

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DJILALI BOUNAAMA - KHEMIS MILIANA

Faculté des Sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre

Département des Sciences de la Terre

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de

**MASTER**

En Science de la terre

➤ Option: Hydrogéologie

Thème:

**Evaluation des zones potentielles d'eaux souterraines, en utilisant l'analyse spatiale, SIG et les Techniques MCDA, plaine de khemis Miliana**

Soutenue publiquement le : 04 Juillet 2018

Présenté par :

○ M. Bourekiza Abdelfettah

○ M. Labdi Bouabdellah

**Devant le jury:**

Président	M. Bougara, Mohamed	UKM
Encadrant	M. Gharbi, Benyoucef	UKM
Examineur 1	M. Bouderbala, AEK	UKM
Examineur 2	M. Bensaada, Mohamed	UKM

Année Universitaire : 2018/2019





# Remerciements

*En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude, Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.*

*Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury : Monsieur Bougara Mohamed pour Nous avoir fait l'honneur de juger ce travail et son acceptation de présider le jury de soutenance, Monsieur Bouderbala Abdelkader et Monsieur Bensaada Mohamed pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nous tenant à remercier sincèrement Monsieur Gharbi Benyoucef, qui en tant que Directeur de mémoire, se sont toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il ont bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

*On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous.*



# Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes professeurs de l'UKM qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

*Bourekiza Abdelfettah*

Je dédie ce mémoire à :

A mes chers parents Labdi Lakhdar et Koriche Fatma, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères sœurs, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible.

Merci d'être toujours là pour moi.

*Labdi Bouabdellah*

## Résumé

Dans cette étude, une approche cartographique a été appliquée pour identifier le zonage potentiel des ressources en eaux souterraines basé sur le système d'information géographique intégré (SIG) et les techniques du processus d'analyse hiérarchique, dans la plaine alluviale de Khemis Miliana, en Algérie. Un total de sept ensembles de critères/facteurs incluant, la pluviométrie, la lithologie du sol, la pente, land use/land cover, profondeur de l'eau souterraine, recharge nette et densité de drainage, ont été sélectionnés et cartographiés. Ces facteurs ont une forte influence sur le potentiel de stockage des eaux souterraines dans la zone d'étude. Chaque critère/facteur a été assigné à un poids approprié basé sur l'échelle de Saaty et les poids ont été normalisés par le biais d'AHP. Le processus a été intégré dans l'environnement SIG pour produire la carte zonale du potentiel des eaux souterraines. La plaine alluviale de Khemis Miliana a été classée qualitativement en cinq zones potentielles d'eau souterraine.

Les résultats obtenus indiquent que 29% (105 km<sup>2</sup>), 27% (97 km<sup>2</sup>) de la zone étudiée présentent respectivement un potentiel en eau souterraine modéré et modéré à élevé, respectivement, tandis que 26% (93 km<sup>2</sup>) présentent un potentiel élevé et très élevé. En outre, environ 17% (61 km<sup>2</sup>) ont été classés comme ayant un faible potentiel d'eau souterraine. La démarcation des zones potentielles d'eau souterraine dans la zone d'étude sera utile pour la planification, le développement et la gestion futures des ressources en eaux souterraines.

**Mots-clés :** Analyse spatiale, eaux souterraines, MCDM, SIG, Khemis Miliana, AHP.

## Abstract

In this study, a cartographic approach has been applied to identify groundwater resource potential zonation based on integrated geographic information system (GIS), and Analytical Hierarchy Process (AHP) techniques in Khemis Miliana alluvial plain, in Algeria. A total of seven sets of criteria/factors including, rainfall, Soil lithology, slope, Land use/Land cover, Groundwater depth, Net recharge and drainage density, were selected and mapped. These factors have a strong influence on groundwater storage potential in the study area. Each criterion/factor was assigned the appropriate weight based on Saaty's scale and the weights were normalized through the analytic hierarchy process (AHP). The process was integrated into the GIS environment to produce the groundwater potential prediction map for the area. Khemis Miliana alluvial plain has qualitatively been categorized into five groundwater potential zones.

The obtained results indicated that 29% (105 km<sup>2</sup>), 27% (97 km<sup>2</sup>) of the study area exhibit moderate and moderate to great groundwater potential, respectively, whereas 26% (93 km<sup>2</sup>) showed high and very high groundwater potential. In addition, about 17% (61 km<sup>2</sup>) was classified as having poor groundwater potential, the demarcation of groundwater potential zones in the study area will be helpful for future planning, development and management of the groundwater resources.

**Keywords:** Spatial Analysis, Groundwater, MCDM, GIS, Khemis Miliana, AHP.

## الملخص

في هذه الدراسة، تم تطبيق مقارنة خرائطية لتحديد المناطق المحتملة لموارد المياه الجوفية استناداً إلى نظام المعلومات الجغرافية المتكامل، و عملية التحليل الهرمي (AHP) في السهل الغريني (المُتكوّن من الطمي) لخميس مليانة، في الجزائر. تم اختيار و تعيين ما مجموعه سبعة من المعايير/العوامل، بما في ذلك هطول الأمطار، نوع التربة، الانحدار الأرضي، استخدام الأراضي / الغطاء الأرضي، عمق المياه الجوفية، صافي التغذية السنوي لخزانات المياه الجوفية و كثافة التصريف للوديان، التي تم اختيارها و رسم خرائطها. هذه العوامل لها تأثير قوي على إمكانية تخزين المياه الجوفية في منطقة الدراسة، تم تعيين وزن خاص لكل معيار/عامل بناءً على مقياس Saaty، كما تم تسوية (تطبيع) كل وزن من خلال عملية التحليل الهرمي (AHP)، العملية تم دمجها في بيئة نظم المعلومات الجغرافية لإنتاج خريطة التنبؤ بالمياه الجوفية المحتملة للمنطقة، تم تصنيف سهل خميس مليانة الغريني بشكل نوعي إلى خمس مناطق محتملة للمياه الجوفية.

النتائج المتحصل عليها تُشير إلى أنّ 29% (105 كيلومتر مربع)، 27% (97 كيلومتر مربع) تُظهر احتمال وجود مُعتدل إلى معتدل جيد من المياه الجوفية، على التوالي، في حين 26% (93 كيلومتر مربع) تُظهر احتمال مرتفع إلى مرتفع للغاية. بالإضافة إلى ذلك، تم تصنيف حوالي 17% (61 كيلومتر مربع) على أنها ذات إمكانات مياه جوفية فقيرة (ضعيفة). ترسيم المناطق المحتملة للمياه الجوفية في منطقة الدراسة سيساعد على التخطيط المستقبلي، تطوير و إدارة موارد المياه الجوفية.

الكلمات المفتاحية: التحليل المكاني، المياه الجوفية، إتخاذ القرارات متعددة المعايير، نظم المعلومات الجغرافية، خميس مليانة، عملية التحليل الهرمي.

# Table des matières

Remerciements .....	<b>i</b>
Dédicaces.....	<b>ii</b>
Résumé .....	<b>iii</b>
Abstract.....	<b>iv</b>
المخلص.....	<b>v</b>
Table des matières .....	<b>vi</b>
Liste des tableaux.....	<b>viii</b>
Liste des figures.....	<b>ix</b>
Notation et abréviation .....	<b>x</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Présentation générale de la zone d'étude .....</b>	<b>4</b>
2.1 LOCALISATION ET CARACTERISTIQUES.....	4
2.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	5
2.3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	6
2.4 HYDROCLIMATOLOGIE .....	7
2.5 IDENTIFICATION DES FACIES HYDROCHIMIQUES .....	10
2.5.1 Analyse des balances ioniques et contrôle de la cohérence des résultats .	10
2.5.2 Classification des eaux d'après Kurlov .....	11
2.5.3 Classification des eaux d'après Stabler .....	13
2.5.4 Classification des eaux d'après Schoeller-Berkaloff.....	15
2.5.5 Classification des eaux d'après Piper .....	17
<b>3 Matériels et méthodes.....</b>	<b>18</b>
3.1 COLLECTE DE DONNEES ET GENERATION DES CARTES THEMATIQUES.....	18
3.1.1 Pédologie (Pd).....	18
3.1.2 Densité de drainage (Dd) .....	18
3.1.3 Précipitations (Pr) .....	19
3.1.4 Profondeur des eaux souterraines (Prof).....	19
3.1.5 Recharge nette (Rn) .....	20
3.1.6 Occupation des sols (Os) .....	21
3.1.7 Pente (Pt).....	21
3.2 ANALYSE DE DECISION MULTICRITERES (MCDA).....	22
<b>4 Résultats et discussion .....</b>	<b>24</b>

4.1	COUCHES THEMATIQUES DE KHEMIS MILIANA .....	24
4.1.1	Pédologie (Pd).....	24
4.1.2	Densité de drainage (Dd) .....	25
4.1.3	Précipitations (Pr) .....	27
4.1.4	Profondeur des eaux souterraines (Prof).....	27
4.1.5	Recharge nette (Rn) .....	28
4.1.6	Occupation des sols (Os) .....	29
4.1.7	Pente (Pt).....	30
4.2	NOTES OU SCORES DES COUCHES THEMATIQUES CLASSEES .....	31
4.3	DETERMINER LES POIDS EN UTILISANT L' AHP .....	31
4.4	GENERATION DE MATRICE DE COMPARAISON PAR PAIRE .....	32
4.5	DELIMITATION DES ZONES POTENTIELLES D'EAUX SOUTERRAINES .....	37
4.6	CLASSIFICATION DES ZONES POTENTIELLES D'EAUX SOUTERRAINES .....	37
<b>5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>39</b>
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	41



## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> Faciès chimiques des eaux souterraines dans la plaine de Khemis Miliana pour l'année 2016. ....	12
<b>Tableau 2</b> Classification de Stabler des échantillons d'eaux souterraines. ....	14
<b>Tableau 3</b> Échelle d'importance relative de 1-9 de Saaty. ....	33
<b>Tableau 4</b> Indice de ratio pour les différentes valeurs de n. ....	33
<b>Tableau 5</b> Matrice de comparaison par paire de sept critères pour le processus AHP. .	34
<b>Tableau 6</b> Détermination des poids de critère relatif. ....	34
<b>Tableau 7</b> Poids relatif des différentes couches thématiques et de leurs classes correspondantes. ....	35
<b>Tableau 8</b> Zones potentielles d'eaux souterraines. ....	38

## Liste des figures

<b>Fig. 1</b> Carte de localisation de la zone d'étude .....	4
<b>Fig. 2</b> Carte géologique de la plaine du Haut Cheliff. (Perrodon, 1957).....	5
<b>Fig. 3</b> Coupe géologique A-A' de la plaine du Haut Cheliff. (Perrodon, 1957). ....	7
<b>Fig. 4</b> Répartition mensuelle des précipitations (1980 - 2014) (1). ....	7
<b>Fig. 5</b> Répartition mensuelle des précipitations (1980 - 2014) (2). ....	8
<b>Fig. 6</b> Variation spatio-temporelle des températures moyennes annuelles (1980-2014). 8	
<b>Fig. 7</b> Histogrammes de variations des température moyennes mensuelles (1986 - 2014). ....	9
<b>Fig. 8</b> Diagramme Ombrothermique de Gaussen, station de Khemis (1986 -2014). ....	10
<b>Fig. 9</b> Représentation des balances ioniques calculées.....	11
<b>Fig. 10</b> Diagrammes de Schoeller-Berkaloff , Année 2016. ....	16
<b>Fig. 11</b> Diagrammes de Piper, Année 2016.....	17
<b>Fig. 12</b> Organigramme montrant la méthodologie adoptée dans cette étude .....	23
<b>Fig. 13</b> Couche thématique de la texture du sol. ....	25
<b>Fig. 14</b> Carte montrant la répartition de la système de drainage. ....	26
<b>Fig. 15</b> Couche thématique de la densité de drainage. ....	26
<b>Fig. 16</b> Couche thématique des précipitations. ....	27
<b>Fig. 17</b> Couche thématique de profondeur des eaux souterraines. ....	28
<b>Fig. 18</b> Couche thématique de la recharge nette.....	29
<b>Fig. 19</b> Couche thématique de l'occupation des sols. ....	30
<b>Fig. 20</b> Couche thématique de la pente en %. ....	31
<b>Fig. 21</b> Carte des zones potentielles d'eaux souterraines de la plaine. ....	38

## Notation et abréviation

**SIG** : Système Informatique Géographique.

**DEM**: Digital Elevation Model, le Modèle numérique de terrain.

**MCDM ou MCDA**: “Multiple-Criteria Decision-Making”, ou bien “Multiple-Criteria Decision Analysis”, c’est à dire l'aide à la décision multicritère.

**AHP**: Analytic Hierarchy Process, le Processus d'analyse hiérarchique.

**WLC**: Weighted Linear Combination, la combinaison linéaire pondérée.

**GWPI**: Groundwater Potential Index, l'indice de potentiel des eaux souterraines.

**BGS**: Below Ground Surface, au-dessous de la surface du sol.

**HSGs** : Hydrologic Soil Groups.

**IC**: Indice de Cohérence.

**$\lambda_{max}$** : Principal Eigen Value, la valeur moyenne du vecteur de cohérence.

**RC**: Le rapport de cohérence.

**IR**: l'indice de Ratio, obtenu à partir de l'échelle 1-9 de [Saaty](#).

**n**: nombre de facteurs (les cartes thématiques).

**ANRH**: Agence Nationale des Ressources Hydrique.

**ONM**: Office National de la Météorologie.

# 1 Introduction

L'eau est une ressource essentielle aux besoins fondamentaux de l'homme et à son environnement. Les eaux souterraines constituent une ressource vitale pour satisfaire les besoins en eau douce des collectivités, et bien que l'eau souterraine soit une ressource naturelle dynamique et réapprovisionnant, sa disponibilité est limitée dans les zones aride et semi-arides. C'est parce que l'eau souterraine se produit dans les formations sub-superficielles, ne peut pas être directement vu sur la surface de la terre, c'est une ressource fluctuante difficile à mesurer dans le temps et l'espace (Lee et al., 2012), la mauvaise connaissance de cette ressource, en raison de sa nature cachée et de sa présence dans des formations souterraines, est un grand obstacle à la gestion efficace de cette ressource importante (Nagarajan and Singh, 2009). En outre, La demande accrue d'eau de haute qualité, combinée aux pressions attendues des changements climatiques mondiaux, crée un besoin urgent des méthodologies quantitatives permettant d'évaluer la production d'eau souterraine des aquifères (Oh et al., 2011). Le développement des ressources en eau représente un défi pour les planificateurs et les décideurs dans les pays à forte croissance démographique et à la pénurie d'eau (Al-Bakri and Al-Jahmany, 2013), L'évaluation de la zone potentielle d'eau souterraine pourrait aider au développement et à l'utilisation appropriée des ressources en eau souterraine pour éliminer la pénurie d'eau (Subba Rao, 2006), Les demandes croissantes d'eau douce dans différents secteurs, en particulier à des fins d'abreuvement et d'agriculture, justifient l'identification des zones potentielles d'eau souterraine. Cependant, les outils d'évaluation de la productivité des aquifères n'ont pas été bien établis en Algérie, L'accès à l'eau potable, en particulier dans la zone semi-aride de la plaine de Khemis Miliana, objet de notre étude, est un facteur primordial pour le développement économique, qui améliore le niveau de vie des populations et leur stabilisation. Par conséquent, une gestion et une planification efficaces des eaux souterraines dans cette zone sont de la plus haute importance.

Les approches traditionnelles de l'exploration des eaux souterraines par les forages, l'hydrogéologie, la géologie et la géophysique sont extrêmement coûteuses, et prennent beaucoup de temps et requièrent une main-d'œuvre qualifiée (Todd DK, 1980, Company, 1990, Israil et al., 2006, Jha et al., 2010), La prévision du potentiel des eaux

souterraines à l'aide d'une méthode standard est nécessaire pour la gestion des ressources en eaux souterraines, en particulier dans la plaine de Khemis Miliana où les données sont rares, Les technologies modernes se sont avérées utiles pour l'étude des conditions géologiques, structurelles et géomorphologiques ainsi que pour les levés classiques (Solomon and Quiel, 2006), À cet égard, la technique de système d'information géographique (SIG) ont récemment attiré l'attention de nombreux chercheurs (NOUAYTI et al., 2017), cette technique facilitent l'intégration et l'analyse de grands volumes de données, tandis que les études de terrain aident à valider l'avantage des résultats. L'intégration de système d'information géographique (SIG) avec des autres approches permet de mieux comprendre les caractéristiques contrôlant la présence d'eau souterraine dans les aquifères (Solomon and Quiel, 2006), c'est aussi un outil excellent et utile pour gérer une énorme quantité de données spatiales et peut être utilisé dans le processus de prise de décision dans un certain nombre de domaines tels que l'hydrologie et la gestion de l'environnement (Rahmati et al., 2015).

