respectively, were used. The results of the two methods revealed five potential groundwater areas: very low, low, medium, high, and very high. The southwest and south, which are characterized by high rainfall and gentle slopes, have high groundwater potential. The validation results reveal that the validation values of the AHP model for the historical period correspond to those of the AUC of the ROC curve estimated at 0.68, while they are 0.74 and 0.64, respectively, based on the groundwater potential maps obtained under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Using the MIF method, the ROC diagram analysis showed an estimated AUC value of 0.62 for the reference period. For the future period, the AUC values were 0.72 and 0.68 for the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively. By identifying areas favourable to sustainable aquifer recharge in the context of climate change, this study would significantly contribute to the development of effective and sustainable groundwater management strategies in the study area.
Keywords: Groundwater recharge potential; climate change; AHP; MIF; North-East Lake Chad

INTRODUCTION

Les eaux souterraines revêtent une importance cruciale pour les habitants et les écosystèmes, notamment dans les régions semi-arides et arides caractérisées par des précipitations variables (Taylor et *al*., 2013). Dans le bassin sédimentaire du lac Tchad et en particulier au Tchad, les eaux souterraines constituent la principale source d'eau exploitée pour des besoins domestiques, agricoles et industriels (World Bank, 2020 ; Mahamat Nour et *al*., 2022). Cependant, ces ressources pourraient être menacées à l'avenir en raison de la croissance démographique et du changement climatique. Swain et *al*. (2022) ont indiqué que les ressources en eaux souterraines sont soumises à un stress extrême en raison des besoins croissants pour répondre à la consommation humaine. En outre, des cas d'ouvrages hydrauliques (forages et puits pastoraux) infructueux et à faible rendement sont fréquemment enregistrés dans la zone d'étude. L'échec de ces ouvrages hydrauliques pourrait être imputé à des études inadéquates des ressources en eau souterraine. Dans ce contexte, il serait crucial de réaliser la cartographie des zones présentant un potentiel de recharge durable des eaux souterraines, sous l'effet du changement climatique, afin d'informer efficacement les responsables de la gestion de l'eau sur la disponibilité future en eau dans la zone d'étude. Aucune recherche similaire n'a été menée dans la zone d'étude. Selon Zenande et *al*. (2024), la détermination des zones potentielles d'eau souterraine est essentielle pour améliorer la durabilité à long terme des projets liés à l'eau, minimiser le risque de pénurie d'eau, ainsi que le coût des ouvrages hydrauliques. La méthode d'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) et la méthode d'Influence Multiple

(MIF), reconnues pour leur efficacité par plusieurs chercheurs (Hussein et *al*., 2017; Jiménez & Soberón, 2020 ; Kassa et *al*., 2024), ont été utilisées pour identifier les zones potentielles d'eaux souterraines de la zone d'étude sous l'influence du changement climatique. L'objectif de cette étude est d'identifier les zones potentielles de recharge durable des eaux souterraines dans la zone d'étude en utilisant une méthode intégrée SIG, AHP et MIF sous l'influence du changement climatique. Les résultats issus de cette étude seront utiles pour créer un plan à long terme pour la gestion des eaux souterraines dans la zone d'étude.

2-METHODOLOGIE

2.1-Description de la zone d'étude

La zone d'étude est située dans la Province du Lac, à l'ouest du Tchad, le long de la bordure nord-est du lac Tchad. Elle s'étend approximativement entre 12° et 14° de latitude Nord et entre 13° et 16° de longitude Est, couvrant une superficie d'environ 12187 km² (Fig. 1). Le climat y est de type semi-aride à aride, caractérisé par deux saisons bien distinctes : une saison sèche couvrant environ 7 mois, d'octobre à avril, et une saison des pluies de 5 mois, de mai à septembre.

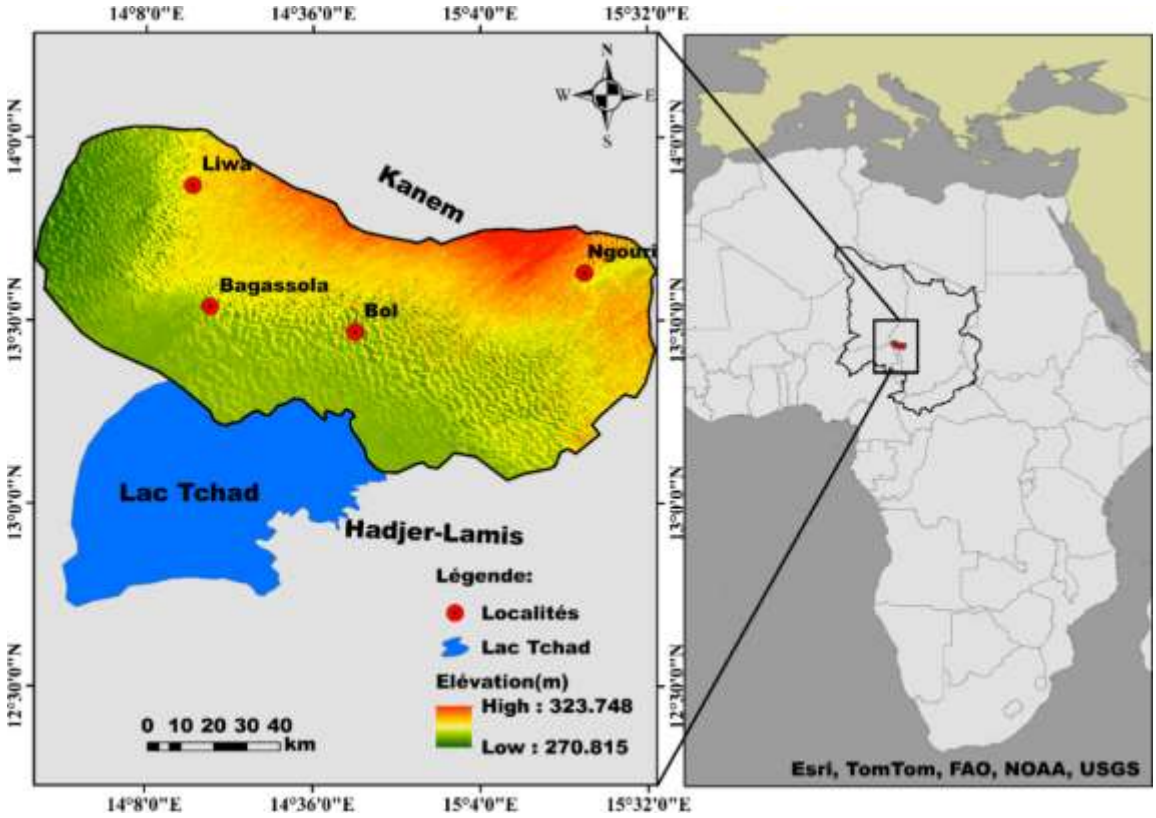


Figure 1 : Cadre géographique de la zone d'étude

2.2-Acquisition de données et traitement

Plusieurs types de données des facteurs influençant le potentiel de recharge des eaux souterraines ont été collectés à partir de sources variées (Tableau I). Parmi ces

paramètres figurent les caractéristiques topographiques telles que la pente et la densité de drainage, les données climatiques notamment les précipitations projetées, ainsi que les propriétés géologiques du sous-sol. La sélection de ces données repose sur une revue de la littérature existante concernant les paramètres qui influencent le potentiel de recharge des eaux souterraines (Adesola et *al*., 2023; Mouhoumed et *al*., 2024; Opoku et *al*., 2024) ainsi que sur les observations locales de la zone d'étude.

Tableau I : Données géospatiales utilisées et leur source

Nom	**Résolution**	**Données extraites**	**Sources**
Expérience de réduction d'échelle	0,5km* 0,5km	Précipitations future de (RCP4.5 et RCP8.5)	CORDEX-Africa *https://www.csag.uct.ac.za/cordex-africa/*
MNT	10m * 10 m	Pente	United States of Geological Survey (USGS)*https://earthexplorer.usgs.gov/*
Carte de sol		Texture du sol	FAO *https://www.fao.org/soils-portal/en/*
Densité de drainage		Carte de densité de drainage	https://global-surface-water.appspot.com/
Géologie		Carte géologique	Office de la recherche scientifique et technique Outre-mere
Landstat5-9	10m * 10m	Carte d'occupation du sol	United States of Geological Survey (USGS) *https://earthexplorer.usgs.gov/*
Profondeur des eaux souterraines		Validation	Mission de terrain

2.3-Classification des facteurs

Les plages de classification des couches thématiques telles que la pluviométrie, la densité de drainage et la pente ont été déterminées en utilisant la méthode de classification quantile dans le logiciel ArcGIS 10.8, largement utilisée par les auteurs dans le cadre de la classification des couches (Panahi et *al*., 2020). Chaque classe a reçu un rang de 1 à 5 (très faible, faible, moyen, élevé et très élevé) en fonction de sa capacité à contrôler l'infiltration et l'accumulation des eaux souterraines dans la zone d'étude, comme le montre le tableau II.