De nombreux chercheurs ont montré, dans leurs études, que la prise de décision multicritères (MCDM) constitue un outil efficace pour la gestion de l'eau en ajoutant structure, vérifiabilité, transparence et rigueur aux décisions (Machiwal et al., 2011). Récemment, (Hajkowicz and Higgins, 2008) ont suggéré que si la sélection d'une technique MCDM est importante pour la gestion des ressources en eau, une plus grande importance doit être accordée à la structuration initiale d'un problème de décision qui implique le choix de critères et d'options de décision, La processus d'hiérarchie analytique (AHP) de Saaty est une technique MCDM largement utilisée dans le domaine de l'ingénierie des ressources en eau, La méthode a été développée par le professeur Thomas L. Saaty dans les années 1977. Depuis lors, la méthode a reçu de nombreuses applications dans les ressources naturelles, et la planification et la gestion de l'environnement (Machiwal et al., 2011), l'AHP a été acceptée par la communauté scientifique internationale comme un outil très utile pour traiter des problèmes de décision complexes. Son innovation majeure a été l'introduction de comparaisons par paires. Il a été constaté que lorsque les évaluations quantitatives ne sont pas disponibles, les humains sont encore capables de reconnaître si un critère est plus important qu'un autre. L'AHP utilise une méthode cohérente pour convertir ces comparaisons par paire en un ensemble de nombres représentant la priorité relative de

chaque critère (Saaty, 1980), La technique de comparaison par paire représente une approche théoriquement fondée pour calculer des poids représentant l'importance relative des critères. Les pondérations ne sont pas attribuées directement, mais représentent un ensemble de poids « meilleur ajustement » dérivé du vecteur propre de la matrice réciproque carrée utilisée pour comparer toutes les paires possibles de critères (Eastman, 2003), (Chenini et al., 2010) ont montré que l'analyse multicritère basée sur le SIG a une bonne fonctionnalité pour cartographier la zone de recharge des eaux souterraines, Comme on peut le voir dans la littérature susmentionnée, les méthodes SIG et AHP ont été largement jumelées et utilisées dans l'évaluation du potentiel des eaux souterraines.

Le but de cette étude est de contribuer à des études systématiques des eaux souterraines en utilisant l'analyse spatiale, les études de terrain, les systèmes d'information géographique (SIG) et l'analyse de décision multicritère (MCDCA) dans l'évaluation de la zone potentielle des eaux souterraines, et à cet effet, la plaine de Khemis-Miliana de la wilaya d'Ain defla en Algérie du nord a été sélectionnée, Les objectifs spécifiques de la présente étude sont:

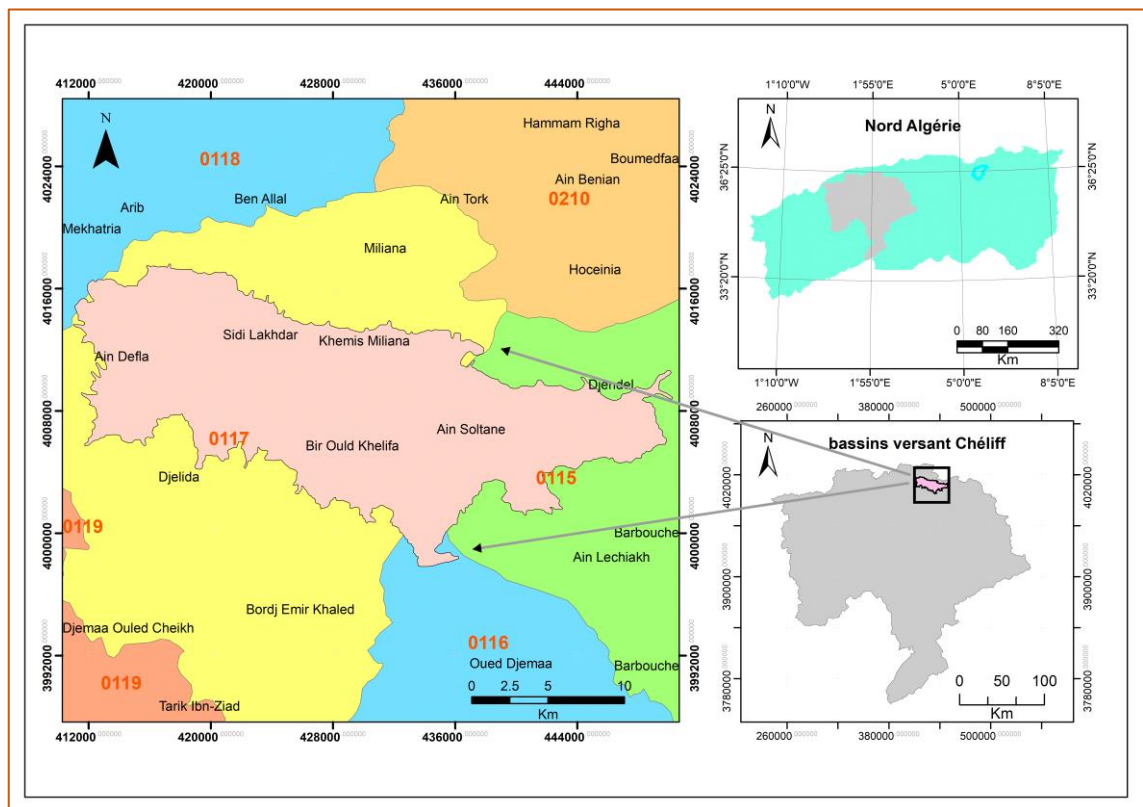
- Préparer des cartes thématiques de la plaine de Khemis Miliana telles que la pente, pédologie (sol), recharge nette, densité de drainage, précipitations, profondeur des eaux souterraines et occupation des sols, par différentes techniques cartographiques.
- Identifier et délimiter les zones potentielles d'eau souterraine grâce à l'intégration de diverses cartes thématiques dans diverses plateformes SIG.

Ce mémoire présente une méthodologie basée sur un système d'aide à la décision qui utilise des données d'enquête de terrain combinées avec SIG pour identifier les zones de ressources en eau souterraine appropriées.

## 2 Présentation générale de la zone d'étude

### 2.1 Localisation et caractéristiques

La plaine de Khemis Miliana appartient aux sous bassins du Haut Cheliff n°: 01-15, 16 et 17, Comme le montre la **Fig. 1**, elle couvre une superficie de 359 Km<sup>2</sup> et un périmètre de 159 Km, caractérisée par une altitude moyenne de 270 m. Elle constitue l'un des plus grands réservoirs d'eau souterraine de la région. Elle est située entre les latitudes (36°18' - 36°6') N et les longitudes (2°-2°27') E, limitée au Nord par le massif du Zaccar (1576 m), et au Sud par les premiers reliefs du l'Ouarsenis, on y pénètre l'Est par le seuil de Djendel, et on en sort l'Ouest par le seuil de Doui ([Meziani and Bong, 2013](#)).



**Fig. 1** Carte de localisation de la zone d'étude

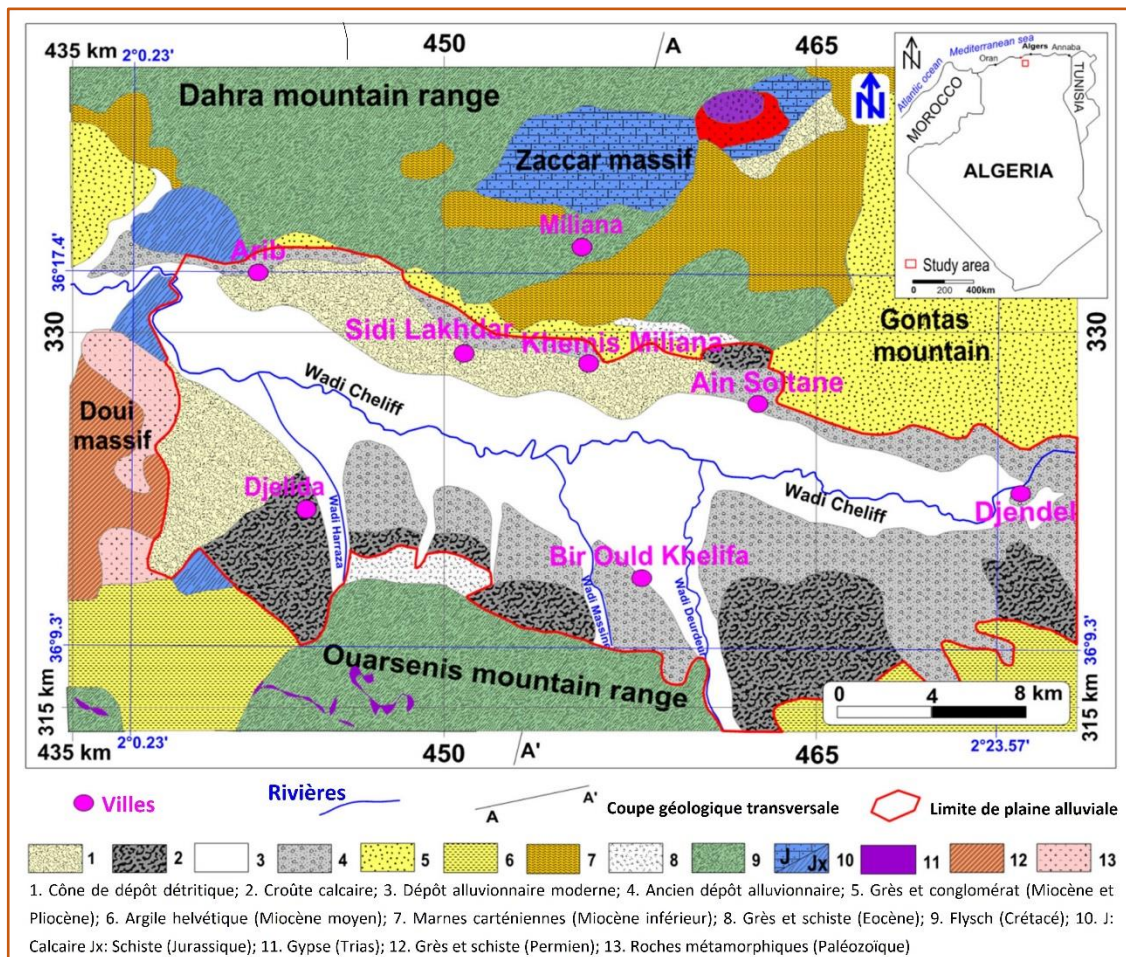
La zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride méditerranéen, avec un été chaud et sec et un hiver froid et pluvieux. La température moyenne annuelle et les précipitations sont de 19 °C et 390 mm, respectivement (1980-2014).

Le réseau hydrographique dans la zone d'étude est dense et le cours d'eau le plus important est l'oued Cheliff. Dans la zone d'étude, il y a trois barrages : Ghrib, Harreza et Deurdeur; ceux-ci contribuent à l'irrigation de la majeure partie de la plaine avec plus de

20.000 ha de terres irriguées. Cependant, les eaux souterraines de aquifère alluvial de la plaine sont principalement utilisées à des fins de consommation, d'irrigation et industrielles (Bouderbala and Gharbi, 2017).

## 2.2 Contexte géologique

La plaine de haut Chélif forme un synclinal d'orientation ouest-est dans l'Atlas Tellien. La succession stratigraphique dans la zone d'étude des formations plus anciennes aux formations récentes est la suivante (Bouderbala and Gharbi, 2017), voir la **Fig. 2** :



**Fig. 2** Carte géologique de la plaine du Haut Cheliff. (Perrodon, 1957).

Le primaire est observé dans le massif de Zaccar et de Doui, et il est formé par l'alternance de schiste noir, d'argile et de quartzite. Il est surmonté par le Trias qui se caractérise par des formations massives de gypse et de dolomite, observées dans la Montagne Ouarsenis. Le Jurassique du massif du Zaccar est représenté par le calcaire, la dolomite et d'autres roches carbonatées. Cependant, les formations jurassiques du massif de Doui sont principalement constituées de calcaire dolomitique. L'épaisseur de



Jurassique peut atteindre 1000 m. Les affleurements crétacés sont observés sur les bords latéraux de la plaine, et ils sont principalement représentés par une haute série de schistes néocomiens d'une épaisseur d'environ 1000 m et un schiste gris alternant avec des bancs de quartzite d'Albain-Aptien, d'une épaisseur proche de 1000 m, et il est suivi par le calcaire jaunâtre du Sénonien. La formation miocène de 300 m d'épaisseur commence par le Miocène inférieur qui est essentiellement formé de marne bleue et d'argile, suivi du Miocène moyen représenté principalement par l'argile, le marne et quelques passages de grès et de conglomérats. Le Mio-Pliocène est formé principalement de calcaire, de grès, de conglomérat et d'argile; On l'observe surtout dans le montagne Gontas, avec une épaisseur d'environ 100 m.

Les formations quaternaires sont principalement représentées par les anciens dépôts alluvionnaires formés de conglomérat et de galets. La croûte calcaire est formée par le tuf calcaire blanchâtre, compact ou pulvérulent ; il est spécialement développé dans la limite sud de la plaine. Les cônes de dépression alluviaux sont développés sur les pentes dans la limite de la plaine. Les dépôts alluviaux récents sont formés de galets, de gravier, d'argile et de limon recouverts d'un sol organique.

### **2.3 Contexte hydrogéologique**

L'aquifère principal de la plaine du Haut-Cheliff est formé de dépôts alluvionnaires, y compris des formations de galets, de gravier, de sable et d'argile, dont l'épaisseur peut atteindre 150 m. C'est un aquifère localement confiné, car il est recouvert de limon et d'argile en surface, de 5 à 20 m d'épaisseur au centre de la plaine. Nord-Est du mont Gontas et au Sud-Est de la ville de Djendel. Dans cette zone, plusieurs puits et forages ont été forés et ont montrés une bonne qualité des eaux souterraines et qui peuvent atteindre 200 m de profondeurs ([Bouderbala, 2017](#)).

Le système aquifère dans cette plaine peut être considéré comme des systèmes aquifères multicouches. La continuité hydraulique entre l'aquifère alluvial et l'aquifère du Mio-Pliocène n'existe que dans les limites de la plaine où il y a un contact entre les deux aquifères sans couche imperméable entre eux ; Cependant, au centre de la plaine, il y a une couche d'argile épaisse entre les deux aquifères. Nous notons ici que nous nous intéressons uniquement à l'aquifère alluvial quaternaire (**Fig. 3**).

Les eaux souterraines de cet aquifère alluvial s'écoulent vers le centre de la plaine où se situe l'axe de drainage principal, qui coïncide avec l'oued Cheliff, avec un écoulement principal d'est en ouest. La profondeur de la nappe phréatique varie de 5 m

dans la zone ouest (près des villes de Djelida et Arib) à 30 m dans la zone est (près de la ville de Djendel), tandis que dans la partie centrale de la plaine la profondeur des nappes phréatiques est d'environ 10 m (Bouderbala and Gharbi, 2017).

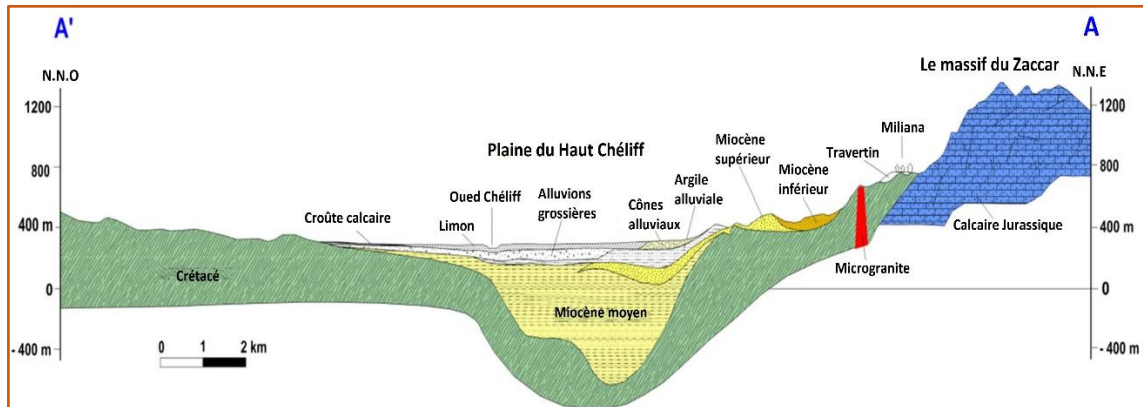


Fig. 3 Coupe géologique A-A' de la plaine du Haut Cheliff. (Perrodon, 1957).

## 2.4 Hydroclimatologie

L'étude climatologique, est très importante pour la connaissance des caractéristiques hydroclimatologiques, elle est indispensable, pour évaluer l'alimentation des ressources hydriques et des réserves souterraines.

L'étude pluviométrique de la plaine de Khemis-Miliana est basée sur les données de quelque station, ces données proviennent de l'ANRH pour une période de 34 ans assurée par ONM (Sahraoui, 2015). Les Fig. 4 et Fig. 5 portent les valeurs moyennes mensuelles (en mm) de la pluviométrie enregistrée pour les neuf stations existant dans la région durant la période allant de 1980 à 2014.