2.4-Analyse hiérarchique des processus (AHP)

2.4.1-Création d'une matrice de comparaison par paires

La matrice de comparaison par paires (Tableau III) permet d'évaluer l'importance relative d'un paramètre par rapport à un autre en ce qui concerne la recharge (Zghibi et *al*., 2020). La méthode de comparaison par paires est utilisée par les experts pour évaluer la pertinence des critères au sein d'une structure hiérarchique définie dans un problème de prise de décision (März, 2018). Dans cette méthode, un facteur est évalué par rapport à son propre score, lequel est de 1 (Hossain et *al*., 2024). L'échelle comparative de Saaty allant de 1 à 9 (Tableau IV) a été appliquée pour évaluer les composantes des critères en comparant leur importance relative du plus important au moins important (Equation 1).

$$H = \begin{bmatrix} V_{20} & V_{41} & V_{1n} \\ V_{02} & V_{51} & V_{2n} \\ V_{n1} & V_{n2} & V_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Où H fait référence à la matrice de comparaison par paire, tandis que V_{nn} est utilisé pour exprimer l'importance relative d'un facteur par rapport à un autre en ce qui concerne la présence des eaux souterraines (Zenande et *al*., 2024).

Tableau II : Rang attribué à chaque facteur et leurs classes

Facteurs	Sous-classe	Rang	Potentiel pour eaux souterraines
Précipitation actuelle (mm/an)	249.34 - 256.45	5	Très élevé
	243.74 - 249.34	4	Élevé
	237.63 - 243.74	3	Moyen
	231.40 - 237.63	2	Faible
	224.67 - 231.40	1	Très faible
Précipitation (mm/an) sous RCP4.5	264,39 – 268,50	5	Très élevé
	260,51 – 264,39	4	Élevé
	256,60 – 260,51	3	Moyen
	253,10 – 256,60	2	Faible
	249,81 – 253,10	1	Très faible
Précipitation (mm/an) sous RCP8.5	251,72 – 254,80	5	Très élevé
	249,51 – 251,72	4	Élevé
	247,20 – 249,51	3	Moyen
	244,00 – 247,20	2	Faible
	240,81 – 244,20	1	Très faible
Géologie	Quaternaire	5	Élevé
Pente (%)	0,00 – 0,61	5	Très élevé
	0,61 – 1,78	4	Élevé
	1,78 – 3,45	3	Moyen
	3,45 – 5,73	2	Faible
	5,73 – 15,71	1	Très faible

Texture du sol	Sableux	5	Très élevé
	Argilo-limoneux	2	Faible
	Limono-sableux	3	moyen
Occupation	Zone bâtie	1	Très faible
	Terre nue	2	Faible
	Zone agricole	3	Moyen
	Surface d'eau	5	Très élevé
	libre	4	Élevé
	Végétation		
Densité/drainage	1 – 7	5	Très élevé
(km/Km²)	7 – 26	4	Élevé
	26 - 65	3	Moyen
	65 – 122	2	Faible
	122 - 215	1	Très faible

Tableau III : Matrice de comparaison par paire des 6 facteurs

	Précipitation	Géologie	Pente	Texture/sol	Drainage	Occupation
Précipitation	1	2	3	4	5	6
Géologie	0.33	1	3	4	4	5
Pente	0.25	0.33	1	2	3	4
Texture/sol	0.25	0.33	0.33	1	2	3
Drainage	0.20	0.20	0.25	0.50	1	3
Occupation	0.17	0.17	0.20	0.20	0.33	1
Total	**2.20**	**4.03**	**7.78**	**11.70**	**15.33**	**22.00**

Tableau IV : L'échelle de classe de de Saaty (1980)

Échelle	**Degrés d'importance**	**Description**
1	Egale	Quand deux facteurs contribuent de façon égale à l'objectif
2	Intermédiaire	Indique une préférence entre 1 et 3
3	Modéré	La décision favorise modérément un facteur par rapport à un autre
4	Intermédiaire	Indique une préférence entre 3 et 5
5	Fort	La décision favorise fortement un facteur par rapport à un autre.
6	Intermédiaire	Indique une préférence entre 5 et 7

7	Très fortement	Indique une très forte préférence
8	Intermédiaire	Indique une préférence entre 7 et 9
9	Extrêmement	Indique l'importance extrême d'un facteur par rapport à un autre

2.4.2-Estimation du poids des facteurs

Pour déterminer le poids de chaque composante dans l'AHP (Tableau V), les experts ont utilisé leur jugement et une analyse documentaire afin d'évaluer l'importance relative de chaque facteur par rapport aux autres (Zghibi et *al*., 2020 ; Hossain et *al*., 2024). Cette approche a été appliquée en utilisant la matrice de comparaison par paires pour diviser les valeurs de chaque facteur et d'obtenir la matrice normalisée de comparaison par paires (Equation 2), indicateur de l'analyse multiparamétrique pour la recharge des eaux souterraines (Kaliraj et *al*., 2014).

$$X_{ij} = \frac{C_{ij}}{L_{ij}} \qquad (2)$$

Où Cij désigne la valeur assignée à chaque critère à l'intersection de la i^{ème} ligne et de la j^{ème} colonne, L_{ij} représente la somme totale dans chaque colonne de la matrice par paires, et Xij correspond à la valeur normalisée de la matrice par paire à ces emplacements (Equation 3).

$$W_i = \frac{X_{ij}}{n} \qquad (3)$$

Tableau V : Matrice de comparaison normalisée et poids de chaque facteur

	Précipitation	**Géologie**	**Pente**	**Texture/sol**	**Drainage**	**Occupation du sol**	**Poids**	**Poids (%)**
Précipitation	0.45	0.50	0.39	0.34	0.33	0.27	0.3794	37.94
Géologie	0.15	0.25	0.39	0.34	0.26	0.23	0.2692	26.92
Pente	0.11	0.09	0.13	0.17	0.20	0.18	0.1468	17.68
Texture/sol	0.11	0.09	0.05	0.09	0.04	0.14	0.0829	8.29
Drainage	0.09	0.04	0.03	0.00	0.07	0.14	0.0609	6.09
Occupation	0.08	0.04	0.02	0.02	0.03	0.05	0.0374	3.74
Total	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**0.96**	**1.00**	**1.00**	0.9765	

2.4.3-Evaluation de la cohérence de la matrice à l'aide du ratio de cohérence.

Le ratio de cohérence permet de valider le jugement sur la comparaison par paire des facteurs (Saaty, 1990). Dans le cadre de cette étude, le jugement sur la comparaison par paire des couches thématiques (facteurs) et des sous-classes à l'intérieur des couches thématiques a été validé par l'évaluation du ratio de cohérence (CR) à l'aide des équations 4 et 5 de Saaty (1990) :

$$CI - \frac{\lambda max - n}{n-1} \quad (4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI'} \quad (5)$$

Où CI représente l'indice de cohérence, λmax (Tableau 6) correspond à la valeur propre maximale de la matrice, n représente le nombre de variables, également appelées couches thématiques, tandis que CR désigne le rapport de cohérence et RI (Tableau VII) correspond à la valeur de l'indice aléatoire en relation avec le nombre de variables. Pour n (nombre des facteurs) = 6, RI = 1,24.

Tableau VI : Calcul des valeurs propres et des indices de cohérence

	Vecteur pondéré	**λ**	**λmax**	**Rapport de cohérence**
Précipitation	2.22	6.00	6.05	0.05 1,24 0,06
Géologie	1.60	5.94		CI = (λmax –n)/n = 0,05
Pente	0.83	5.65		RI = 1,24
Texture/sol	0.55	7.01		CR = CI/RI = 0,06
Drainage	0.38	6.26		
Occupation	0.21	5.66		
Total	**5,82**	**36.52**		

Tableau VII : Indice de rapport de Saaty pour différentes valeurs de n (Kassa et *al*.,2024)

Taille de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

2.5-Facteur de multi-influence (MIF)

La MIF est une méthode largement utilisée dans de nombreux travaux à travers le monde (Shekhar & Pandey, 2015; Etikala et *al*., 2019; Zghibi et *al*., 2020; Shinde et *al*., 2024) pour cartographier des zones de recharge des eaux souterraines. C'est une méthode assez simple qui est applicable avec peu de données disponibles, ce qui la rend adaptée à la zone d'étude où les données sont rares. Les poids des différents facteurs d'influence sur le potentiel de recharge des eaux souterraines ont été attribués

par la MIF. Les critères à effet majeur (Equation 6) se sont vu attribuer un score de 1,0 et ceux ayant un effet mineur ont reçu le score de 0,5 (Tableau VIII).

$$D = \left[\frac{A+B}{\sum(A+B)}\right] \times 100$$

D est le score attribué à chaque facteur d'influence. A et B représentent la relations majeures et mineures entre deux facteurs respectivement (Ghosh et *al*., 2016).

Tableau VIII : Les différents facteurs d'influence, effet relatif et pondération à chaque facteur

Facteurs	Effet majeur (A)	Effet mineur (B)	Poids relatif (A+B)	Poids attribué
Précipitation	5	0,5	5,5	27,50
Géologie	4	0,5	4,5	22,50
Pente	3	0,5	3,5	17,50
Texture du sol	2	0,5	2,5	12,50
Densité de drainage	2	0,5	25	12,50
Occupation du sol	1	0,5	1,5	7,50
Total	-	-	Σ20	Σ100

2.6-Analyse de superposition et carte des zones potentielles de recharge des eaux souterraines

Après avoir assigné les poids à chaque couche thématique et les rangs à chaque sous-classe des couches thématiques (facteurs), il est alors possible d'obtenir des zones de potentiel des eaux souterraines en superposant toutes les couches thématiques en utilisant la méthode de superposition pondérée intégrée dans ArcGIS (Mukherjee & Singh, 2020; Zghibi et *al*., 2020; Yadav et *al*., 2023; Opoku et *al*., 2024; Mouhoumed et *al*., 2024). La méthode de superposition, intégrée dans la version 10.8 d'ArcGIS, a été mise en œuvre en utilisant l'équation 7 :

$$\text{GW PZ} = \sum_{i=1}^{n}(\text{Wi} * \text{Ri}) \quad (7)$$

Où GWPZ fait référence à la zone potentielle d'eau souterraine, tandis que W_i désigne le poids attribué à chaque couche thématique et R_i représente le classement des sous-classes de chaque couche thématique. Enfin, les zones potentielles de recharge des eaux souterraines ont été classées en catégories de « très faible », « faible », « moyenne », « élevée » et « très élevée » en fonction de leur potentiel.

2.7-Validation

Les données des ouvrages hydrauliques (forages et puits pastoraux) recueillies lors de la campagne sur le terrain en octobre 2023 ont été exploitées afin de valider les cartes

thématiques des zones potentielles de recharge des eaux souterraines de la zone d'étude. En outre, la courbe ROC (Receiver Operating Characteristics = caractéristiques opérationnelles du récepteur) est utilisée pour valider la carte des zones potentielles de recharge des eaux souterraines. Cette approche consiste à représenter graphiquement les taux de vrais positifs (sensibilité) en fonction des taux de faux positifs (1-spécificité) sur un graphique où l'axe des ordonnées Y correspond à la sensibilité et l'axe des abscisses X à (1-spécificité) (Opoku et *al.*, 2024).La figure 2 synthétise le cadre conceptuel de cette étude.

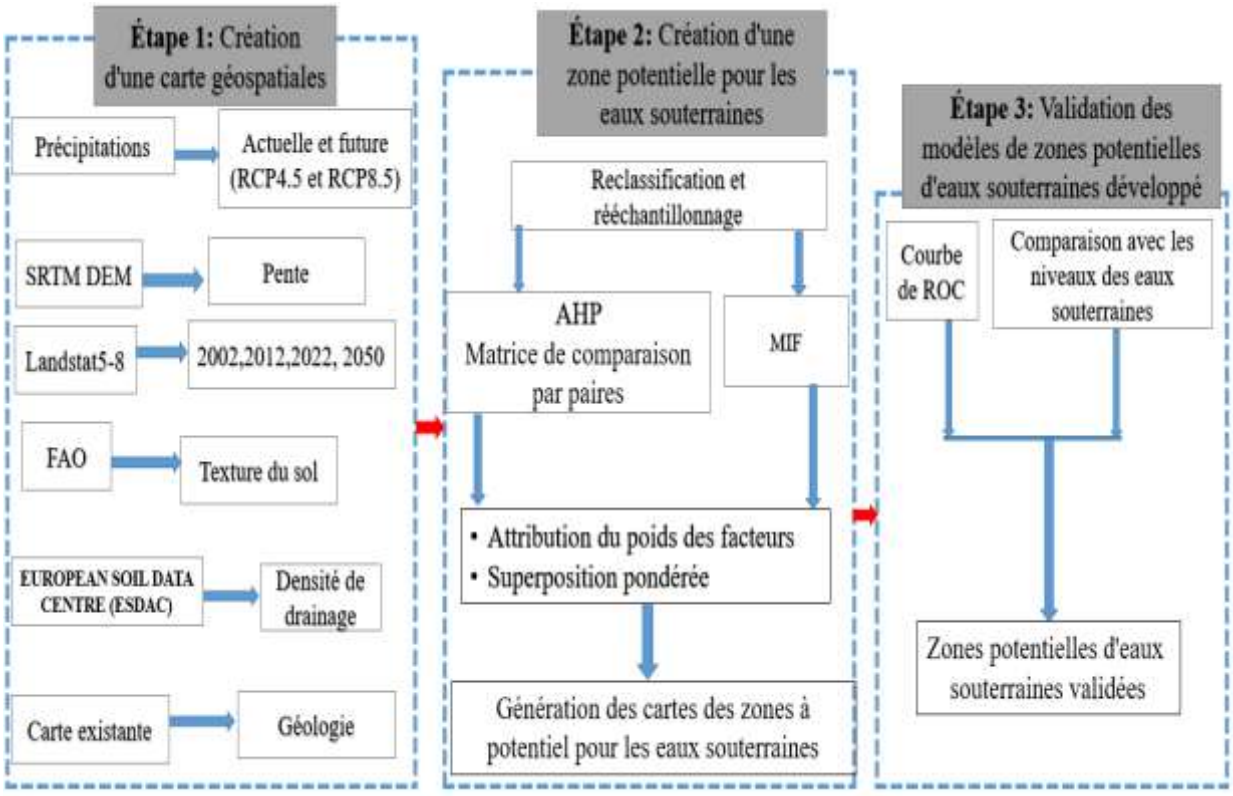


Figure 2 : Cadre conceptuel de l'étude

3-RESULTATS ET DISCUSSION

3.1-Résultats

3.1.1- Les facteurs influençant la zone potentielle de recharge des eaux souterraines et leur analyse spatiale

- **Précipitations moyennes annuelles actuelles et futures**

La carte des précipitations moyennes annuelles obtenues pendant la période historique varie de 224,67 à 256,45mm/an (Fig. 3). Pour la période future, les cartes montrent que la fourchette des précipitations moyennes annuelles à long terme serait comprise entre 247,48 mm/an et 258,50 mm/an dans le cadre du scénario RCP4.5 et

entre 247,81 et 254,09 mm/an pour le scénario RCP8.5. Dans l'ensemble, les précipitations sont moins abondantes dans la partie nord-est de la zone d'étude, tandis que les régions nord-ouest et sud-ouest bénéficient des apports les plus importants en précipitations.