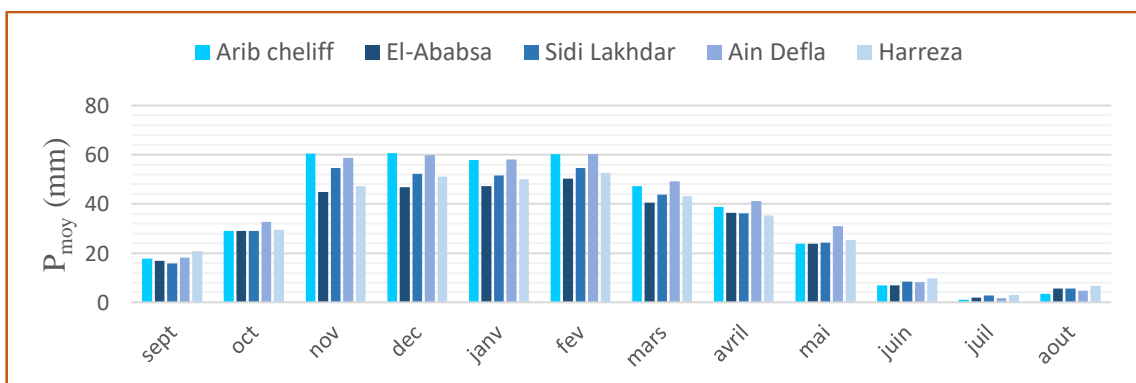
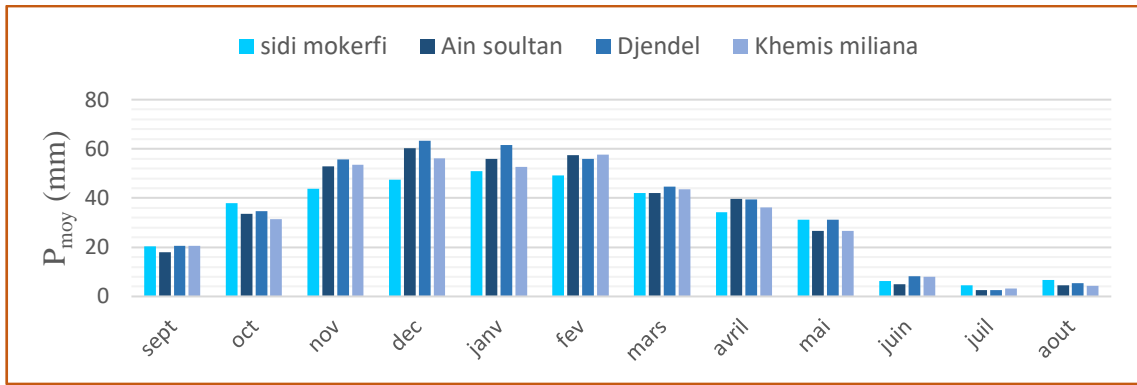


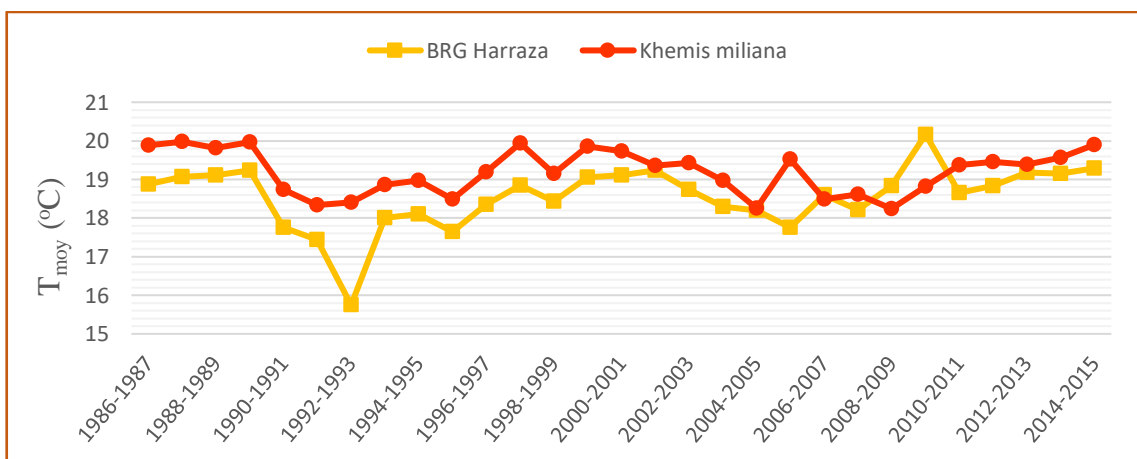
Fig. 4 Répartition mensuelle des précipitations (1980 - 2014) (1).



**Fig. 5** Répartition mensuelle des précipitations (1980 - 2014) (2).

La distribution spatiale des pluies mensuelles suit globalement un gradient décroissant de septembre à aout. Au cours de cette période, les pluies les plus importantes sont enregistrées à l'est et l'ouest de la Plaine. Pendant les mois de novembre, décembre, janvier et février, les hauteurs pluviométriques dépassent les 60 mm sur les stations de Arib Cheliff, Djendel, Ain Soltan et Ain Defla, alors qu'ils atteignent à peine les 10 mm à partir des mois juin, juillet et aout. Ce comportement spatial de la pluviométrie mensuelle au cours de l'année (décrit ci-dessus) montre une division de la période à saison humide (d'octobre à avril), où la pluviométrie atteint le maximal et une saison sèche (allant de juin à la fin de septembre).

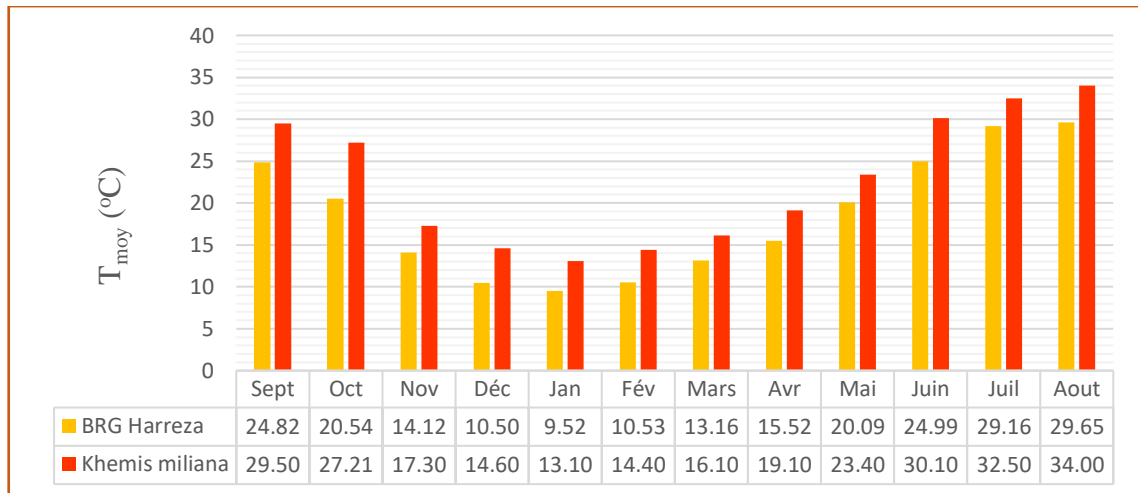
La mesure des températures s'effectue sous abri normalisé à 1.50 m au-dessus du sol, les températures sont saisonnières et leurs variations sont régulières pendant le temps, les seules données qu'on a pu avoir sont celles du barrage Harreza et du poste pluviométrique de Khemis-Miliana (Sahraoui, 2015).



**Fig. 6** Variation spatio-temporelle des températures moyennes annuelles (1980-2014).

L'analyse graphique des températures moyennes annuelles de la période 1980-2014, montre que la Température moyenne annuelle varie à la proximité de 19.98°C dans

la station de Khemis Miliana pour l'année 1987 est 20.17 °C, pour la station de barrage Harreza de l'année 2009, la température minimale atteint 15.75 °C à l'année 1992, et qui correspond à une zone semi-aride. Les températures moyennes mensuelles calculées à partir des mesures portant sur la période de 28 ans d'observation (1986-2014) au niveau des stations du barrage Harreza et Khemis-Miliana sont représentées dans la **Fig. 7**.

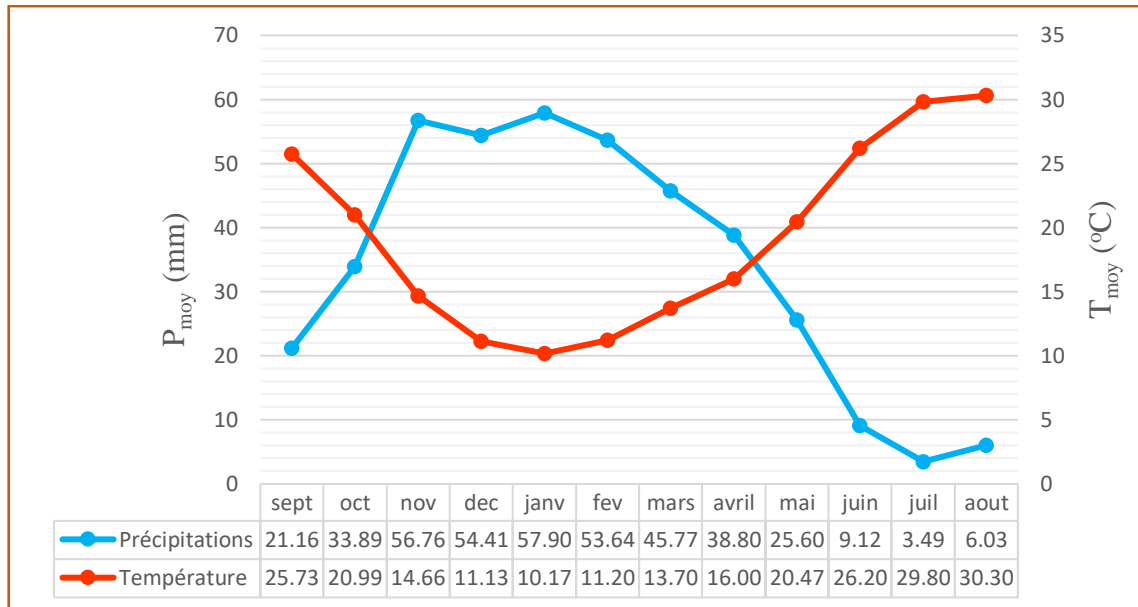


**Fig. 7** Histogrammes de variations des température moyennes mensuelles (1986 - 2014).

L'histogramme de Température moyenne mensuelle au-dessus, montre qu'il existe un pôle chaud allant du mois de mai au mois d'octobre et un autre froid allant du mois de novembre au mois d'avril. La Température maximale atteint les 34.00 °C au mois d'aout et la température minimale atteint les 9.52 °C au mois de février. Après analyse de l'histogramme nous constatons que la température dans la station de Harreza moins élevée par apport station de Khemis Miliana à cause de la présence d'un microclimat causé par les eaux de barrage (Boudjenane and Maarouf, 2015).

Le diagramme ombrothermique de Gaussen permet de calculer la durée de la saison sèche. Il tient compte de la pluviosité moyenne mensuelle qui sont portées sur des axes où l'échelle de la pluviosité est double de la température.

Les variations moyennes mensuelles des températures et des précipitations permettent de distinguer une Période pluvieuse (humide), elle s'étend sur une période d'environ cinq mois, elle commence de la fin d'octobre jusqu'à la fin d'avril et une Période sèche, elle s'étend sur une période d'environ six mois, la fin du mois d'avril jusqu'à fin de mois d'octobre.



**Fig. 8** Diagramme Ombrothermique de Gaussen, station de Khemis (1986 -2014).

## 2.5 Identification des faciès hydrochimiques

L'étude de la chimie des eaux souterraines permet de suivre l'évolution spatiale des différents éléments dissous et identifier leur origine, d'estimer la profondeur de circulation des eaux, et d'apprécier la qualité des eaux vis-à-vis de la potabilité et à l'irrigation.

Plusieurs méthodes ont été définies par divers auteurs pour classer et connaître les différents faciès chimiques des eaux souterraines naturelles.

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les méthodes principales les plus utilisées : la classification de Kurlov, de Stabler, de Schoeller-Berkaloff et celle de Piper. Toutes ces classifications sont basées essentiellement sur la composition élémentaire chimique.

### 2.5.1 Analyse des balances ioniques et contrôle de la cohérence des résultats

La méthode des balances ioniques permet de contrôler la qualité des analyses effectuées sur les éléments majeurs. Cette démarche de validation est un préalable indispensable à la présentation des résultats d'analyse et à leur interprétation.

Le calcul des balances ioniques se fonde sur la relation suivante :

$$NICB = \frac{[\sum Cations - \sum Anions]}{[\sum Cations + \sum Anions]} \times 100 \quad (1)$$

Où:

NICB (Normalized Inorganic Charge Balance): La balance ionique exprimée en pourcentage,

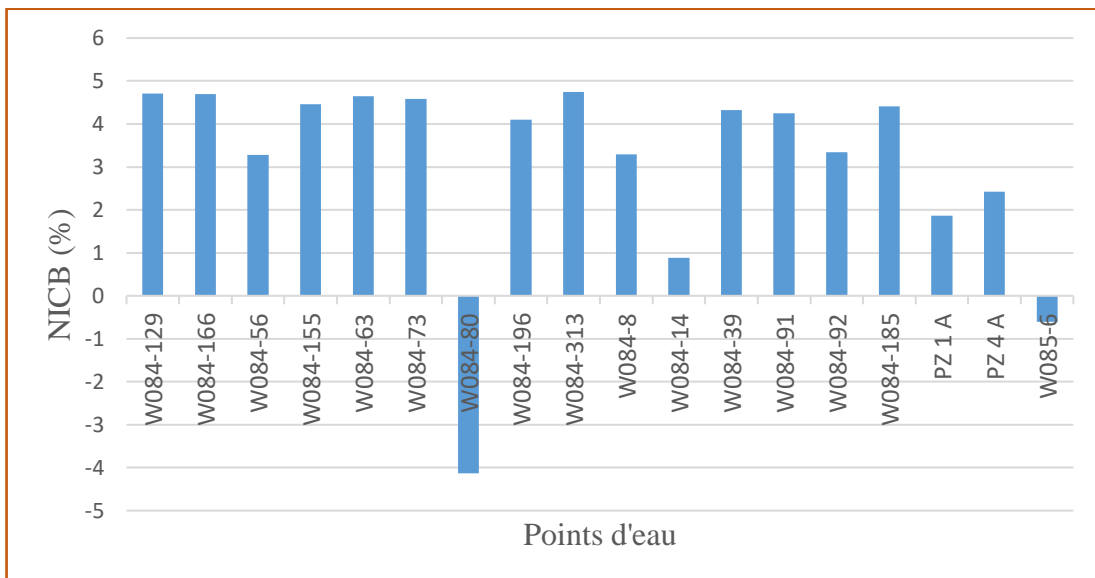
$\Sigma$  Cations : La somme des cations (unités en meq/l),

$\Sigma$  Anions : La somme des anions (unités en meq/l).

Tout écart doit ainsi être interprété comme un biais induit lors de l'analyse. En règle générale, les résultats des analyses sont considérés de la manière suivante.

- ✓  $-1\% < \text{NICB} < 1\%$  : Fiabilité des résultats d'analyses excellente.
- ✓  $-5\% < \text{NICB} < 5\%$  : Fiabilité des résultats d'analyses acceptable.
- ✓  $-10\% < \text{NICB} < 10\%$  : Fiabilité des résultats d'analyses médiocre.
- ✓  $\text{NICB} < 10\%$  ou  $\text{NICB} > 10\%$  : Mauvaise fiabilité des résultats d'analyses.

La **Fig. 9** représente les balances ioniques calculées sur chacun des échantillons d'eau analysés. Les valeurs des balances ioniques calculées sont représentées en ordonnée (unité : %).



**Fig. 9** Représentation des balances ioniques calculées.

Les résultats obtenus sur les calculs des balances ioniques constituent donc un argument en faveur de la fiabilité des données d'analyses sur les éléments majeurs.

### 2.5.2 Classification des eaux d'après Kurlov

La formule de Kurlov est une méthode très utile pour la caractérisation primaire de la composition chimique de l'eau (Zaporozec, 1972), elle est reconnue par la méthode des 'formules caractéristiques chez les francophone'. La composition chimique est exprimée

par une quasi fraction avec des anions majeurs et des cations dans le numérateur et le dénominateur, respectivement. En désignant le type d'eau, seuls les constituants qui représentent plus de 25% du total meq/l sont considérés. La formule de Kurlov peut être utilisée pour la caractérisation de base de la composition de l'eau dans un tableau ou sur des cartes. Il est utile pour la classification générale et comme base pour les méthodes graphiques et l'interprétation ultérieure (Zaporozec, 1972). La composition chimique des eaux souterraines de la région de Khemis Miliana pour l'année 2016 est représentée par la formule de Kurlov:

$$Sp, G, M \frac{\text{anions}}{\text{cations}} T, PH, Q \quad (2)$$

Où: Sp est le composant spécifique en g/l ou mg/l, G est la teneur en gaz en g/l, M est le total des solides dissous (TDS) en g/l,  $\frac{\text{anions}}{\text{cations}}$  est les principaux ions à une concentration supérieure à 10 %, T est la température en °C, Q est le débit de sortie en m<sup>3</sup>/min. les résultats obtenus sont indiqués dans le **Tableau 1** suivant :

**Tableau 1** Faciès chimiques des eaux souterraines dans la plaine de Khemis Miliana pour l'année 2016.

Points d'eaux	XUTM	YUTM	La formule de Kurlov (%)	Faciès
W084-129	413,661	4,011,696	$\frac{SO_4^{33.36} Cl^{31.07} HCO_3^{29.28}}{Ca^{37.82} Mg^{31.18} Na^{29.72}}$	Sulfaté chloruré Bicarbonaté calcique magnésien et sodique
W084-166	415,303	4,009,041	$\frac{HCO_3^{37.76} Cl^{37.39} SO_4^{17.87}}{Ca^{48.91} Na^{32.09} Mg^{19.56}}$	Bicarbonaté chloruré calcique et sodique
W084-56	429,402	4,008,597	$\frac{Cl^{52.49} SO_4^{27.48} HCO_3^{17.40}}{Ca^{40.63} Na^{33.81} Mg^{25.49}}$	Chloruré sulfaté calcique sodique et magnésien
W084-155	428,891	4,004,798	$\frac{Cl^{59.86} SO_4^{25.25} HCO_3^{12.12}}{Na^{67.98} Ca^{20.72} Mg^{11.04}}$	Chloruré sulfaté sodique
W084-63	424,963	4,005,711	$\frac{Cl^{62.65} SO_4^{22.49} HCO_3^{12.86}}{Ca^{37.70} Mg^{33.83} Na^{28.36}}$	Chloruré calcique magnésien et sodique
W084-73	425,965	4,012,708	$\frac{Cl^{42.04} SO_4^{27.50} HCO_3^{26.77}}{Ca^{46.25} Mg^{27.85} Na^{25.65}}$	Chloruré sulfaté Bicarbonaté calcique magnésien et sodique