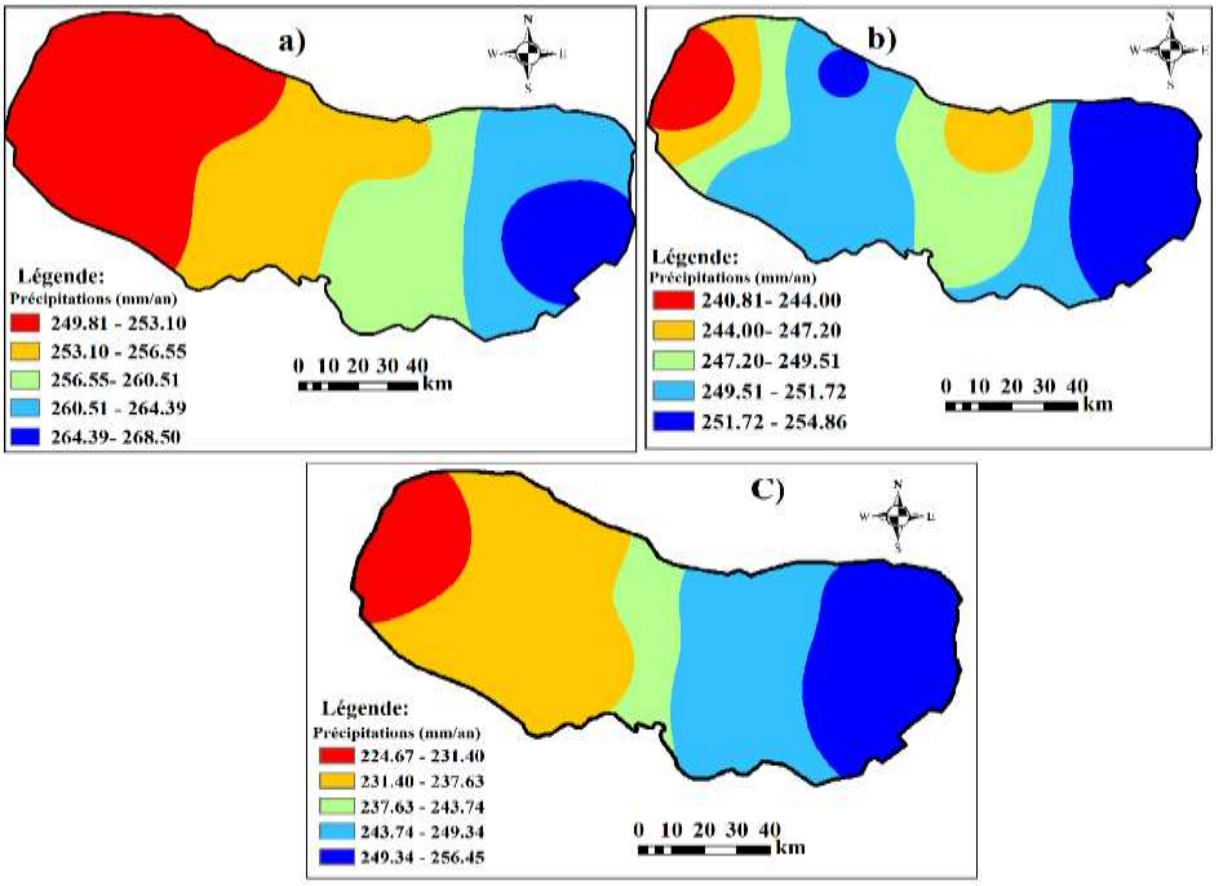


Figure 3 : Précipitations moyennes annuelles à long terme sous les scénarios RCP4.5 (a), RCP8.5 (b) et historique (c)

- **La géologie**

Deux types de formations sédimentaires dominent largement dans le Quaternaire supérieur des régions au nord-est du lac Tchad : les formations lacustres et les formations sableuses éoliennes (Servant, 1970). La quasi-totalité de la zone d'étude est recouverte par des sables éoliens d'âges divers, épais de 140 m au nord-ouest et de 50 m sur les bordures (Servant, 1973). Ces formations (Fig.5) se distinguent par leur perméabilité très élevée, ce qui favorise l'infiltration et le stockage des eaux souterraines, leur conférant ainsi un potentiel important pour ces dernières.

- **La pente**

La carte de la pente a été classée en cinq catégories, à savoir 0 - 0.61%, 0.61 - 1.78%, 1.78 - 3.45%, 3.45 - 5.73% et 5.73 - 15.71% (très faible, faible, moyen, élevé et très élevé). Les zones de très faibles à faible pourcentage (0-0,61% jusqu'à 1,78-3.45%) sont considérées comme « très bonnes à bonnes », constituant ainsi un excellent potentiel pour un taux

d'infiltration élevé. La zone d'étude ayant une surface en grande partie plate, les pentes très faibles à faibles y sont majoritaires (Fig.5).

- **Texture du sol**

La carte de la texture du sol de la zone est dominée par des sols sablo-limoneux, argilo-limoneux, limono-argileux, argilo-sableux, limoneux et sableux (Fig. 5). Les sols sablo-limoneux prédominants dans la zone d'étude se caractérisent généralement par un bon drainage et une faible rétention d'eau, ce qui favorise la recharge de la nappe phréatique. Les sols argileux ont reçu dans le cadre de cette étude un poids équivalent à ceux des sols sableux et limoneux.

- **La densité de drainage**

La carte de densité de drainage de la zone d'étude (Fig. 5) a été subdivisée en cinq catégories distinctes : 1-7 km/km² (très faible), 7-26 km/km² (faible), 26-65 km/km² (modérée), 65-122 km/km² (élevée), 122-215 km/km² (très élevée). Les zones caractérisées par une faible à modérée densité de drainage sont généralement identifiées comme des zones favorables à la recharge des nappes phréatiques, car un faible drainage entraîne moins d'écoulement de surface, favorisant ainsi une infiltration accrue. Par conséquent, la densité de drainage très faible à modérée a été attribuée à la classe « élevée » à « très élevée », comme le montre le Tableau 2.

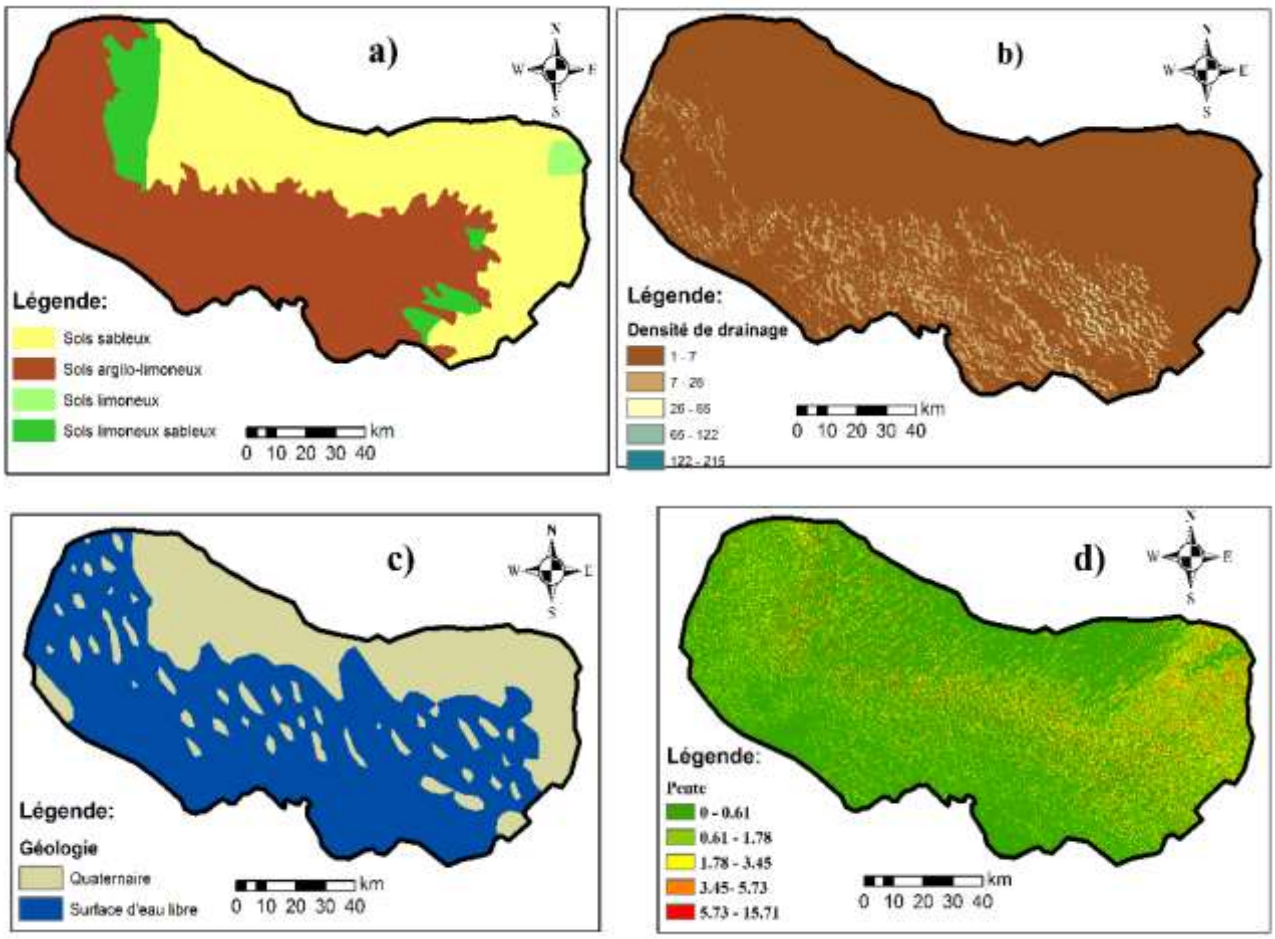


Figure 5 : Texture du sol (a), densité de drainage (b), (c)géologie et (d) pente

3.1.2-Délimitation des zones potentielles de recharge des eaux souterraines pour la période historique