## Présentation générale de la zone d'étude

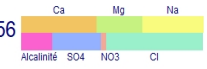
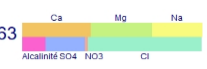
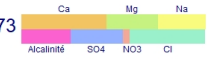
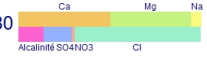
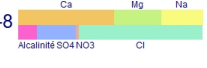
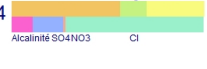
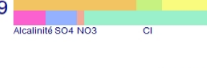
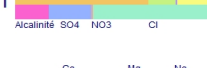
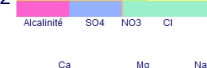
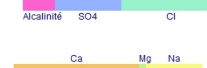

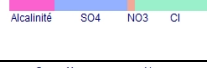
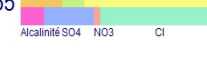
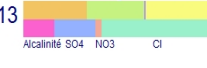
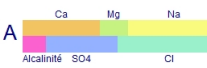



W084-80	421,803	4,009,021	$\frac{Cl^{69.45} SO_4^{14.80} HCO_3^{13.83}}{Ca^{49.47} Mg^{44.05}}$	Chloruré calcique et magnésien
W084-196	420,426	4,016,375	$\frac{HCO_3^{40.98} Cl^{31.71} SO_4^{25.60}}{Ca^{51.06} Na^{24.64} Mg^{24.16}}$	Bicarbonaté chloruré sulfaté calcique
W084-313	416,767	4,013,287	$\frac{Cl^{59.08} SO_4^{21.69} HCO_3^{16.36}}{Na^{35.53} Ca^{33.32} Mg^{30.06}}$	Chloruré sodique calcique et magnésien
W084-8	435,196	4,006,529	$\frac{Cl^{67.46} SO_4^{20.61} HCO_3^{10.29}}{Ca^{52.35} Mg^{24.66} Na^{22.96}}$	Chloruré calcique
W084-14	435,360	4,004,578	$\frac{Cl^{72.51} SO_4^{15.54} HCO_3^{10.78}}{Ca^{55.75} Na^{29.77} Mg^{14.45}}$	Chloruré calcique et sodique
W084-39	434,412	4,011,731	$\frac{Cl^{63.96} HCO_3^{16.44} SO_4^{15.66}}{Ca^{61.45} Na^{25.50} Mg^{13.03}}$	Chloruré calcique et sodique
W084-91	420,417	4,013,375	$\frac{Cl^{60.30} SO_4^{22.07} HCO_3^{16.78}}{Ca^{67.43} Na^{17.65} Mg^{14.39}}$	Chloruré calcique
W084-92	420,370	4,014,375	$\frac{Cl^{45.28} HCO_3^{27.42} SO_4^{26.45}}{Ca^{52.81} Na^{34.07} Mg^{13.06}}$	Chloruré Bicarbonaté Sulfaté calcique et sodique
W084-185	429,954	4,009,245	$\frac{Cl^{49.39} SO_4^{34.49} HCO_3^{15.77}}{Ca^{41.18} Mg^{38.42} Na^{20.10}}$	Chloruré sulfaté calcique et magnésien
PZ 1 A	441,499	4,007,509	$\frac{Cl^{47.68} SO_4^{24.13} HCO_3^{23.94}}{Ca^{66.73} Na^{29.50}}$	Chloruré calcique et sodique
PZ 4 A	425,705	4,009,359	$\frac{Cl^{51.10} SO_4^{36.12} HCO_3^{12.33}}{Na^{46.00} Ca^{39.49} Mg^{14.21}}$	Chloruré sulfaté sodique et calcique
W085-6	444,602	4,008,275	$\frac{Cl^{39.51} SO_4^{35.08} HCO_3^{21.62}}{Ca^{54.35} Mg^{22.85} Na^{22.69}}$	Chloruré sulfaté calcique

### 2.5.3 Classification des eaux d'après Stabler

Cette classification permet de connaître les différents faciès chimiques des eaux, où nous avons convertir les masses pondérales de chaque élément en (meq/l), puis on réduit ces derniers en pourcentage (%) du nombre total du (meq/l). On classe par ordre de grandeur, d'abord les anions, ensuite des cations. Suite à ce classement, nous définissons les eaux en trois familles (**Tableau 2**).



**Tableau 2** Classification de Stabler des échantillons d'eaux souterraines.

Faciès chimique	Sous famille	%	%
Chloruré	Chloruré calcique	67	<p>W084-56 </p> <p>W084-63 </p> <p>W084-73 </p> <p>W084-80 </p> <p>W084-8 </p> <p>W084-14 </p> <p>W084-39 </p> <p>W084-91 </p> <p>W084-92 </p> <p>W084-185 </p> <p>PZ 1 A </p> <p>W085-6 </p>
	Chloruré sodique	17	<p>W084-155 </p> <p>W084-313 </p> <p>PZ 4 A </p>
Bicarbonaté	Bicarbonaté calcique	11	<p>W084-166 </p> <p>W084-196 </p>
Sulfaté	Sulfaté calcique	5	<p>W084-129 </p>

A partir de la formule caractéristique de Stabler et en tenant compte de l'anion prédominant dans les eaux, nous obtenons trois principaux faciès chimiques, qui sont:

✓ **Faciès chloruré :**

C'est le faciès dominant. Il occupe la majeure partie de la plaine avec quinze points d'eau sur 18. Ce faciès se subdivise en deux sous familles :

- Sous famille chloruré calcique : douze échantillons,
- Sous famille chloruré sodique : trois échantillons,

✓ **Faciès bicarbonaté :**

Ce faciès couvre une grande partie de la plaine. Sur 18 échantillons analysés deux entrent dans ce type de faciès, qui se subdivise à une seule sous familles :

- Sous famille bicarbonaté calcique : deux échantillons,

✓ **Faciès sulfaté :**

Ce faciès est moins fréquent avec un échantillon représentatif donnant la sous famille sulfaté calcique.

#### **2.5.4 Classification des eaux d'après Schoeller-Berkaloff**

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs échantillons d'eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points qui représentent les différents éléments chimiques. Selon Schoeller-Berkaloff (1955), on peut classer les eaux suivant l'importance d'abord des cations et ensuite des anions, voir **Fig. 10**.

La représentation graphique des analyses des eaux selon ce diagramme semi-logarithmique nous indique que la majorité des eaux analysées présentent des maximas au niveau des pôles (Na+K) et Cl, les eaux de faciès Chloruré Calcique présentent un grand pourcentage d'échantillons. En deuxième ordre le faciès Chlorurés Sodique c'est le plus dominant. Les fortes concentrations en chlorures indiquent un état de pollution en rapport avec les activités anthropiques.

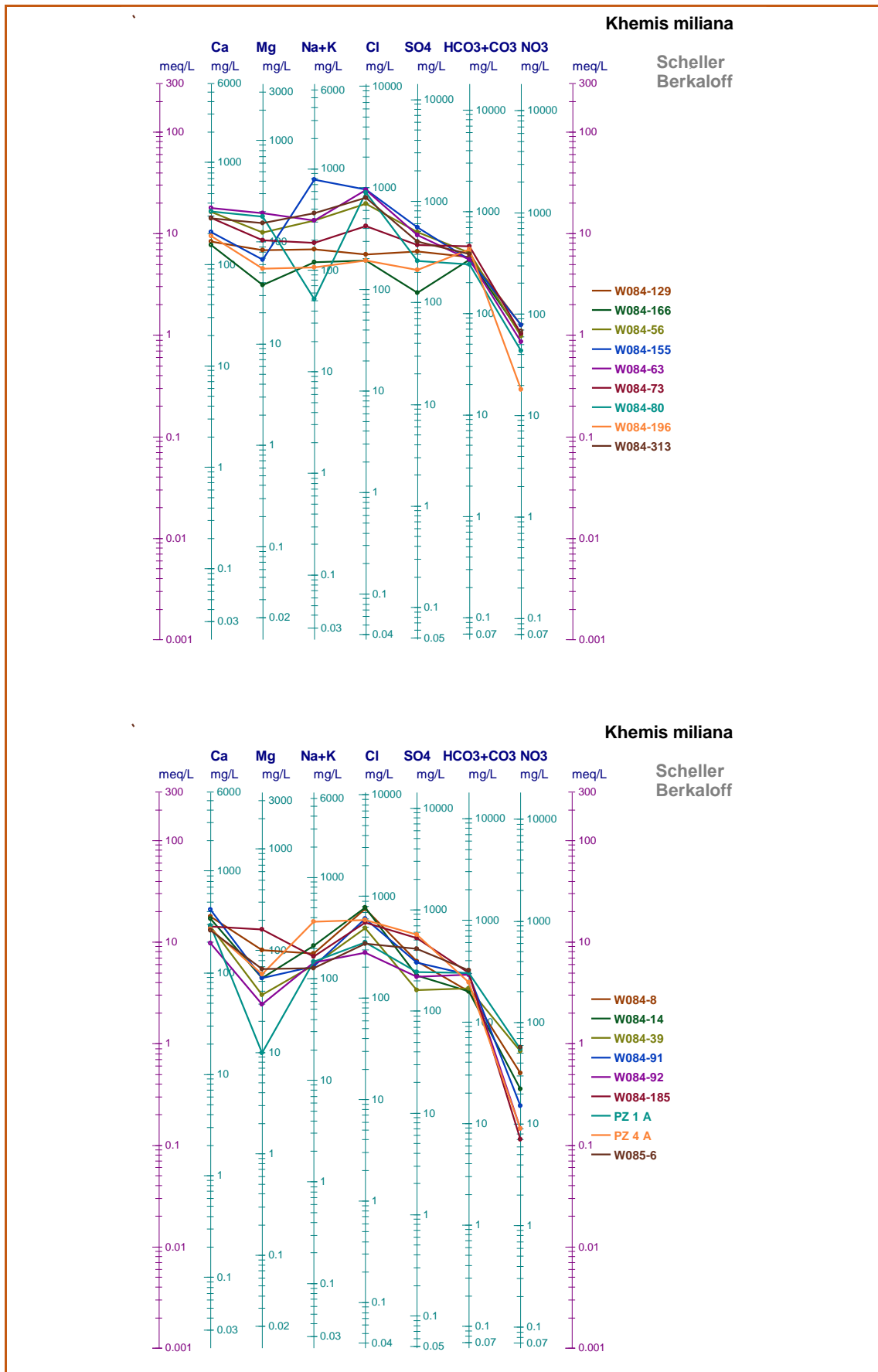
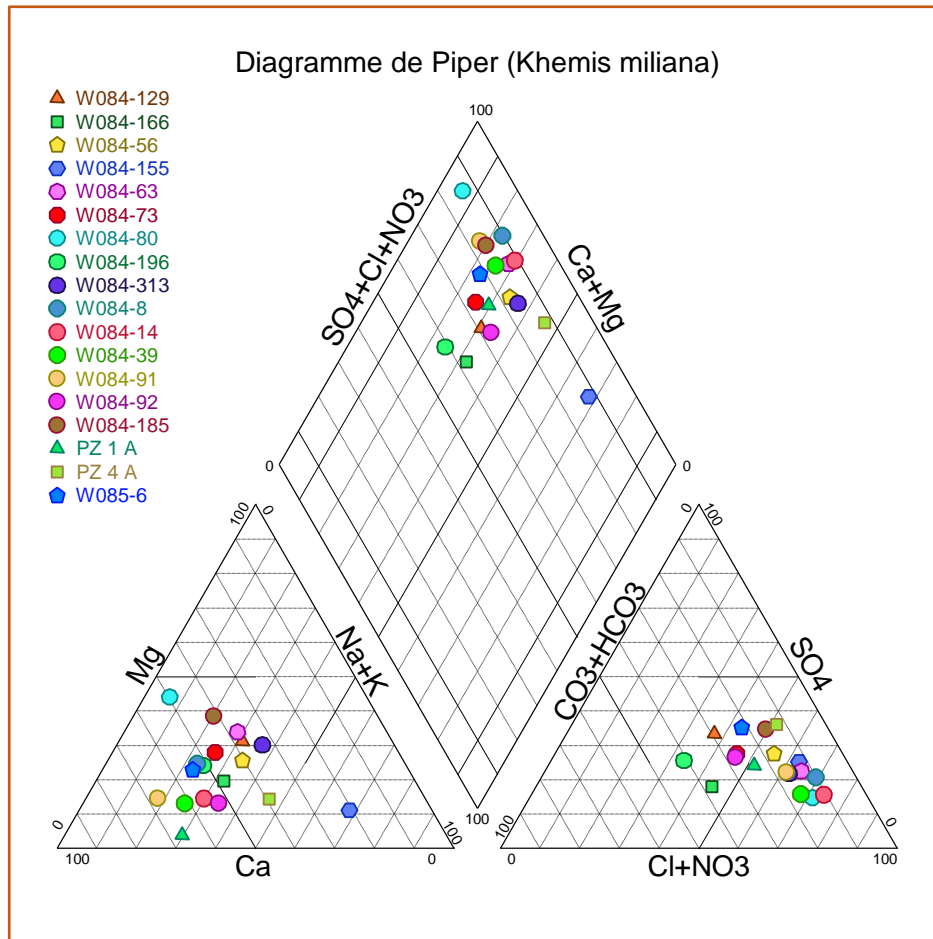


Fig. 10 Diagrammes de Schoeller-Berkaloff , Année 2016.

### 2.5.5 Classification des eaux d'après Piper

Le diagramme de Piper permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Le principe consiste à représenter dans chaque triangle équilatéral les quantités en réaction par rapport à la concentration totale des anions et des cations, on obtient ainsi deux points représentatifs indiquant la dominance d'un anion ou d'un cation (**Fig. 11**).



**Fig. 11** Diagrammes de Piper, Année 2016.

La représentation des point d'eau sur le diagramme triangulaire de PIPER pour la périodes Mai 2016, montre la tendance vers le pole calcique dans le sous triangle des cations, alors que les anions montrent une dominance Chloruré. Le diagramme global fait ressortir les faciès : Chlorurée et sulfatée calcique et sodique en plus de Bicarbonaté Calcique.

## **3 Matériels et méthodes**

### **3.1 Collecte de données et génération des cartes thématiques**

Un ensemble de données multi-paramétriques comprenant des données satellites, des cartes vectorielles, raster, tabulaires et des données de terrain ont été utilisées dans cette étude pour délimiter les zones potentielles d'eau souterraine. Sept couches thématiques (occupation des sols, pente, pédologie, densité de drainage, recharge nette, précipitations et profondeurs des eaux souterraines) ont été prises en compte dans cette étude.

Ces couches thématiques ont été converties en format raster, conservant la même résolution (résolution spatiale 28 m) et système de coordonnées UTM (WGS-84, zone 31N). Le logiciel ArcGis (version 10.5) a été utilisé respectivement pour l'analyse et le traitement d'image dans le cadre numérique. La méthodologie globale adoptée pour la présente étude est illustrée à la **Fig. 12**.

#### **3.1.1 Pédologie (Pd)**

Le sol est l'un des principaux facteurs qui déterminent la quantité d'eau souterraine, l'étude du sol permet de connaître les types et comme ses les propriétés. Le mouvement des eaux souterraines et l'infiltration d'eau de surface dans le sol sont basés sur la porosité et la perméabilité du sol. Par conséquent, l'étude du sol est importante pour déterminer la quantité d'eau souterraine de n'importe quel endroit ([Mahalingam and Vinay, 2015](#)). La carte des sols de la zone d'étude a été obtenue à partir d'une carte traditionnelle également été scannée, rectifiée, vectorisée puis classée cartographiquement en sept entités polygonales et converties au format Raster à l'aide du logiciel ArcGis pour obtenir la carte numérique des sols, voir la **Fig. 13**.

#### **3.1.2 Densité de drainage (Dd)**

Le système de drainage d'une zone est déterminé par le gradient de pente, la nature et l'attitude du substrat rocheux, le type de végétation, la capacité d'absorption des précipitations, l'infiltration et le gradient de pente ([Manap et al., 2013](#)). La densité de drainage est une fonction inverse de la perméabilité et; par conséquent, c'est un paramètre important dans l'évaluation de la zone d'eau souterraine ([Kumar and Krishna, 2018](#)). La carte de densité de drainage est générée par le traitement du Modèle numérique de terrain de la région, ce MNT de 28 m de résolution, le réseau hydrographique a été ordonné en

exécutant l'algorithme de Strahler, module intégré dans la plateforme ArcGis, Voir la **Fig. 15**.

La densité de drainage (Dd) a également été calculée sur la base de la méthode de la densité de lignes. En utilisant l'équation suivante :

$$Dd = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{Di}{A} (km^{-1}) \quad (3)$$

Où, Di représente la longueur totale de tous les flux (km) et A représenté la surface de la plaine (km<sup>2</sup>).

La carte densité de drainage a été préparée et dérivée après plusieurs processus successifs à l'aide d'outils Arc Hydro qui fonctionne avec l'algorithme de densité de lignes dans l'environnement ArcGis.

### 3.1.3 Précipitations (Pr)

La disponibilité des précipitations est parmi les principales sources de recharge des eaux souterraines. Elle régule la quantité d'eau qui serait disponible pour percoler dans l'aquifère. Les précipitations ont un effet significatif sur le potentiel des eaux souterraines (Kumar and Krishna, 2018).

Sur la base des enregistrements mensuels des huit stations météorologiques pour 30 ans (1985-2015). La couche thématique des précipitations (**Fig. 16**) développée à l'aide de la méthode d'interpolation spatiale IDW (Inverse Distance Weighting). La distribution spatiale des précipitations dans la zone d'études est générée sous un Raster, pixelisé de 30m en résolution spatiale.

### 3.1.4 Profondeur des eaux souterraines (Prof)

Le niveau piézométriques des eaux souterraines de la zone d'étude est surveillé pour un réseau piézométrique de points d'eau (forages et puits) réparti dans la plaine et pour une fréquence de mesure faible (semi-annuelle). la carte de la profondeur moyenne des eaux souterraines a été préparée à l'aide des données recueillies durant les années 2010 à 2016 auprès de l'ANRH, La méthode d'interpolation spatiale par l'algorithme IDW a été utilisée pour créer et cartographier la carte des profondeurs des eaux souterraines, voir la **Fig. 17**.

### 3.1.5 Recharge nette (Rn)

La recharge nette représente la quantité d'eau par unité de surface de terre qui pénètre dans la surface du sol et atteint la nappe (Aller et al., 1987). La méthode utilisée pour développer la carte de recharge nette des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana est celle de Williams et Kissel (1991). Cette méthode a été adoptée pour l'évaluation de la recharge nette dans de nombreuses régions semi-arides aux États-Unis et elle a été appliquée et vérifiée en Tunisie dans les eaux souterraines Metline (Gaieb and Hafedh Hamza, 2013).

La recharge nette (Rn), est calculée selon cette méthode avec les équations suivantes correspondant aux différents groupes de sols hydrologiques (HSGs) :

$$Rn = (P - 10.28)^2 / (P + 15.43) \text{ pour le groupe de sols hydrologiques A.} \quad (4)$$

$$Rn = (P - 15.05)^2 / (P + 22.57) \text{ pour le groupe de sols hydrologiques B.} \quad (5)$$

$$Rn = (P - 19.53)^2 / (P + 29.29) \text{ pour le groupe de sols hydrologiques C.} \quad (6)$$

$$Rn = (P - 22.67)^2 / (P + 34.00) \text{ pour le groupe de sols hydrologiques D.} \quad (7)$$

Rn est la recharge nette et P les précipitations annuelles en pouces.

Les quatre groupes hydrologiques A, B, C et D correspondent aux types de sols classés en fonction de leur infiltration:

- Groupe hydrologique A: sols ayant des taux d'infiltration élevés même s'ils sont complètement humides. Ils se composent principalement de sols profonds à trop drainés, formés de sable ou de gravier. Ces sols sont caractérisés par des taux de transmission d'eau élevés.
- Groupe hydrologique B: sols à vitesses d'infiltration moyennes lorsqu'ils sont complètement humides. Ils sont moyennement profonds à profonds, modérément bien égouttés et ont une texture modérément fine à modérément grossière. Leurs vitesses de transmission de l'eau sont moyennes.
- Groupe hydrologique C: sols à faible taux d'infiltration lorsqu'ils sont complètement humides. Ils sont principalement constitués de sols formés de couches imperméables, la texture est modérément fine à fine. Leurs taux de transmission de l'eau sont faibles.
- Groupe hydrologique D: Sols ayant des taux d'infiltration très faibles lorsqu'ils sont complètement humides. Ces sols sont essentiellement constitués d'argile gonflante,

de sols avec des couches d'argile peu profondes ou souterraines et de sols peu profonds situés sur des matériaux imperméables. Leurs taux de transmission de l'eau sont très faibles.

Les valeurs des précipitations ont été obtenues à partir de huit stations météorologiques situées dans et la proximité de la zone d'étude. Les valeurs ont été prises de la période 1985-2015. L'emplacement de chaque station a été tracé dans une couche de points, puis les valeurs de précipitations ont été interpolées par la méthode IDW. Les groupes de sols hydrologiques sont issus de la carte des sols de la zone d'étude (carte pédologique de la plaine d'affreville (Boulaine)). Les données sont en mode vectoriel polygonal sous forme d'un shapefile. Cette source contient les informations sur la texture du sol nécessaires pour délimiter les GSHs. La carte de recharge nette de la zone d'étude a été dérivée en mode raster en appliquant les formules de William et Kissel.

### **3.1.6 Occupation des sols (Os)**

Les études sur l'utilisation des terres (Land Use) et la couverture terrestre (Land Cover) fournissent des indicateurs importants de l'étendue des besoins en eaux souterraines et de l'utilisation des eaux souterraines, ainsi, la carte d'occupation /Utilisation du sol représente un indicateur important du choix des sites de recharge artificielle des eaux souterraines (Singh et al., 2011). L'utilisation des terres et la couverture des sols jouent un rôle essentiel dans la prospection des eaux souterraines. Elles affectent le taux de recharge, le ruissellement et l'évapotranspiration. La carte d'occupation des sols préparée à partir de données de télédétection (images satellitaires) à l'aide d'une classification supervisée dans le logiciel ArcGis avec vérification sur le terrain.

### **3.1.7 Pente (Pt)**

La pente topographique affecte profondément le ruissellement, la recharge et le mouvement des eaux de surface d'une zone. Les zones à topographie plane ont une recharge d'eau souterraine 'magnifique' avec un taux d'infiltration relativement élevé, tandis que les zones à pentes modérées ont un 'bon' stockage d'eau souterraine dû au terrain vallonné. Les zones avec une pente plus abrupte sont classées comme 'pauvres' en raison de l'accumulation moindre d'eau souterraine (Kumar and Krishna, 2018) en raison du ruissellement relativement élevé et de faible taux d'infiltration. La carte de pente de la zone d'étude (Fig. 20) a été préparée à l'aide d'un Modèle numérique d'élévation-ASTER DEM, L'extension d'analyse de terrain sous ArcGis basée sur les rasters est



utilisée pour calculer la pente, l'aspect, l'ombrage, le relief d'un modèle numérique d'élévation (DEM). Sa facilité d'utilisation et son interface graphique intuitive nous a permis de créer de nouvelles couches raster de Pente, le Calcul de l'angle de la pente pour chaque pixel de Raster d'altitudes en degrés est basé sur une estimation dérivée de 1er ordre.

### 3.2 Analyse de décision multicritères (MCDA)

MCDM ou MCDA sont des acronymes bien connus pour la prise de décision à critères multiples et l'analyse de décision à critères multiples. Le MCDM s'intéresse à la structuration et à la résolution des problèmes de décision et de planification impliquant des critères multiples. Le but est d'aider les décideurs confrontés à de tels problèmes. Typiquement, il n'existe pas de solution optimale unique pour de tels problèmes et il est nécessaire d'utiliser les préférences du décideur pour différencier les solutions (Majumder, 2015).

Le processus d'analyse décisionnelle multicritères (MCDA) peut fournir la solution optimale dans laquelle les incertitudes associées aux critères d'évaluation sont classées en fonction de la performance globale des diverses options de décision d'entrée par rapport aux objectifs multiples, pour les caractéristiques complexes, floues et linguistiques (Aher et al., 2013). Les méthodes MCDA peuvent être largement divisées en méthodes multi-objectives ou multi-attributs et sont principalement concernées par les façons de combiner plusieurs critères pour former un seul indice d'évaluation (Malczewski, 2004). Dans les MCDA, chaque critère est donné un poids (weight) pour représenter son importance réelle dans le phénomène (Chow and Sadler, 2010). L'intégration des méthodes SIG et MCDA fournit de puissantes fonctions d'analyse spatiale.

Le processus hiérarchique analytique (AHP) est une méthode de MCDA basée sur une approche subjective dans laquelle les poids (weights) sont attribués par comparaison par paires entre différents critères obtenus par les politiques des décideurs (Saaty, 1980). La méthode du processus de hiérarchie analytique (AHP) calcule les poids requis associées aux couches de cartes de critères respectives à l'aide d'une matrice de préférence, dans laquelle tous les critères pertinents identifiés sont comparés les uns par rapport aux autres, après les poids sont agrégés.

L'AHP basé sur le SIG a gagné en popularité en raison de sa capacité à intégrer une grande quantité de données hétérogènes et à obtenir les poids requis de manière relativement directe même pour un grand nombre de critères.

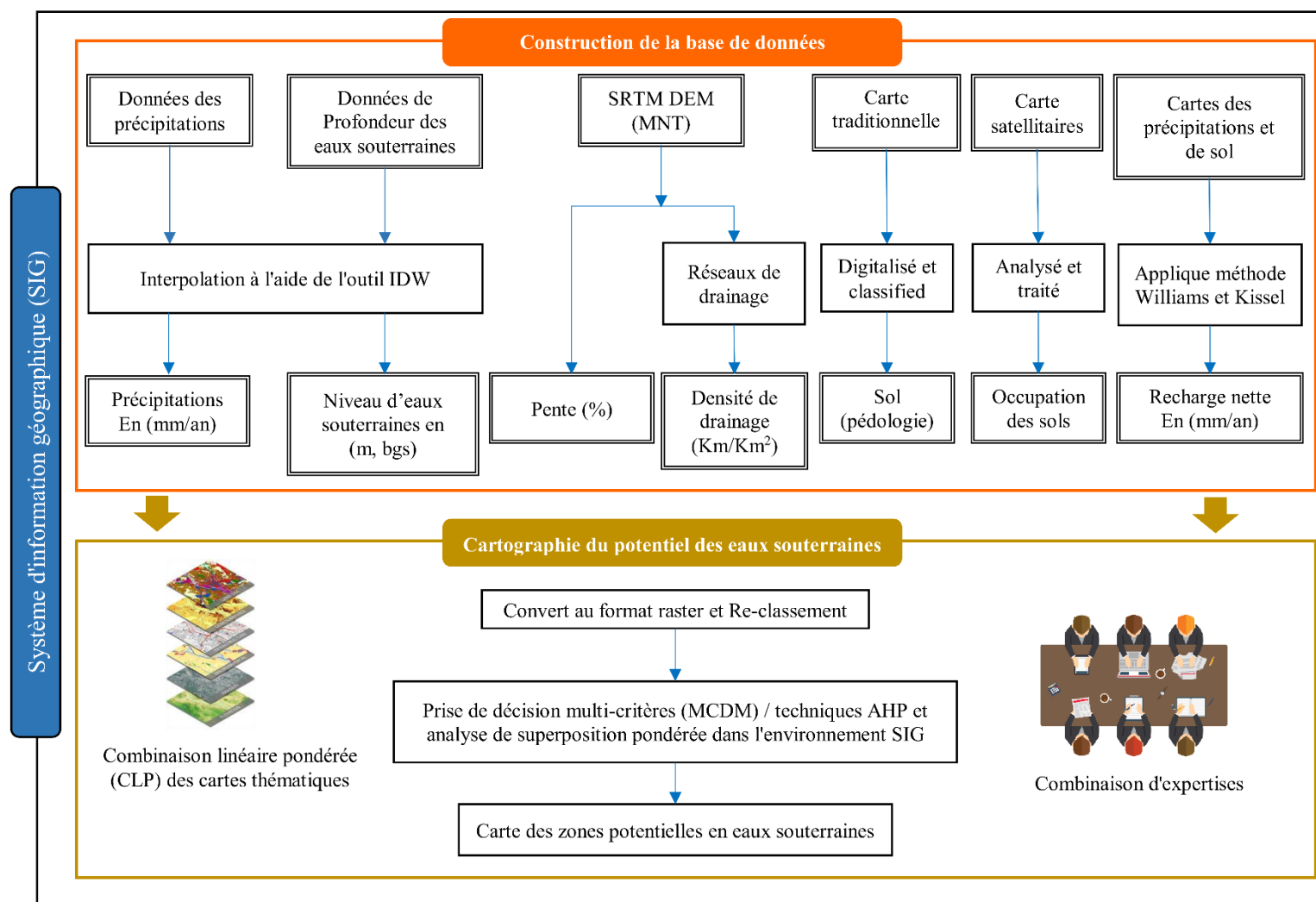


Fig. 12 Organigramme montrant la méthodologie adoptée dans cette étude

## 4 Résultats et discussion

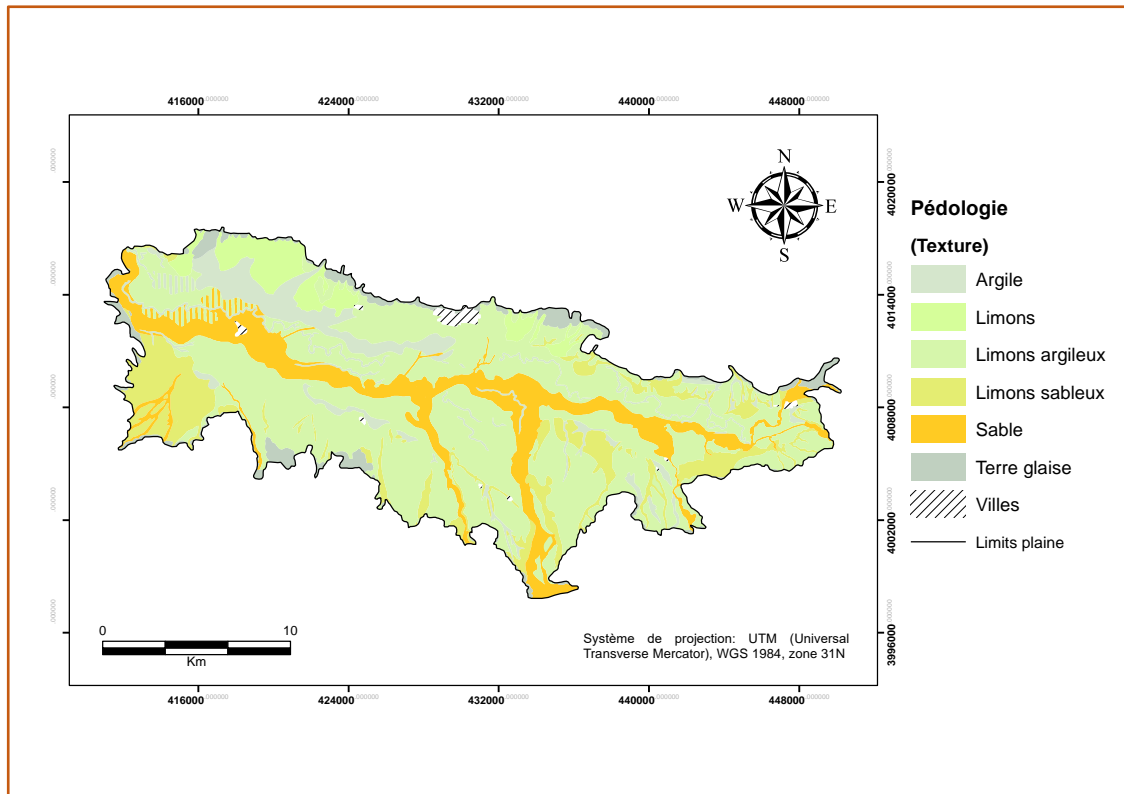
### 4.1 Couches thématiques de Khemis Miliana

Divers facteurs tels que la topographie, la géologie, la géomorphologie, la structure, l'occupation des sols, la pédologie (sol), les précipitations, la densité de drainage, la profondeur des eaux souterraines et leurs interrelations régissent l'occurrence et le mouvement des eaux souterraines (Jaiswal et al., 2003). Pour délimiter les zones potentielles d'eau souterraine, sept facteurs influents, tels que la recharge nette, l'occupation des sols, la pente, la profondeur des eaux souterraines, le sol, la densité de drainage et les précipitations ont été identifiés dans la présente zone d'étude. Les relations de ces facteurs d'influence sont pondérées en fonction de leur importance dans l'occurrence des eaux souterraines. Un facteur avec un poids plus élevé montre un impact plus important et un facteur avec une valeur de poids plus faible montre un impact plus faible sur le potentiel de l'eau souterraine. Les sept paramètres sélectionnés ont été créés en utilisant des techniques SIG et ont été classés en fonction du processus hiérarchique analytique de Saaty. L'intégration de ces facteurs avec leurs poids potentiels ont été appliqués au moyen d'une analyse de superposition pondérée La discussion détaillée de chaque paramètre est discuté ci-dessous :

#### 4.1.1 Pédologie (Pd)

Les principaux types de sol de la zone étudiée sont le limon argileux, le sable, le limon sableux et l'argile, voir **Fig. 13**. La majeure partie de la plaine est dominée par une texture de limon argileux occupant (185.31 km<sup>2</sup>; 51.33%) de la superficie totale, suivie par de sable (59.24 km<sup>2</sup>; 16.41%), de limon sableux (45.70 km<sup>2</sup>; 12.66%) et de textures argileux (33.83 km<sup>2</sup>; 9.37%). La partie restante occupée par des limons (17.92 km<sup>2</sup> ; 4.96%), des terres glaises (16.09 km<sup>2</sup> ; 4.45%) et des villes (2.84 km<sup>2</sup> ; 0.78%).

Leurs poids ont été attribués en fonction de leurs taux d'infiltration correspondants (**Tableau 7**). Le sol limon sableux a reçu une priorité plus élevée parce que le sol sablonneux a un taux d'infiltration élevé, tandis que le sol limon argileux a été assigné à une faible priorité, montrant un faible taux d'infiltration en raison de la proportion plus élevée d'argile.



**Fig. 13** Couche thématique de la texture du sol.

#### 4.1.2 Densité de drainage (Dd)

Plus de poids sont attribués à des zones de faible densité de drainage, alors que les faibles pondérations sont affectées à des zones de densité de drainage très élevée. À partir du point de vue recharge, une faible densité de drainage indique une perméabilité élevée, fréquence de surface de la zone perméable, alors qu'une densité de drainage élevée indique une surface du sol imperméable (développement du réseau par écoulement de surface). En ce qui concerne les occurrences d'eau souterraine, donc une densité de drainage plus élevée est liée à une faible infiltration d'eau au sol, ce qui à son tour conduit à un écoulement de surface plus élevé et vice versa (Jhariya et al., 2016). Les rangs plus élevés sont donc attribués à une région à faible densité de drainage, comme indiqué dans le **Tableau 7**. La densité maximale de drainage était plus que  $2.60 \text{ km/km}^2$ . Sur la base de la densité de drainage, la zone a été classée en cinq groupes:  $> 2.60$  (très élevé),  $2.00-2.60$  (élevé),  $1.45-2.00$  (modéré),  $0.84-1.45$  (faible) et  $0-0.84$  (très faible)  $\text{km/km}^2$ , voir le **Tableau 7**.