Les zones potentielles de recharge des eaux souterraines de la zone d'étude ont été obtenues par une approche d'intégration des facteurs d'influence avec leurs poids et rangs respectifs dans le logiciel ArcGIS10.8. Les résultats montrent cinq zones potentielles des eaux souterraines : très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée (Fig.6). Les superficies des différentes zones sont résumées dans le tableau IX. Les zones ayant un potentiel de recharge élevé à très élevé sont principalement localisées au sud et au sud-ouest. Inversement, les zones ayant un potentiel de recharge des eaux souterraines très faible à faible sont localisées principalement au nord-est de la zone d'étude et se distinguent par des précipitations faibles, une densité de drainage faible et une végétation moins dense.

Tableau IX : Synthèse de la superficie différentes zones potentielles de recharge des eaux souterraines pour la période de référence

Méthode	Classes	Superficie (Km²)	Superficie (%)
AHP	Très faible	2304,34	18,90
	Faible	3320,92	27,25
	Moyen	3714,39	30,47
	Elevé	2314,49	18,99
	Très élevé	532 ,52	4,36
MIF	Très faible	2064,79	12,02
	Faible	3646,79	29,93
	Moyen	3318,42	27,23
	Elevé	2564,89	22,69
	Très élevé	589,09	8,11

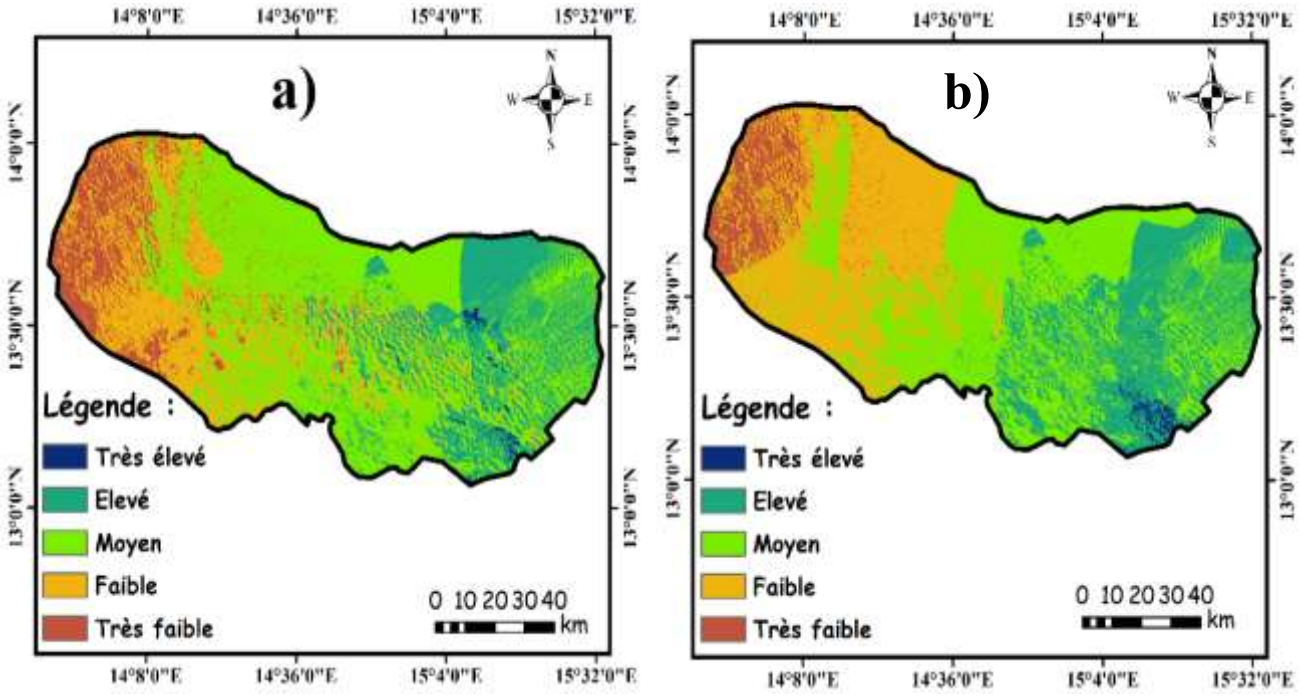


Figure 6 : Identification des zones potentielles de recharge au cours de la période de référence

(a) identification par la méthode AHP, (b) identification par la méthode MIF

3.1.2-Prévisions des futures zones potentielles de recharge des eaux souterraines

Selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, la zone d'étude serait couverte par cinq zones de potentiel de recharge des eaux souterraines à savoir très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée (Fig. 7 et 8). Les résultats des deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) ont mis en lumière l'impact de la variabilité spatiale des paramètres physiques. Les zones à potentiel de recharge d'eaux souterraines élevé à très élevé se concentreront principalement dans les parties sud et sud-ouest, caractérisées par des pentes faibles, des zones agricoles (polders), une forte végétation ainsi que la présence de cours d'eau qui favoriseront l'infiltration et la recharge des eaux souterraines Dans le cas de la méthode AHP, les superficies des zones potentielles de recharge d'eau souterraine élevé à très élevé couvriraient respectivement 2299,19-2459,18km² et 2048,23-617,71km², selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Tableau X). Les zones potentielles de recharge des eaux souterraines identifiées à l'aide de la méthode MIF allant de très élevées à élevées couvriraient respectivement 922,85 à 2903,43 km² et 592,17 à 3033,20 km² dans les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Tableau VIII). Ces résultats reflètent l'influence des principaux facteurs qui contrôlent le potentiel de recharge des eaux souterraines de la zone d'étude tels que les précipitations, la pente, la géologie et la pédologie.

Tableau X : Statistique de la superficie des zones potentielles de recharge des eaux souterraines pour la période future.

Méthode	Zones	Potentiel recharge (RCP4.5)		Potentiel recharge (RCP8.5)	
		Superficie (km²)	Superficie (%)	Superficie (km²)	Superficie (%)
AHP	Très faible	2202,40	18.08	633.42	5.20
	Faible	2536.14	20.82	3221.78	26.44
	Moyen	2686.41	22.05	5662.13	46.47
	Elevé	2299.19	18.87	2048.23	16.81
	Très élevé	2459.18	20.18	617.78	5.07
MIF	Très faible	1387,91	11,39	1616.52	13,26
	Faible	3790,28	31,11	3107.88	25,50
	Moyen	3178,86	26,09	3833.55	31,46
	Elevé	2903,43	23,83	3033.2	24,89
	Très élevé	922,85	7,57	592.17	4,86