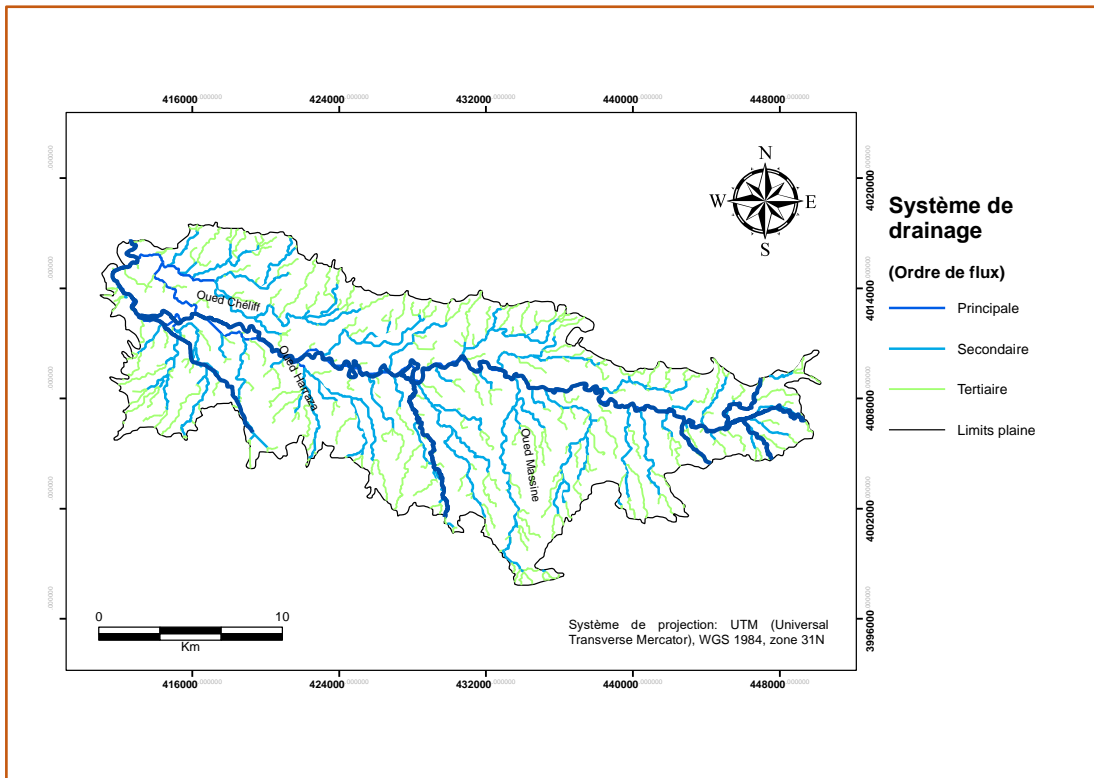


Fig. 14 Carte montrant la répartition de la système de drainage.

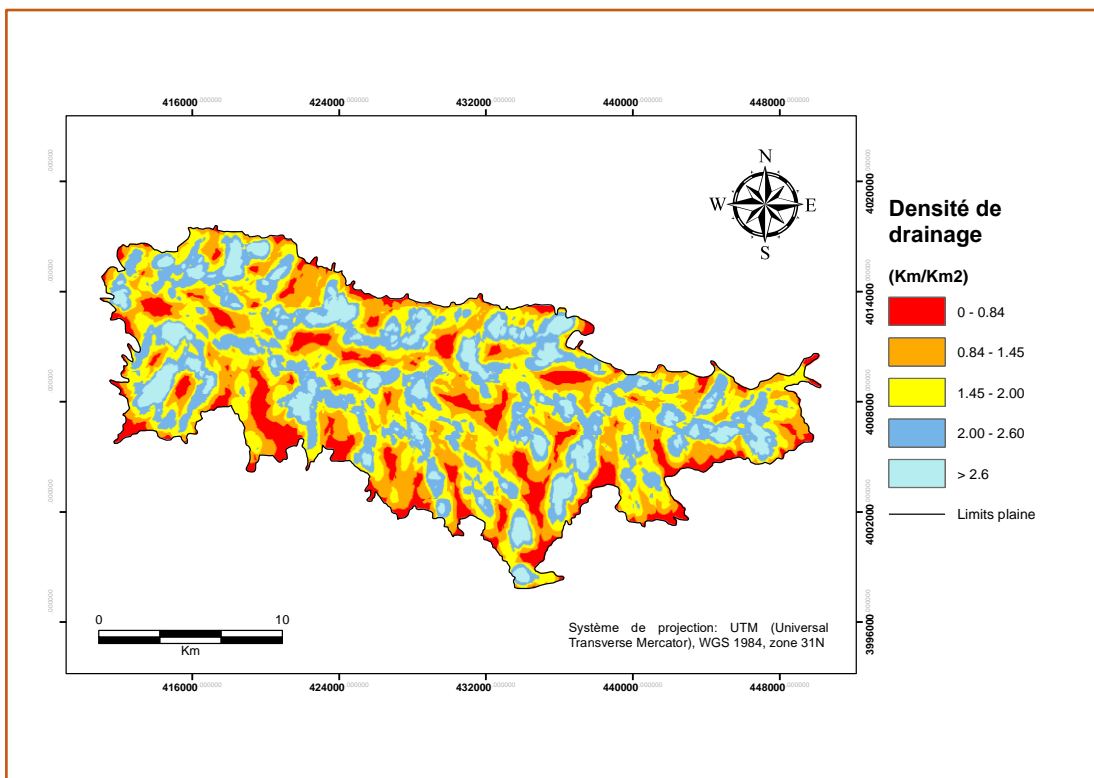
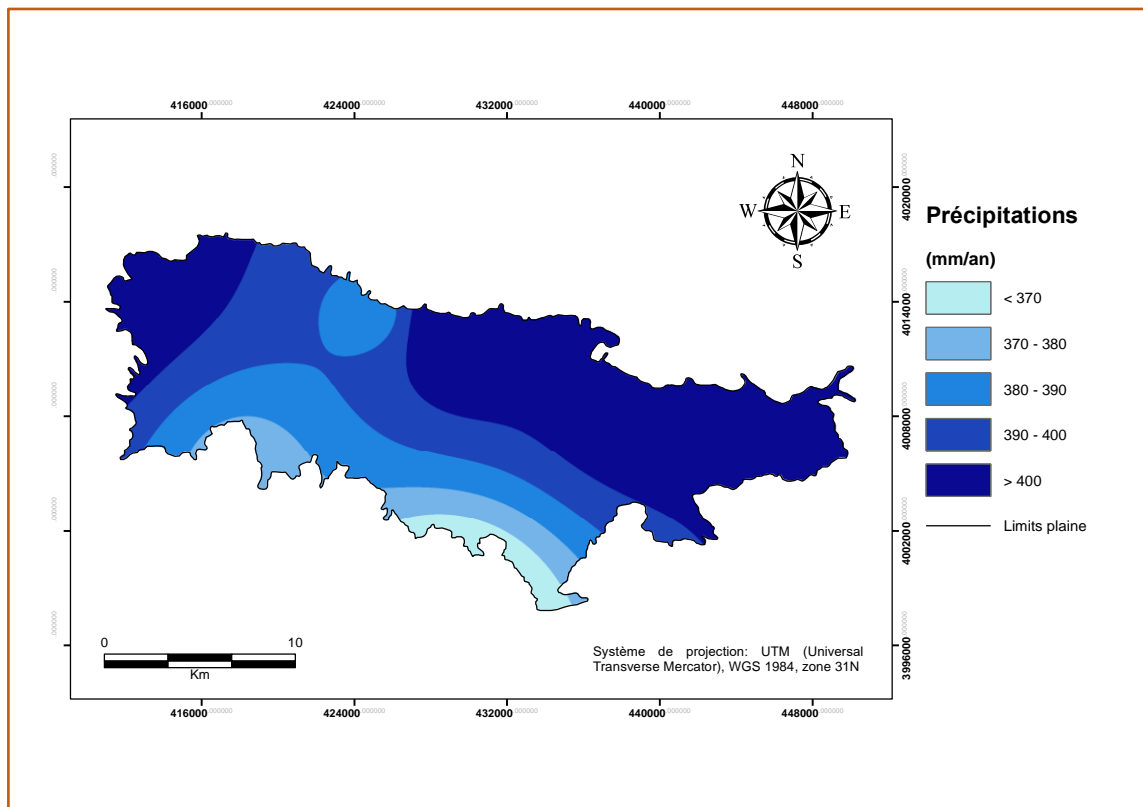


Fig. 15 Couche thématique de la densité de drainage.

### 4.1.3 Précipitations (Pr)

La zone d'étude a été divisée en cinq zones de précipitations: (1) <370 mm/an, (2) 370-380 mm/an, (3) 380-390 mm/an, (4) 390-400 mm/an, et (5) >400 mm/an. La **Fig. 16** montre les faibles précipitations dans la partie sud et centre de la plaine, les fortes précipitations dans les parties nord-est et nord-ouest de la plaine. La majeure partie de la zone d'étude a une pluviométrie annuelle moyenne de 390-400 mm/an. Le poids normalisé et le rang des diverses classes de précipitations ont été fournis dans le **Tableau 7**.



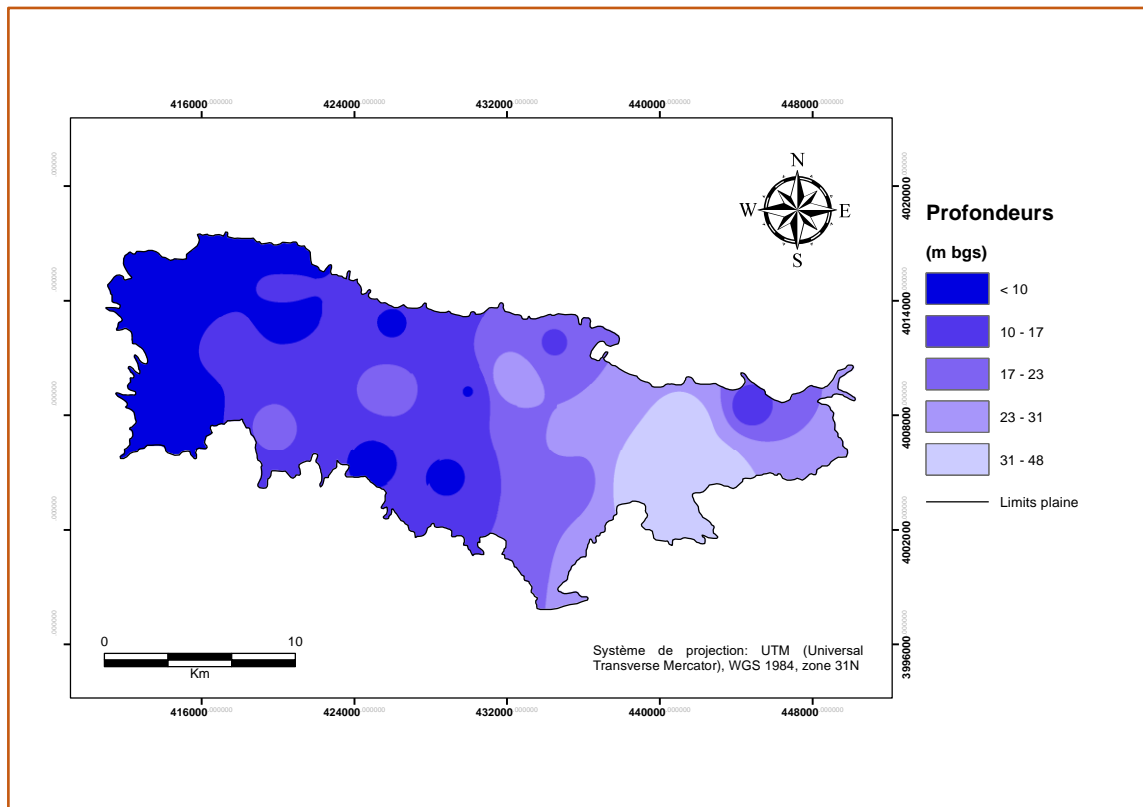
**Fig. 16** Couche thématique des précipitations.

### 4.1.4 Profondeur des eaux souterraines (Prof)

En général, la profondeur du niveau d'eau variait entre 10 et 48 m dans la zone d'étude. La carte des niveaux des eaux souterraines a été classée en fonction de l'occurrence des eaux souterraines dans l'aquifère en cinq catégories: eaux souterraines très peu profondes variant entre 10 et 17 m, eaux souterraines peu profondes entre 17 et 23 m, eaux plus profondes entre 23 et 31 m et niveau d'eau très profond entre 31 et 48 m (il faut noter que

ce classement ne tient pas compte le classement international de l'AIH, un classement d'ordre caractéristique régional), voir la **Fig. 17**.

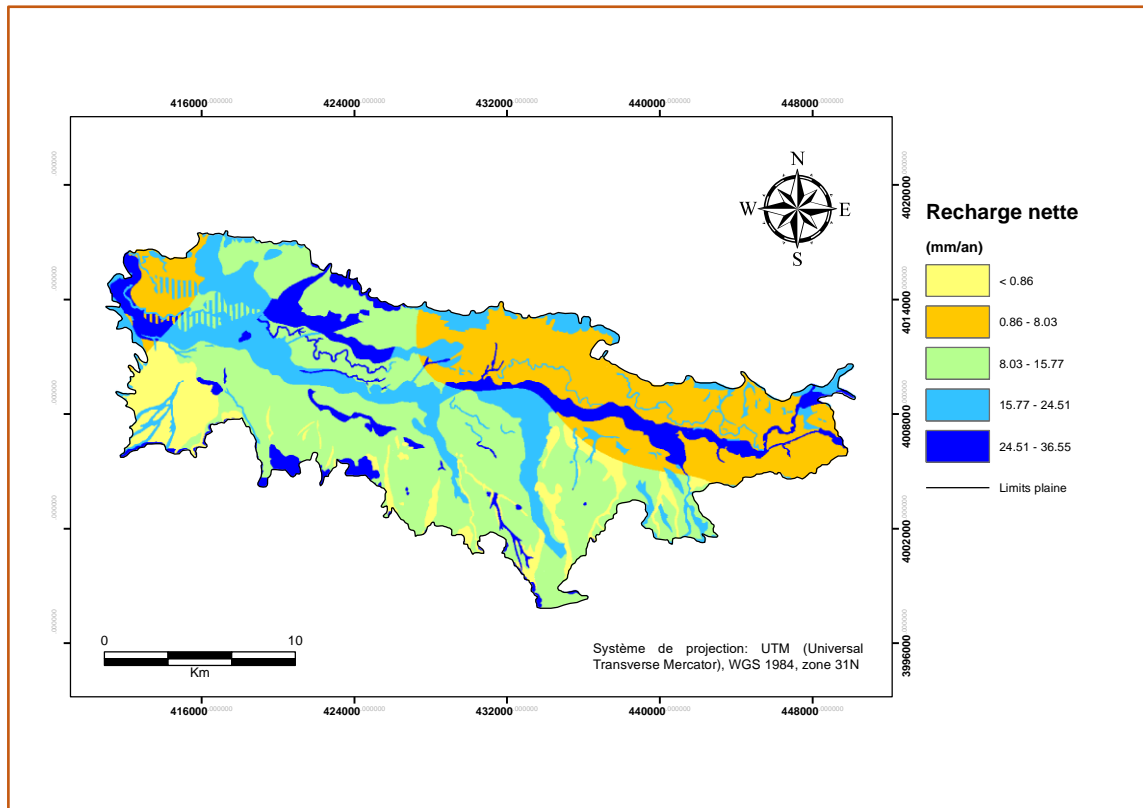
Dans la partie est de la zone, la profondeur moyenne des eaux souterraines varie de 23 à 48 m. En revanche, dans les parties nord-ouest et centrale, et à certains points de dispersion dans le sud, la profondeur moyenne des eaux souterraines varie entre 10, 17 jusqu'au 23 m.



**Fig. 17** Couche thématique de profondeur des eaux souterraines.

### 4.1.5 Recharge nette (Rn)

La recharge nette annuelle moyenne des eaux souterraines dans la zone d'étude varie de 0,86 à 36.55 mm/an. Sur la base de ces estimations de recharge, la zone peut être divisée en cinq zones de recharge: (1) <0.86 mm/an, (2) 0.86-8.03 mm/an, (3) 8.03-15.77 mm/an, (4) 15.77-24.51 mm/an, et (5) 24.51-36.55 mm/an comme le montre la **Fig. 18**. Il ressort de cette figure qu'un taux de recharge nette 0.8 à 0.16 mm/an est dominant dans la plaine.

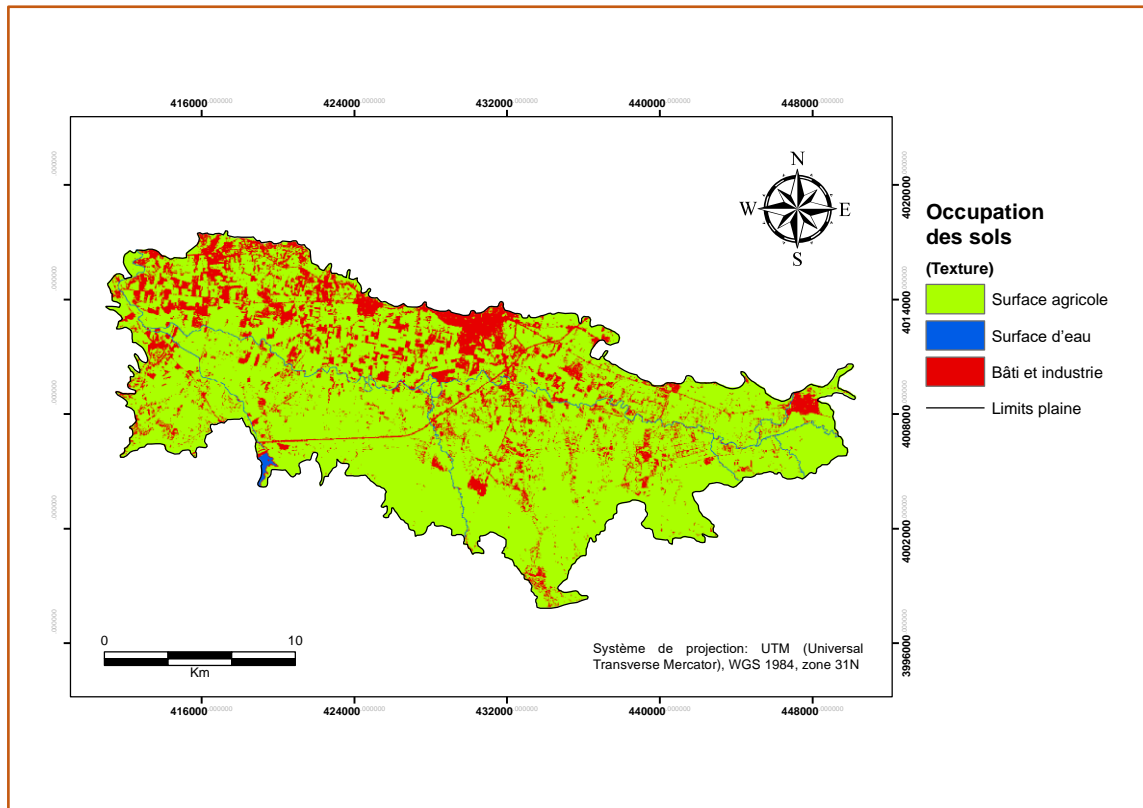


**Fig. 18** Couche thématique de la recharge nette.

### 4.1.6 Occupation des sols (Os)

La carte a été classée en trois grandes catégories telles que l'agriculture, les terres bâties/industries et les plans d'eau, comme le montre la **Fig. 19** au-dessous. Les plans d'eau sont continus et constituent une excellente source de recharge des eaux souterraines; par conséquent, elles sont assignées par un rang le plus élevé pour le potentiel des eaux souterraines (les lits des Oueds). Les surfaces agricoles avec une bonne couverture végétale favorisent le taux d'infiltration et empêchent les excès de ruissellement et, par conséquent, se voient attribuer un rang élevé pour la prospection des eaux souterraines. Les terrains bâtis se voient attribuer un rang très faible car le taux d'infiltration est très faible.





**Fig. 19** Couche thématique de l'occupation des sols.

### 4.1.7 Pente (Pt)

Cette carte a été classée en cinq catégories de pente: 3-4% (très bon), 4-8% (bien), 8-16% (modérer), 16-32% (pauvre) et >32% (très pauvre). La partie centrale de la zone d'étude comprend la topographie plate avec les pentes les plus basses (3-4%), tandis que les régions situant dans l'Est portent des zones avec des pentes supérieures à 32%. Les rangs (the Rank) ont été assignés par degré de pente. Un rang plus élevé est attribué aux classes de pente de degré inférieur qui permettraient une plus grande rétention d'eau souterraine et un moindre ruissellement dû au terrain plat. Tandis que le rang inférieur est assigné aux pentes plus raides en raison de plus d'écoulement et de faible d'infiltration.

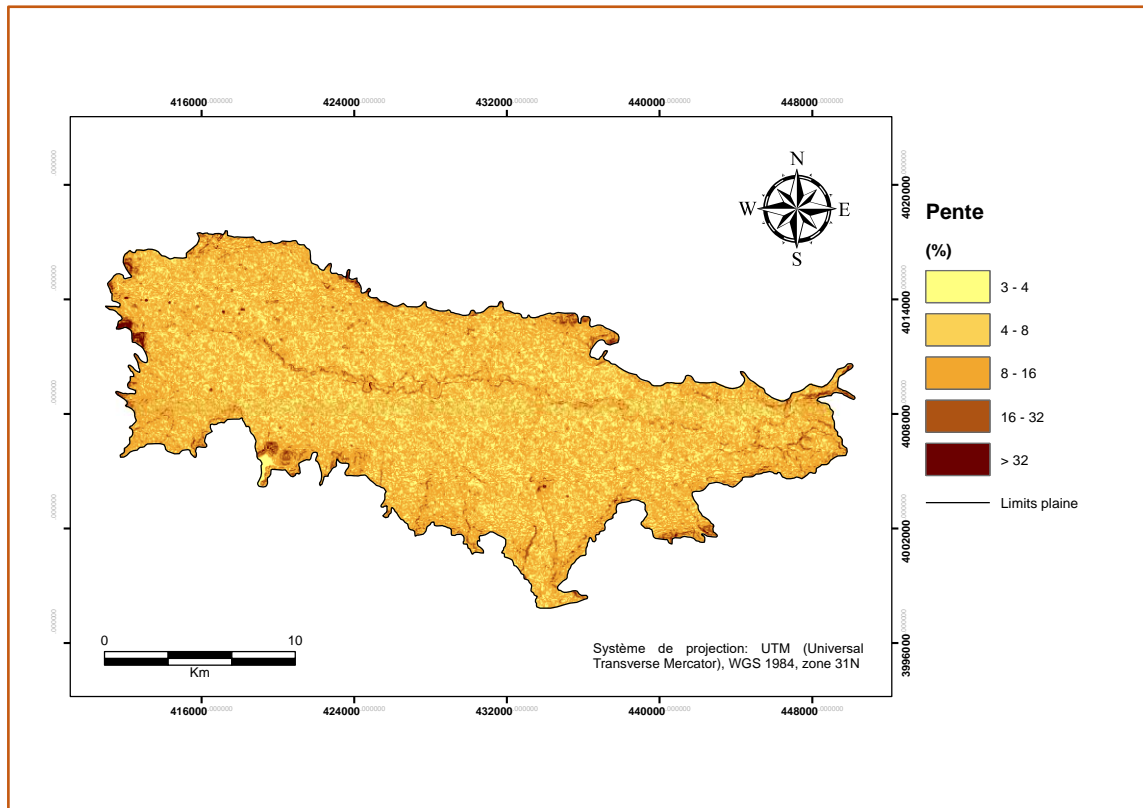


Fig. 20 Couche thématique de la pente en %.

## 4.2 Notes ou Scores des couches thématiques classées

Des taux (Rates or scores) sont attribués à chaque catégorie selon l'ordre d'influence de la classe sur le potentiel de stockage des eaux souterraines. Le taux (Rate) donne les gammes de potentiel de stockage des eaux souterraines dans chaque facteur. Des classements (Ratings) de 1 à 5 ont été adoptés où les taux (Rates) 1, 2, 3, 4 et 5 représentent des potentiels de stockage des eaux souterraines très faibles, faibles, moyens, élevés et très élevés respectivement. Les classes des couches thématiques pour tous les paramètres et leurs Taux (Ratings) correspondantes sont données dans le **Tableau 7**.

Le **Tableau 7** représente chaque couche thématique et poids de leurs classes correspondantes en utilisant l'AHP. Le potentiel des eaux souterraines est évalué par la combinaison linéaire pondérée (Weighted Linear Combination) voir **Fig. 21**.

## 4.3 Déterminer les poids en utilisant l'AHP

Processus de hiérarchie analytique (AHP) utilisé pour la prise de décision dans lequel un problème est divisé en différents paramètres, en les classant dans une structure hiérarchique en jugeant l'importance relative des paires d'éléments et en synthétisant les résultats (Saaty, 1999, Agarwal et al., 2013). La relation entre ces sept couches

thématiques a été dérivée à l'aide du processus de hiérarchie analytique (AHP). La méthodologie pour dériver les poids aux couches thématiques et leurs classes correspondantes en utilisant AHP implique de suivre les étapes.

#### 4.4 Génération de matrice de comparaison par paire

Les valeurs d'importance relative sont déterminées avec l'échelle 1-9 de Saaty (**Tableau 3**), où un Poids de 1 représente une importance égale entre les deux thèmes et un Poids de 9 indique l'extrême importance d'un thème par rapport à l'autre (Saaty, 1980).

Une matrice de comparaison par paires est dérivée en utilisant l'échelle d'importance de neuf points de Saaty, basée sur sept couches thématiques utilisées pour déterminer la zone potentielle d'eau souterraine. L'AHP donne une idée d'incertitude dans les jugements à travers la valeur propre principale et l'indice de cohérence (Saaty, 2004). Saaty (2004) a donné une mesure de cohérence, appelée indice de cohérence (IC), cet Indice est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

Où  $n$  = nombre de facteurs (c'est-à-dire 7) et  $\lambda$  = valeur moyenne du vecteur de cohérence (Principal Eigen Value).

$$\lambda = \frac{(7.34 + 7.36 + 7.29 + 7.17 + 7.07 + 7.05 + 7.10)}{7} = 7.20 \quad (9)$$

Et  $IC = (7.20-7) / (7-1) = 0.03$ .

Le rapport de cohérence (RC) est une mesure de la cohérence de la matrice de comparaison par paire.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (10)$$

Où IR est l'indice de ratio. La valeur de IR pour différentes valeurs 'n' est donnée dans le **Tableau 4**.

**Tableau 3** Échelle d'importance relative de 1-9 de Saaty.

Échelle	Importance
1	Importance égale
2	Importance Faible
3	Importance modérée
4	Importance Plus Modérée
5	Importance Forte importance
6	Importance Plus Forte
7	Importance très forte
8	Importance Très, très forte
9	Importance extrême

**Tableau 4** Indice de ratio pour les différentes valeurs de n.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0.58	0.89	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Pour  $n = 7$ , RC est 0,020, comme  $0,020 (RC) < 0,10$ , cela implique qu'il y a un niveau raisonnable de cohérence dans la comparaison par paire et que la consistance est acceptable. Si le RC est supérieur à 10%, nous devons réviser le jugement subjectif et devrait être réévalué pour éviter toute incohérence, voir le **Tableau 5**.

Les poids des différents critères et leur mesure de cohérence sont présentés dans le **Tableau 6**. Les poids déterminés sont 0.35, 0.24, 0.16, 0.11, 0.07, 0.05 et 0.03 respectivement pour l'utilisation des cartes pédologie, densité de drainage, précipitations, profondeur de des eaux souterraines, recharge nette, occupation des sols et la pente (**Tableau 6** et **Tableau 7**). Enfin, pour délimiter les zones potentielles des eaux souterraines, les sept couches thématiques et leurs poids normalisés sont intégrés étape par étape à l'aide du logiciel ArcGis.

**Tableau 5** Matrice de comparaison par paire de sept critères pour le processus AHP.

Couches thématiques	Pd	Dd	Pc	Pr	Rn	Os	Pt
Pd	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
Dd	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
Pc	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Pr	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00
Rn	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00
Os	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00
Pt	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00

Où, Pd= Pédologie (sol); Dd= Densité de drainage; Pr= Précipitation; Prof= Profondeur des eaux souterraines Rn= Recharge nette; Os= Occupation des sols; Pt= Pente.

**Tableau 6** Détermination des poids de critère relatif.

Thèmes	Pd	Dd	Pr	Prof	Rn	Os	Pt	Poids normalisé	Mesure de cohérence
Pd	0.39	0.45	0.41	0.36	0.32	0.28	0.25	0.35	7.34
Dd	0.19	0.22	0.27	0.27	0.25	0.23	0.21	0.24	7.36
Pr	0.13	0.11	0.14	0.18	0.19	0.19	0.18	0.16	7.29
Prof	0.10	0.07	0.07	0.09	0.13	0.14	0.14	0.11	7.17
Rn	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06	0.09	0.11	0.07	7.07
Os	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.05	7.05
Pt	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	7.10

Où, Pd= Pédologie (sol); Dd= Densité de drainage; Pr= Précipitation; Prof= Profondeur des eaux souterraines Rn= Recharge nette; Os= Occupation des sols; Pt= Pente.

**Tableau 7** Poids relatif des différentes couches thématiques et de leurs classes correspondantes.

<b>Id</b>	<b>Thème</b>	<b>Poids (Weight)</b>	<b>Poids normalisé</b>	<b>Classe</b>	<b>Rang (Rank)</b>	<b>Potentialité pour le stockage des eaux souterraines (Caractère)</b>
1	Sol (texture)	7	0.35	Argile	1	Très pauvre
				Limons	3	Bien à modéré
				Limons argileux	2	Bien
				Limons sableux	4	Très bien
				Sable	5	Très, très bien
				Terre glaise	1	Très pauvre
				Villes	1	Très pauvre
2	Densité de drainage (Km/Km <sup>2</sup> )	6	0.24	0 - 0.84	5	Très bien
				0.84 - 1.45	4	Bien
				1.45 - 2.00	3	Bien à modéré
				2.00 - 2.60	2	Modéré Pauvre
				> 2.6	1	Pauvre
3	Précipitations (mm/an)	5	0.16	< 370	1	Pauvre
				370 - 380	2	Modéré à Pauvre
				380 - 390	3	Bien à modéré
				390 - 400	4	Bien

## Résultats et discussion

---

				> 400	5	Très bien
4	profondeur des eaux souterraines (m bgs)	4	0.11	< 10	5	Très bien
				10 - 17	4	Bien
				17 - 23	3	Bien à modéré
				23 - 31	2	Modéré à Pauvre
				31 - 48	1	Pauvre
5	Recharge nette (mm/an)	3	0.07	< 0.86	1	Pauvre
				0.86 - 8.03	2	Modéré à Pauvre
				8.03 - 15.77	3	Bien modéré
				15.77 - 24.51	4	Bien
				24.51 - 36.55	5	Très bien
6	Occupation des sols	2	0.05	Bâti et industrie	2	Modéré à Pauvre
				Surface agricole	4	Très bien
				Surface d'eau	5	Très, très bien
7	Pente (%)	1	0.03	3 - 4	5	Très bien
				4 - 8	3	Bien
				8 - 16	2	Modéré à Pauvre
				16 - 32	1	Pauvre
				> 32	1	Très pauvre

#### 4.5 Délimitation des zones potentielles d'eaux souterraines

L'indice de potentiel des eaux souterraines (GWPI: Groundwater Potential Index) est une quantité sans dimension qui aide à prédire les zones potentielles d'eau souterraine dans une région. La technique de combinaison linéaire pondérée (WLC : Weighted Linear Combination) est appliquée pour déterminer le GWPI comme suit (Adiat et al., 2012, Shekhar and Pandey, 2015):

$$GWPI = \sum_{t=1}^m \sum_{f=1}^n (W_t * X_f) \quad (11)$$

Où  $W_t$  représente le poids normalisé de la couche thématique,  $X_f$  représente la valeur de rang (rate) de chaque classe par rapport à la couche  $f$ ,  $m$  représente le nombre total de couches thématiques et  $n$  représente le nombre total de classes dans la couche thématique. Le GWPI prenant en compte tous les thèmes et caractéristiques d'une couche intégrée est calculé en utilisant Eq. (12) ci-dessous (Shekhar and Pandey, 2015):

$$GWPI = Pd_{wi} * Pd_r + Dd_{wi} * Dd_r + Pr_{wi} * Pr_r + Prof_{wi} * Prof_r + Rn_{wi} * Rn_r + Os_{wi} * Os_r + Pt_{wi} * Pt_r \quad (12)$$

Où,  $Pd_{wi}$  représente l'indice de poids de la pédologie et  $Pd_r$  est le rang du thème;  $Dd_{wi}$  représente l'indice de poids de la densité de drainage et  $Dd_r$  est le rang du thème;  $Pr_{wi}$  représente l'indice de poids de précipitation et  $Pr_r$  est son rang correspondant;  $Prof_{wi}$  représente l'indice de poids de la profondeur des eaux souterraines et  $Prof_r$  est son rang correspondant;  $Rn_{wi}$  représente l'indice de poids de la recharge nette et  $Rn_r$  est son rang correspondant;  $Os_{wi}$  représente l'indice de l'occupation des sols et  $Os_r$  est son rang correspondant;  $Pt_{wi}$  représente l'indice de pente et  $Pt_r$  est son rang correspondant, cette étape réalisée à l'aide de l'outil Raster Calculator, au sein du logiciel ArcMap.