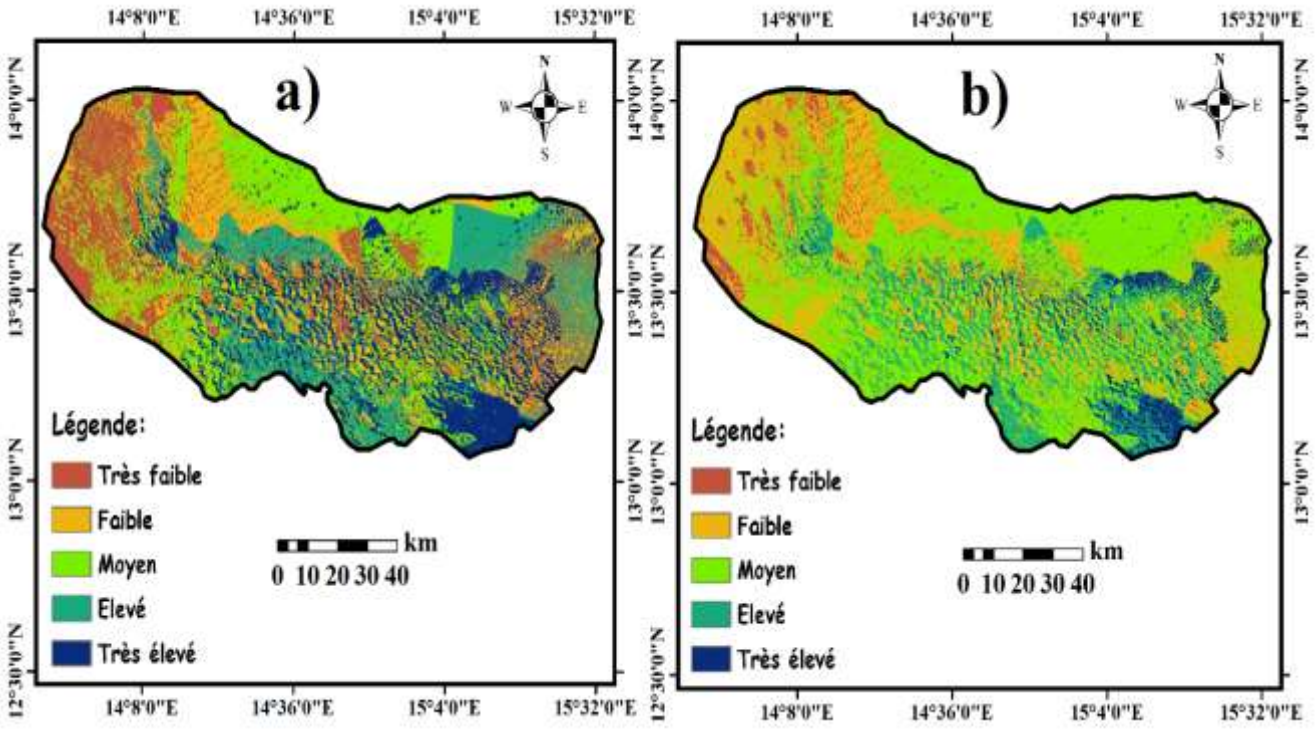


Figure 7 : Prédiction des zones potentielles de recharge des eaux souterraines sous les scénarios RCP4.5 (a) et RCP8.5 par la méthode AHP.

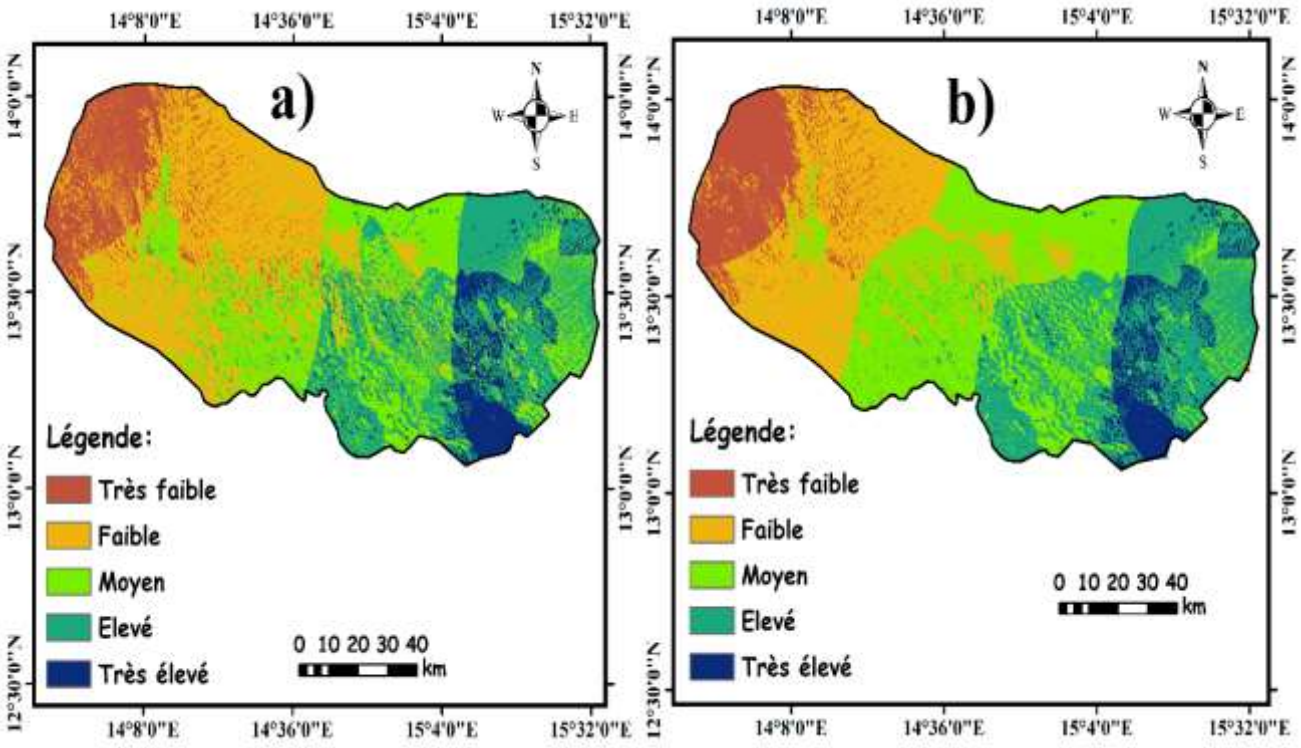


Figure 8 : Prédiction des zones potentielles de recharge des eaux souterraines sous les scénarios RCP4.5 (a) et RCP8.5 par la méthode MIF

Validation des cartes des zones potentielles de recharge des eaux souterraines

Les résultats de la validation révèlent que les valeurs de validation du modèle AHP pour la période de référence correspondent à celles de l'AUC de la courbe ROC estimées à 0,68 (Fig. 9-10), tandis qu'elles sont de 0,74 et 0,64, en fonction des cartes de potentiel de recharge des eaux souterraine obtenues sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 respectivement. Dans le cadre de la méthode MIF, l'analyse du diagramme ROC a mis en évidence une valeur de l'AUC estimée à 0,62 pour la période de référence. Pour la période future, les graphiques de l'AUC ont montré des valeurs de 0,72 et 0,68 respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

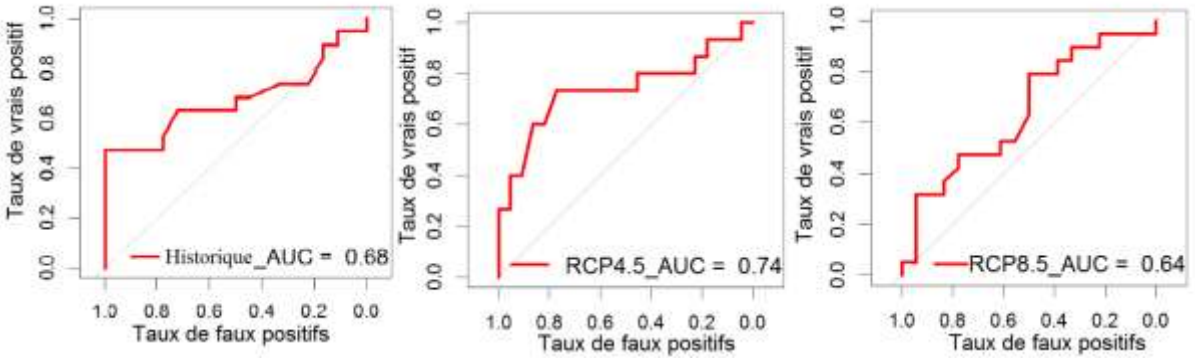


Figure 9 : Courbe de ROC pour la validation des cartes de potentiel recharge des eaux souterraines en utilisant la méthode AHP

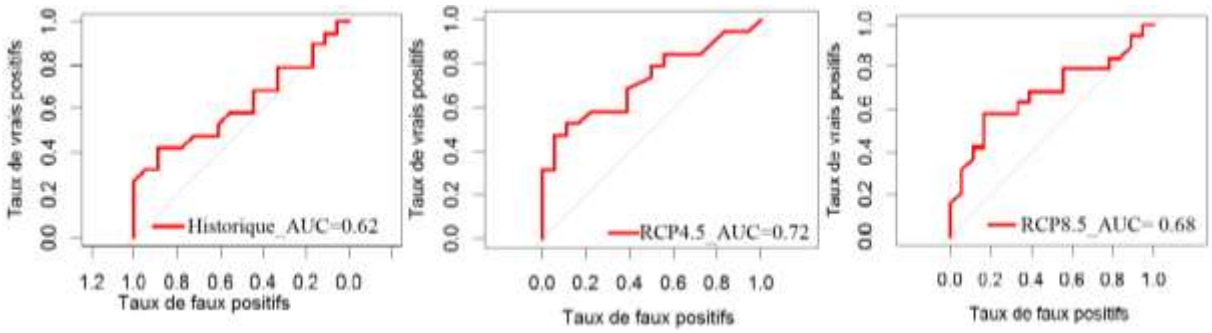


Figure 10 : Courbe de ROC pour la validation des cartes de potentiel recharge des eaux souterraines en utilisant la méthode MIF