#### 4.6 Classification des zones potentielles d'eaux souterraines

Sur la base de la pondération des différentes couches thématiques et de leurs caractéristiques individuelles, une carte des zones potentielles d'eaux souterraines a été produite (Fig. 21). La carte des potentielles d'eaux souterraines de la plaine a révélé cinq zones distinctes, à savoir faible, moyenne, moyenne à élevée, haute et très haute. La répartition et l'étendue des différentes zones respectivement sont de 61.70 km<sup>2</sup> (17.23%),

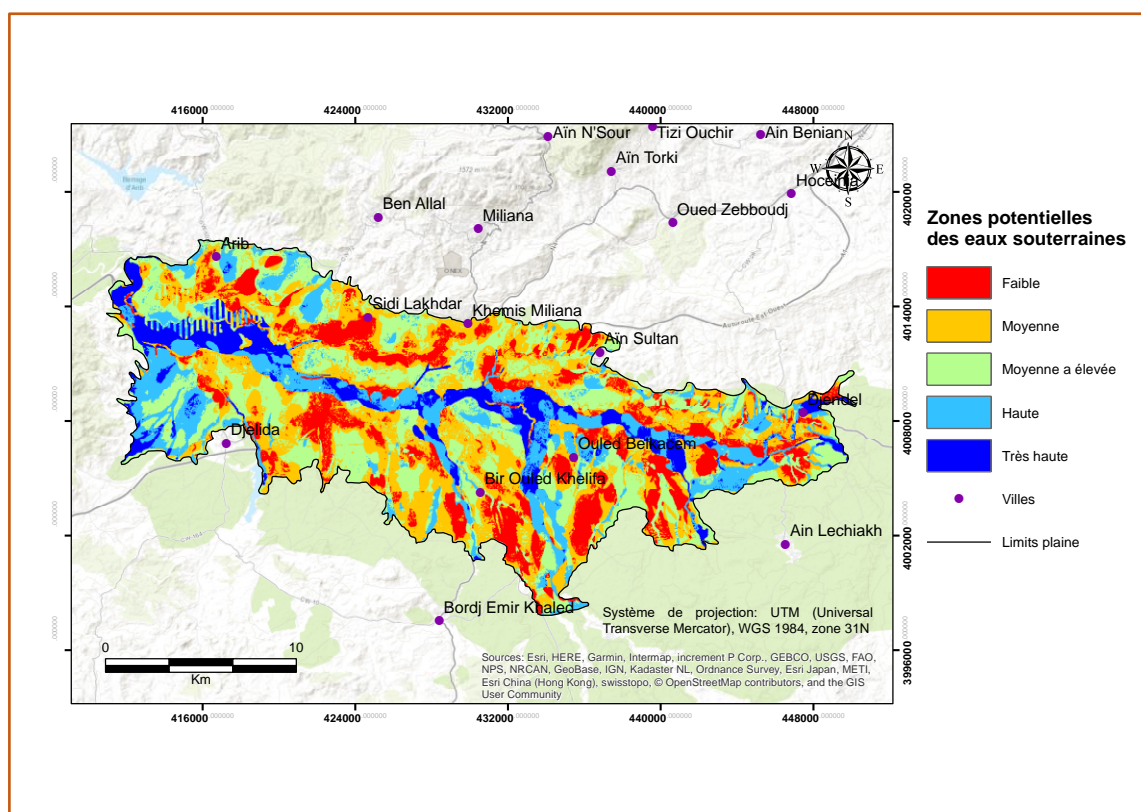


105.61 km<sup>2</sup> (29.48%), 97.05 km<sup>2</sup> (27.09%), 61.60 km<sup>2</sup> (17.20%) et 32.23 km<sup>2</sup> (9.00%), voir le **Tableau 8**.

La plaine a un potentiel très élevé à élevée dans la partie centrale, sud et sud-ouest, tandis que la partie nord et sud présente des potentiels d'eaux souterraines moyens à faible. L'évaluation de la carte du potentiel des eaux souterraines a révélé que la distribution zonale reflète plus ou moins les précipitations, la densité de drainage, la recharge nette, la pente et les sols, en plus des caractéristiques géologiques.

**Tableau 8** Zones potentielles d'eaux souterraines.

Classement des zones potentielles d'eaux souterraines	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie en %
Faible	61.70	17.23
Moyenne	105.61	29.48
Moyenne à élevée	97.05	27.09
Haute	61.60	17.20
Très haute	32.23	9.00
<b>Totale</b>	<b>358.19</b>	<b>100</b>



**Fig. 21** Carte des zones potentielles d'eaux souterraines de la plaine.

## 5 Conclusion

Dans cette étude, une approche méthodologique cartographique a été proposée pour la délimitation des zones potentielles des eaux souterraines en utilisant le SIG et des techniques de prise de décision multi-critères (MCDM). L'objectif de cette approche est d'évaluer le potentiel d'eau souterraine d'un système aquifère alluvionnaire dans la plaine semi-aride de Khemis Miliana, dans le Nord de l'Algérie. Des données hydrologiques, hydrogéologiques, géomorphologiques ont été utilisées pour préparer les couches thématiques de sept paramètres à savoir: pédologie, densité de drainage, occupation des sols, pente, profondeur des eaux souterraines, recharge annuelle nette et précipitations annuelles. Les sept couches thématiques sélectionnées et leurs caractéristiques sont affectées à des poids appropriés sur l'échelle de Saaty en fonction de leur importance relative dans l'occurrence des eaux souterraines. Les pondérations assignées des couches thématiques sont normalisées en utilisant la technique AHP (Processus de Hiérarchie Analytique) l'MCDM. Ces couches ont été intégrées dans l'environnement SIG, par l'application de la combinaison linéaire pondérée à l'aide du logiciel ArcGis a fin délimiter les zones potentielles d'eau souterraine.

L'analyse finale de la carte des potentialités montre que la zone d'étude est délimitée en cinq zones potentielles en eau souterraine, à savoir des zones d'une potentialité : « faible », « moyenne », « moyenne à élevée », « haute » et « très haute », couvrant 61.70 km<sup>2</sup> (17.23%), 105.61 km<sup>2</sup> (29.48%), 97.05 km<sup>2</sup> (27.09%), 61.60 km<sup>2</sup> (17.20%) et 32.23 km<sup>2</sup> (9.00%) de la zone d'étude, respectivement. Plus de 73% de la zone d'étude présente un degré de potentialité en eau souterraine 'moyen' à 'haut', on peut en déduire que les ressources en eau souterraine sont excellentes dans la plaine alluviale de Khemis Miliana. L'analyse cartographique montre que la plupart des zones présentant une texture du sol favorable, une densité de drainage, une pente et des conditions pluviométriques optimales ont un potentiel élevé en eau souterraine.

Dans l'ensemble, on peut conclure que les techniques MCDM et le SIG sont des outils puissants pour évaluer le potentiel des eaux souterraines, ce qui peut aider à préparer un plan d'exploration des eaux souterraines adapté et rentable pour un bassin ou un sous-bassin. La méthodologie proposée, qui est de nature générique et fondée sur des conditions logiques et un raisonnement, peut également être utile pour les autres régions en Algérie ou du monde. Plus intéressant, la méthodologie est moins coûteuse et convient mieux aux pays en voie de développement et aux pays à faible revenu où les données

## Conclusion

---

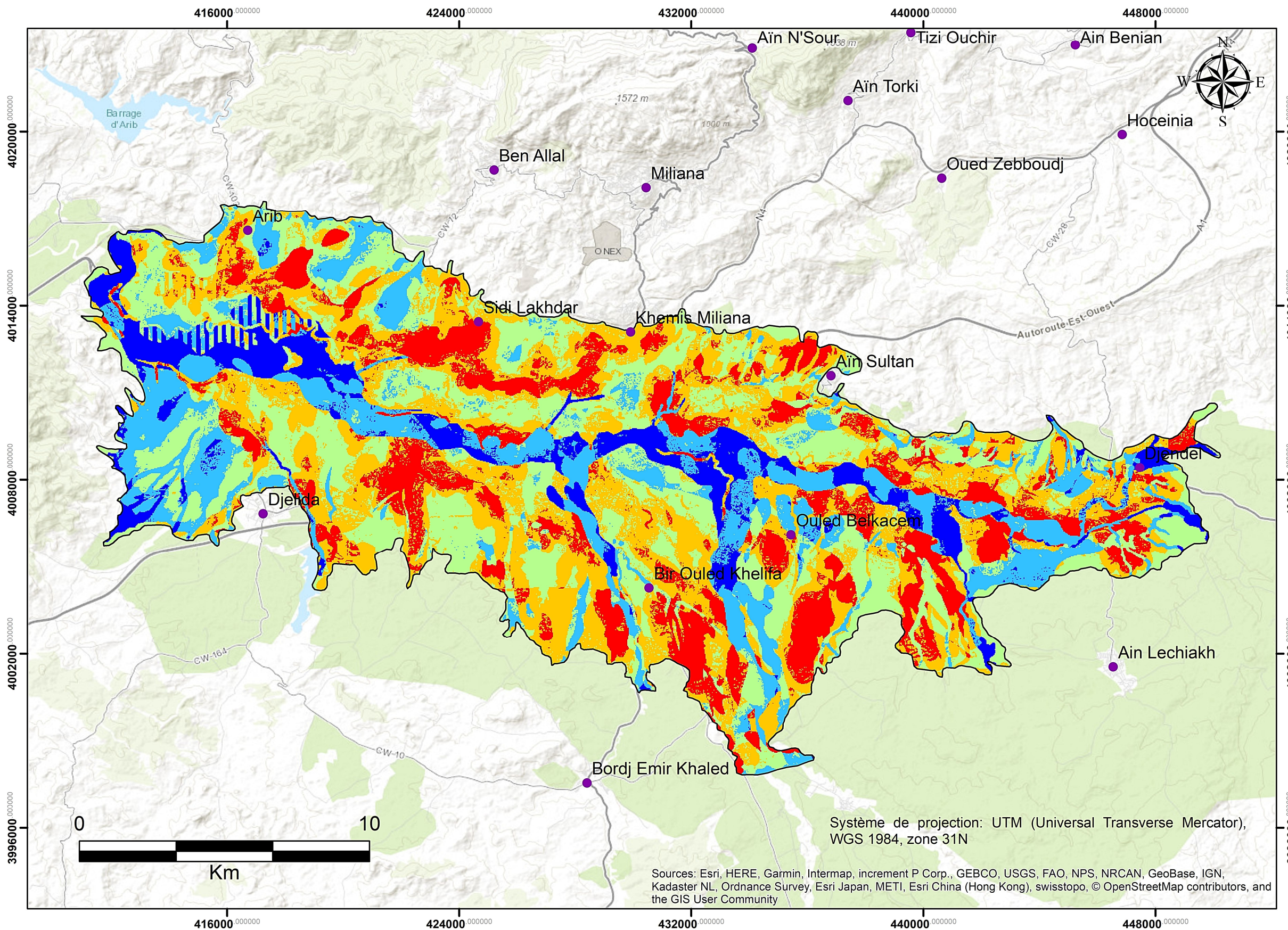
hydrogéologiques adéquates et de bonne qualité manquent souvent pour l'évaluation des eaux souterraines par des techniques à forte intensité de données.

## Références bibliographiques

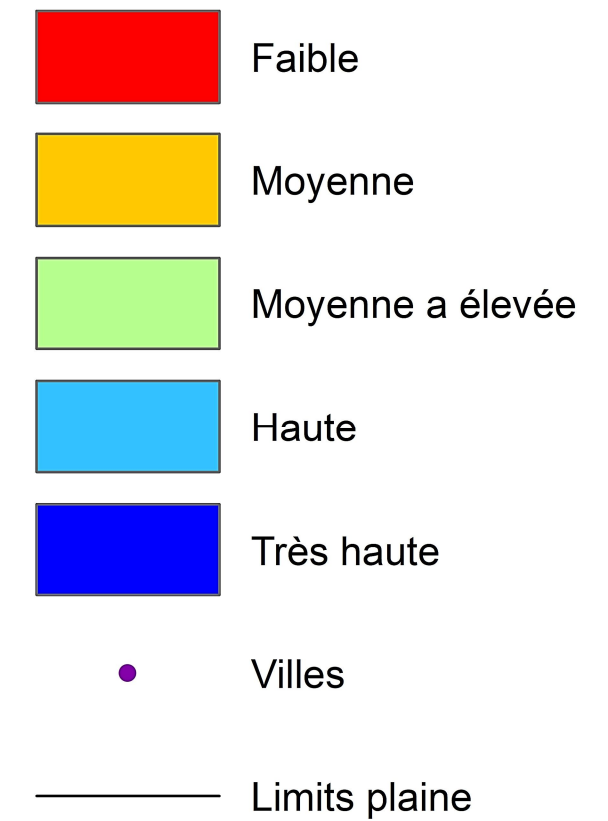
- Adiat, K. A. N., Nawawi, M. N. M. & Abdullah, K. 2012. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool – A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*, 440-441, 75-89.
- Agarwal, E., Agarwal, R., Garg, R. & Garg, P. 2013. Delineation of groundwater potential zone: an AHP/ANP approach. *Journal of earth system science*, 122, 887-898.
- Aher, P., Adinarayana, J. & Gorantiwar, S. 2013. Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through fuzzy analytical hierarchy process. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15, 11-18.
- Al-Bakri, J. T. & Al-Jahmany, Y. Y. 2013. Application of GIS and remote sensing to groundwater exploration in Al-Wala Basin in Jordan. *Journal of Water Resource and Protection*, 5, 962.
- Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R. & Bennett, T. 1987. DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. *National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America*.
- Bouderbala, A. 2017. Assessment of water quality index for the groundwater in the upper Cheliff plain, Algeria. *Journal of the Geological Society of India*, 90, 347-356.
- Bouderbala, A. & Gharbi, B. Y. 2017. Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in the intensive agricultural zone of the Upper Cheliff plain, Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 76, 744.
- Boudjenane, I. & Maarouf, N. 2015. *Utilisation du système d'information géographique et l'indice de qualité des eaux (IQE) pour évaluer la qualité des eaux souterraines dans la plaine Khemis Miliana*. Master Djelali Bounâama Khemis Miliana.
- Chenini, I., Mammou, A. B. & El May, M. 2010. Groundwater Recharge Zone Mapping Using GIS-Based Multi-criteria Analysis: A Case Study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water Resources Management*, 24, 921-939.
- Chow, T. E. & Sadler, R. 2010. The consensus of local stakeholders and outside experts in suitability modeling for future camp development. *Landscape and Urban Planning*, 94, 9-19.
- Company, R. M. 1990. *Handbook of ground water development*, John Wiley & Sons.
- Eastman, J. R. 2003. *IDRISI Kilimanjaro: guide to GIS and image processing*.
- Gaieb, S. & Hafedh Hamza, M. 2013. Assessing vulnerability to agricultural pollution of groundwater Bou Arada Laroussa according to SI method applied by GIS. *Journal of Research in Environmental and Earth Sciences*, 1, 01-10.
- Hajkowicz, S. & Higgins, A. 2008. A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *European Journal of Operational Research*, 184, 255-265.
- Israil, M., Al-hadithi, M. & Singhal, D. C. 2006. Application of a resistivity survey and geographical information system (GIS) analysis for hydrogeological zoning of a piedmont area, Himalayan foothill region, India. *Hydrogeology Journal*, 14, 753-759.

- Jaiswal, R. K., Mukherjee, S., Krishnamurthy, J. & Saxena, R. 2003. Role of remote sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development--an approach. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 993-1008.
- 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, 1713-1728.
- Jhariya, D., Kumar, T., Gobinath, M., Diwan, P. & Kishore, N. 2016. Assessment of groundwater potential zone using remote sensing, GIS and multi criteria decision analysis techniques. *Journal of the Geological Society of India*, 88, 481-492.
- Kumar, A. & Krishna, A. P. 2018. Assessment of groundwater potential zones in coal mining impacted hard-rock terrain of India by integrating geospatial and analytic hierarchy process (AHP) approach. *Geocarto International*, 33, 105-129.
- Lee, S., Kim, Y.-S. & Oh, H.-J. 2012. Application of a weights-of-evidence method and GIS to regional groundwater productivity potential mapping. *Journal of Environmental Management*, 96, 91-105.
- 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, 1359-1386.
- Mahalingam, B. & Vinay, M. 2015. Identification of ground water potential zones using GIS and Remote Sensing Techniques: A case study of Mysore taluk-Karnataka. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 5, 393.
- Majumder, M. 2015. Multi Criteria Decision Making. *Impact of Urbanization on Water Shortage in Face of Climatic Aberrations*. Singapore: Springer Singapore.
- Malczewski, J. 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62, 3-65.
- Manap, M. A., Sulaiman, W. N. A., Ramli, M. F., Pradhan, B. & Surip, N. 2013. A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 1621-1637.
- Meziani, S. & Bong, N. 2013. Application des SIG et des techniques de spatialisation pour l'identification, l'évaluation et le développement des ressources en eau souterraine de la plaine de Khemis-Miliana. 4-8p.
- Nagarajan, M. & Singh, S. 2009. Assessment of groundwater potential zones using GIS technique. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37, 69-77.
- 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. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, 45-57.
- 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, 158-172.
- Perrodon, A. 1957. *Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale*.

- 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, 7059-7071.
- Saaty, T. L. 1980. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation. *New York: McGraw*, 281.
- Saaty, T. L. Fundamentals of the analytic network process. Proceedings of the 5th international symposium on the analytic hierarchy process, 1999. 12-14.
- Saaty, T. L. 2004. Fundamentals of the analytic network process — multiple networks with benefits, costs, opportunities and risks. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13, 348-379.
- Sahraoui, N. 2015. *Étude de la coeherence entre la vulnérabilité a la pollution et la qualité des eaux souterraines : plaine de Kemis Miliana, Algerie*. Master, Djelali Bounâama
- 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, 402-421.
- Singh, P., Bhardwaj, O. & Kumar, A. 2011. Site selection for ground water recharge using treated municipal wastewaters-a case study of Varanasi (India). *Recent Adv. Civil Engg*, 122-130.
- Solomon, S. & Quiel, F. 2006. Groundwater study using remote sensing and geographic information systems (GIS) in the central highlands of Eritrea. *Hydrogeology Journal*, 14, 729-741.
- Subba Rao, N. 2006. Groundwater potential index in a crystalline terrain using remote sensing data. *Environmental Geology*, 50, 1067-1076.
- Todd DK, M. L. 1980. *Groundwater hydrology*, Wiley Canada, New York.
- Zapozec, A. 1972. Graphical Interpretation of Water-Quality Data. *Groundwater*, 10, 32-43.



## Zones potentielles des eaux souterraines



Sources: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community