4-DISCUSSION

Cette étude a utilisé une approche améliorée en combinant des données géospatiales avec les méthodes AHP et MIF afin d'évaluer le potentiel de recharge des eaux souterraines dans la zone d'étude pour la période 2021-2050. Les précipitations futures moyennes annuelles à long terme issues des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sont apparues comme les facteurs les plus influents avec un poids de 37,94 %. Elles jouent un rôle très important dans la dynamique hydrologique et sont les principales sources de recharge des eaux souterraines dans le bassin du lac Tchad (Al-Djazouli et *al*., 2021; Sarah et *al*., 2024; Dingamadji et *al*., 2024).

La géologie est apparue comme deuxième facteur influent avec un poids de 23 %. Les caractéristiques géologiques de la zone d'étude, constituées de dépôts sédimentaires du Quaternaire recouvrant l'intégralité de ladite zone, sont fréquemment perçues comme présentant un fort potentiel de recharge des eaux souterraines (Ozegin et *al*., 2024a). La pente a été choisie comme le troisième facteur qui influence le potentiel de recharge des eaux souterraines de la zone d'étude du fait que la zone d'étude est caractérisée par une pente relativement faible. Un poids de 17 % lui a été attribué. Selon Nouayti et *al*.(2017), l'écoulement de l'eau de surface est plus rapide et la recharge de la nappe phréatique est moindre lorsque la pente est plus prononcée. La texture du sol, présente avec un poids de 8 %, est considérée comme un facteur modérément influent sur le potentiel de recharge d'eaux souterraines. La densité de drainage, quant à elle, est pondérée à 6 % et a une influence non négligeable sur le potentiel de recharge des eaux souterraines. D'après Kassa et *al*. (2024), une densité de drainage plus élevée entraîne un écoulement plus rapide de l'eau et une réduction des taux d'infiltration.

Enfin, l'occupation du sol, représentant seulement 5 % du poids total, joue un rôle relativement mineur. Toutefois, les zones de végétation (26,26 %) et les surfaces d'eau libre (15,65 %) prédites dans la zone d'étude faciliteront l'infiltration de l'eau, en revanche, les terres nues (56,40 %) et les zones bâties (0,88 %) entraveront l'infiltration de l'eau. Plusieurs études ont souligné que les surfaces d'eau libre et la végétation favorisent la présence des eaux souterraines (Ilugbo et *al*., 2023 ; Kassa et *al*., 2024 ; Ozegin et *al*., 2024a ; Zenande et *al*., 2024).

Dans l'ensemble, les résultats indiquent que la zone d'étude connaîtra des zones potentielles de recharge des eaux souterraines élevé et très élevé selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 qui seront concentrées dans les zones sud et sud-ouest. Ces zones possèdent des caractéristiques favorables telles que la faible pente, des sols favorables, la présence de plans d'eau et des précipitations abondantes qui y seront enregistrées. En revanche, le faible potentiel de recharge des eaux souterraines observé dans la zone d'étude peut s'expliquer à la fois par les précipitations peu abondantes et par la présence de dunes de sable qui affichent une topographie élevée. Certains auteurs ont également fait ce constat dans des régions partageant des caractéristiques géomorphologiques et géographiques similaires à celles de la zone d'étude (Mukherjee & Singh, 2020; Yadav et *al*., 2023). Selon ces auteurs, les dunes de sable ont une topographie ondulée et une capacité de recharge moindre.

CONCLUSION

La présente étude vise à identifier les zones potentielles de recharge d'eaux souterraines de la bordure nord-est du lac Tchad sous l'influence du changement climatique. Les méthodes AHP et MIF, reconnues pour leurs performances, ont été utilisées afin d'attribuer des poids appropriés aux facteurs de contrôle ainsi qu'à leurs classes respectives, dans le but d'évaluer le potentiel de recharge des eaux souterraines à l'horizon 2050. Les résultats ont montré que l'étendue géographique de la zone d'étude connaîtra cinq zones potentielles de recharge distinctes (très faibles, faibles, moyennes, élevées et très élevées) présentant un potentiel de recharge pour les eaux souterraines de la zone d'étude. Il convient de noter que l'étude présente quelques limites liées à la rareté des données hydrogéologiques relatives à l'inventaire des eaux souterraines, d'éventuels biais au niveau des précipitations simulées par les MCR. Par conséquent, les futures recherches devraient se concentrer sur des modèles de simulation plus sophistiqués et également incorporer des méthodes statistiques pour optimiser le processus de pondération, ce qui permettra d'améliorer la fiabilité et la précision de l'évaluation du potentiel de recharge des eaux souterraines. Les résultats de cette recherche serviront les décideurs politiques et les organismes chargés de la gestion des eaux souterraines, en particulier pour diverses initiatives telles que l'identification des zones prioritaires pour la mise en œuvre de projets et de mesures de préservation des ressources en eau.

Soutien financier

La présente étude s'inscrit dans le cadre du programme d'impact de la Banque mondiale, de l'Agence Française de Développement (AFD) ainsi que du Gouvernement Béninois, et plus particulièrement dans le cadre du projet du Centre d'Excellence d'Afrique pour l'Eau et l'Assainissement (C2EA).

Déclaration de conflits d'intérêts.

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts.

RÉFÉRENCES

Adesola, G. O., Thamaga, K. H., Gwavava, O., & Pharoe, B. K. (2023). Groundwater Potential Zones Assessment Using Geospatial Models in Semi-Arid Areas of South Africa. *Land*, *12*(10), 1877. https://doi.org/10.3390/land12101877

Al-Djazouli, M. O., Elmorabiti, K., Rahimi, A., Amellah, O., & Fadil, O. A. M. (2021). Delineating of groundwater potential zones based on remote sensing, GIS and analytical hierarchical process: A case of Waddai, eastern Chad. *GeoJournal*, *86*(4), 1881-1894. https://doi.org/10.1007/s10708-020-10160-0

Centre du climat. (2022). Fiche d'information Climat [Manuscrit].

Dingamadji, M., Adounkpe, J., Abderamane, H., & Abdallah, M. N. (2024). Bias correction of CORDEX-Africa regional climate model simulations for climate change projections in northeastern Lake Chad: Comparative analysis of three bias correction methods. *European Scientific Journal, ESJ*, *20*(30), 204. https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n30p204

Etikala, B., Golla, V., Li, P., & Renati, S. (2019). Deciphering groundwater potential zones using MIF technique and GIS: A study from Tirupati area, Chittoor District, Andhra Pradesh, India. *HydroResearch*, *1*, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.04.001

Ghosh, P. K., Bandyopadhyay, S., & Jana, N. C. (2016). Mapping of groundwater potential zones in hard rock terrain using geoinformatics: A case of Kumari watershed in western part of West Bengal. *Modeling Earth Systems and Environment*, *2*(1), 1. https://doi.org/10.1007/s40808-015-0044-z

Gouvernement du Tchad. (2022). *Premier plan national d'adaptation au changement climatique de la république du Tchad* (p. 116). https://unfccc.int/sites/default/files/resource/CHAD-NAP_FR_web.pdf

Holmes, S., Nick, B., Gabrielle, D., Rebecca, O., Hannah, G., Amy, W., Cathryn, F., Erasmo, B., & Richard, J. (2022). *Climate risk report fort the sahel region* (p. 149).

Hossain, Md. Z., Adhikary, S. K., Nath, H., Kafy, A. A., Altuwaijri, H. A., & Rahman, M. T. (2024). Integrated Geospatial and Analytical Hierarchy Process Approach for Assessing Sustainable Management of Groundwater Recharge Potential in Barind Tract. *Water*, *16*(20), 2918. https://doi.org/10.3390/w16202918

Hussein, A.-A., Govindu, V., & Nigusse, A. G. M. (2017). Evaluation of groundwater potential using geospatial techniques. *Applied Water Science*, *7*(5), 2447-2461. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0433-0

Ilugbo, O., Isaac, A., Oyamenda, O. K., & Adesola, B. M. (2023). Assessment of groundwater occurrence in a typical schist belt region in Osun State, Southwestern Nigeria using VES, aeromagnetic dataset, remotely sensed data,

and MCDA approaches. *Sustainable Water Resources Management*, *9*(1), 29. https://doi.org/10.1007/s40899-022-00810-1

Jiménez, L., & Soberón, J. (2020). Leaving the area under the receiving operating characteristic curve behind: An evaluation method for species distribution modelling applications based on presence-only data. *Methods in Ecology and Evolution*, *11*(12), 1571-1586. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13479

Kaliraj, S., Chandrasekar, N., & Magesh, N. S. (2014). Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences*, *7*(4), 1385-1401. https://doi.org/10.1007/s12517-013-0849-x

Kassa, S. B., Zimale, F. A., Mulu, A., Worku, T. A., Wossene, M. L., Meshesha, T. M., Hailu, Y. B., Aman, T. F., Kifelew, M. S., & Mekonnen, H. A. (2024). Groundwater Potential Assessment Using Integrated Geospatial and Analytic Hierarchy Process Techniques (AHP) in Chemoga Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Soil and Water Research*, 17. https://doi.org/doi.org/10.1177/11786221241312806

Lentswe, G. B., & Molwalefhe, L. (2020). Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *28*, 100674. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100674

Mahamat Nour, A., Huneau, F., Mahamat Ali, A., Mahamat Saleh, H., Ngo Boum-Nkot, S., Nlend, B., Djebebe-Ndjiguim, C. L., Foto, E., Sanoussi, R., Araguas-Araguas, L., & Vystavna, Y. (2022). Shallow Quaternary groundwater in the Lake Chad basin is resilient to climate change but requires sustainable management strategy: Results of isotopic investigation. *Science of the Total Environment 851 (2022) 158152*. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158152

März, S. (2018). Assessing the fuel poverty vulnerability of urban neighbourhoods using a spatial multi-criteria decision analysis for the German city of Oberhausen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 1701-1711. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.006

Mouhoumed, R. M., Ekmekcioğlu, Ö., & Özger, M. (2024). An integrated groundwater vulnerability and artificial recharge site suitability assessment using GIS multi-criteria decision making approach in Kayseri region, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(27), 39794-39822. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33809-6

Mukherjee, I., & Singh, U. K. (2020). *Delineation of groundwater potential zones in a drought-prone semi-arid region of east India using GIS and analytical hierarchical process techniques*.

Nag, S. K., & Ghosh, P. (2013). Delineation of groundwater potential zone in Chhatna Block, Bankura District, West Bengal, India using remote sensing and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, *70*(5), 2115-2127. https://doi.org/10.1007/s12665-012-1713-0

Nouayti, N., Khattach, D., & Hilali, M. (2017). Cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines dans le haut bassin du Ziz *(Maroc) : Apport de la télédétection et du système d'information géographique*. 45-57.

Opoku, P. A., Shu, L., & Amoako-Nimako, G. K. (2024). Assessment of Groundwater Potential Zones by Integrating Hydrogeological Data, Geographic Information Systems, Remote Sensing, and Analytical Hierarchical Process Techniques in the Jinan Karst Spring Basin of China. *Water*, *16*(4), 566. https://doi.org/10.3390/w16040566

Ozegin, K. O., Ilugbo, S. O., Alile, O. M., & Iluore, K. (2024). Integrating in-situ data and spatial decision support systems (SDSS) to identify groundwater potential sites in the Esan plateau, Nigeria. *Groundwater for Sustainable Development*, *26*, 101276. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101276

Panahi, M., Sadhasivam, N., Pourghasemi, H. R., Rezaie, F., & Lee, S. (2020). Spatial prediction of groundwater potential mapping based on convolutional neural network (CNN) and support vector regression (SVR). *Journal of Hydrology*, *588*, 125033. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125033

Pande, C. B., Moharir, K. N., Panneerselvam, B., Singh, S. K., Elbeltagi, A., Pham, Q. B., Varade, A. M., & Rajesh, J. (2021). Delineation of groundwater potential zones for sustainable development and planning using analytical hierarchy process (AHP), and MIF techniques. *Applied Water Science*, *11*(12), 186. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01522-1

Pande, C. B., Moharir, K. N., Singh, S. K., & Varade, A. M. (2020). An integrated approach to delineate the groundwater potential zones in Devdari watershed area of Akola district, Maharashtra, Central India. *Environment, Development and Sustainability*, *22*(5), 4867-4887. https://doi.org/10.1007/s10668-019-00409-1

Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahdavi, M., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, *8*(9), 7059-7071. https://doi.org/10.1007/s12517-014-1668-4

Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2016). Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: A case study at Mehran Region, Iran. *CATENA*, *137*, 360-372. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.010

Sarah, O.-S., Laville, C., Holly, B., & Manisha, G. (2024). Gestion du risque climatique au Tchad (p. 70) [Rapport d'assistance technique]. (Https://www.sparc-

knowledge.org/ publications-resources/etat-de-preparation-du-tchad-lacces-aufinancement-climatique).

Servant, -Vildary. (1970). De diatomées, Paléoécologie. *GCologm de 1'0 RSTOM 24, rue Bayard, Paris-S" France*, 169-2015. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/geologie/17134.pdf

Shekhar, S., & Pandey, A. C. (2015). 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*, *30*(4), 402-421. https://doi.org/10.1080/10106049.2014.894584

Shinde, S. P., Barai, V. N., Gavit, B. K., Kadam, S. A., Atre, A. A., Pande, C. B., Pal, S. C., Radwan, N., Tolche, A. D., & Elkhrachy, I. (2024). Assessment of groundwater potential zone mapping for semi-arid environment areas using AHP and MIF techniques. *Environmental Sciences Europe*, *36*(1), 87. https://doi.org/10.1186/s12302-024-00906-9

Swain, S., Taloor, A. K., Dhal, L., Sahoo, S., & Al-Ansari, N. (2022). Impact of climate change on groundwater hydrology: A comprehensive review and current status of the Indian hydrogeology. *Applied Water Science*, *12*(6), 120. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01652-0

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., … Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, *3*(4), 322-329. https://doi.org/10.1038/nclimate1744

Tegegne, A. M., Lohani, T. K., & Eshete, A. A. (2023). Proxy modeling approach to evaluate groundwater recharge potentiality zones in the data scarce area of upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(6), 726. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11274-x

Vaquero, G., Siavashani, N. S., García-Martínez, D., Elorza, F. J., Bila, M., Candela, L., & Serrat-Capdevila, A. (2021). The Lake Chad transboundary aquifer. Estimation of groundwater fluxes through international borders from regional numerical modeling. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *38*, 100935. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100935

World Bank Group. (2020). *A Groundwater Model for the Lake Chad Basin Integrating data and understanding of water resources at the basin scale.* (A Cooperation for International Waters in Africa (CIWA) Technical Report) [Technical Report (English). Washington, D.C.: World Bank Group.]. http://documents.worldbank.org/curated/en/ 271881583228188294/A〉

Yadav, B., Malav, L. C., Jangir, A., Kharia, S. K., Singh, S. V., Yeasin, M., Nogiya, M., Meena, R. L., Meena, R. S., Tailor, B. L., Mina, B. L., Alhar, M. S. O., Jeon, B.-H., Cabral-Pinto, M. M. S., & Yadav, K. K. (2023). Application of analytical

hierarchical process, multi-influencing factor, and geospatial techniques for groundwater potential zonation in a semi-arid region of western India. *Journal of Contaminant Hydrology*, *253*, 104122. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104122

Zenande, N., Adesola, G. O., Madi, K., & Gwavava, O. (2024). Groundwater potential assessment in the Eastern Cape, South Africa, using analytical hierarchical process (AHP) technique. *Sustainable Water Resources Management*, *10*(6), 188. https://doi.org/10.1007/s40899-024-01166-4

Zghibi, A., Mirchi, A., Msaddek, M. H., Merzougui, A., Zouhri, L., Taupin, J.-D., Chekirbane, A., Chenini, I., & Tarhouni, J. (2020). Using Analytical Hierarchy Process and Multi-Influencing Factors to Map Groundwater Recharge Zones in a Semi-Arid Mediterranean Coastal Aquifer. *Water*, *12*(9), 2525. https://doi.org/10.3390/w12092525