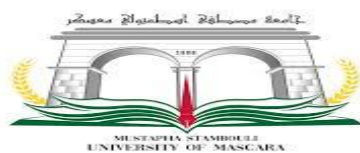


Université MUSTAPHA Stambouli

Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي

معسكر

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Agronomie

Laboratoire de Recherche sur les Systèmes Biologiques et de la Géomatique (LRSBG)

THESE DE DOCTORAT 3ème Cycle

Spécialité : Science de la Terre et de l'Univers

Option: Hydrogéologie Sol et Environnement

**Estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines et de
l'impact des activités anthropiques sur les systèmes
karstiques des Monts de Saïda, Algérie**

Présenté par : MEZIANE REDOUANE

Soutenue publiquement, le 16/07/2025

Devant le jury composé de :

Président	BENYOUCEF MADANI	Pr.	Université de Mascara
Examineur	BENSELIMANE MOHAMED	Pr.	Université de Mascara
Examineur	MOUASSA SOUAD	MCA	Université de Mascara
Examineur	ZERKAOUI LAIDIA	MCA	Université de Tiaret
Encadreur	AZZAZ HABIB	Pr.	Université de Mascara
Co-Encadreur	BEKKOUSSA BELKACEM	Pr.	Université de Mascara

Année Universitaire : 2024-2025

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier le bon dieu pour m'avoir donné le courage, la force et la volonté pour réussir et de m'avoir éclairci le chemin tout au long de ma vie.

Mes chers parents ;

Aucune dédicace ne serait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.

Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, à votre patience et vos innombrables sacrifices.

Tous mes respects et ma reconnaissance vont à ma famille, source de ma motivation et de mes espoirs, je leur dédie mon travail.

A Tous Mes enseignants tout au long de mes études.

Je n'oublie pas non plus tous mes amis qui m'ont toujours encouragé.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, à tous ceux qui m'ont encadré, à tous ceux qui m'ont encouragé, à tous ceux qui m'ont accordé leur confiance, à tous ceux qui m'ont montré leur intérêt, à vous tous MERCI !!

Résumé

Les aquifères karstiques constituent une ressource en eau essentielle, particulièrement vulnérable aux pollutions en raison de leur structure complexe et de leur perméabilité hétérogène. Dans ce contexte, cette thèse propose une évaluation et une cartographie de la vulnérabilité des aquifères du massif de Sidi Youssef, situé dans le Nord-Ouest algérien, en intégrant deux méthodes multicritères innovantes : PAPRIKA et AHP (Analytic Hierarchy Process). L'objectif principal est de combler les lacunes des approches traditionnelles en offrant une modélisation plus fine et adaptée aux spécificités des milieux karstiques. La méthodologie repose sur une collecte exhaustive de données hydrogéologiques (profondeur de la nappe, degré de karstification, occupation des sols, etc.), suivie de l'application des méthodes AHP pour pondérer les facteurs d'influence et PAPRIKA pour affiner les classements par paires, limitant ainsi les subjectivités. Les résultats sont spatialisés via un système d'information géographique (SIG), produisant des cartes de vulnérabilité intrinsèque qui identifient les zones à haut risque de contamination. Les résultats attendus mettent en évidence une hiérarchisation des facteurs de vulnérabilité, tels que l'infiltration préférentielle ou la couverture végétale, et révèlent que près de 30 % du massif présente une vulnérabilité élevée. L'originalité de ce travail réside dans la première application combinée des méthodes PAPRIKA et AHP en hydrogéologie karstique en Algérie, offrant ainsi un outil d'aide à la décision robuste pour les gestionnaires des ressources en eau. Les implications pratiques incluent la proposition de mesures de protection ciblées pour les périmètres de captage et la régulation des activités anthropiques. Enfin, cette méthodologie, reproductible dans d'autres contextes karstiques méditerranéens, ouvre des perspectives pour une gestion plus durable des aquifères dans des régions aux enjeux similaires.

Mots-clés : Aquifère karstique, vulnérabilité, PAPRIKA, AHP, SIG, modélisation multicritère, Sidi Youssef, Algérie.

Assessment of Groundwater Vulnerability and the Impact of Anthropogenic Activities on Karst Systems in the Saïda Mountains, Algeria

Abstract

Karst aquifers are a vital water resource, highly vulnerable to contamination due to their complex structure and heterogeneous permeability. This thesis evaluates and maps the vulnerability of aquifers in the Sidi Youssef massif (Northwestern Algeria) by integrating two innovative multicriteria methods: PAPRIKA (Potentially All Pairwise Rankings of All Possible Alternatives) and AHP (Analytic Hierarchy Process). The primary objective is to address the limitations of traditional approaches by providing a refined model tailored to karst environments. The methodology involves comprehensive hydrogeological data collection (e.g., water table depth, karstification degree, land use), followed by AHP-based factor weighting and PAPRIKA to refine pairwise rankings, reducing subjectivity. Results are spatialized via a Geographic Information System (GIS), producing intrinsic vulnerability maps that identify high-risk contamination zones. Key findings highlight a hierarchy of vulnerability factors that 30% of the massif exhibits high vulnerability, particularly in doline areas and near agricultural discharges. This study is the first combined application of PAPRIKA and AHP in Algerian karst hydrogeology, offering a robust decision-support tool for water resource managers. Practical implications include targeted protection measures for catchment areas and regulation of anthropogenic activities. The reproducible methodology is adaptable to other Mediterranean karst regions, promoting sustainable aquifer management in similar contexts.

Keywords: Karst aquifer, vulnerability, PAPRIKA, AHP, GIS, multicriteria modeling, Sidi Youssef, Algeria.

ملخص

تُمثِّل الطبقات المائية الكارستية موردًا مائيًا أساسيًا، وهي معرّضة بشكل خاص للتلوث بسبب بنيتها المعقدة ونفاذيتها غير المتجانسة. في هذا السياق، تقدم هذه الأطروحة تقييمًا ورسم خرائط لمستوى تعرّض طبقات المياه الجوفية في كتلة بير سيدي يوسف، الواقعة شمال غرب الجزائر، من خلال دمج منهجيتين متعدّتي المعايير وهما PAPRIKA و AHP عملية التحليل الهرمي. (الهدف الرئيسي هو سد ثغرات المناهج التقليدية عبر تقديم نمذجة أكثر دقة وملاءمة لخصائص البيئات الكارستية).

تعتمد المنهجية على جمع بيانات هيدروجيولوجية شاملة مثل عمق المياه الجوفية، درجة التكوين الكارستي، استخدامات الأراضي، وغيرها، يليها تطبيق طريقة AHP لترجيح العوامل المؤثرة، وطريقة PAPRIKA لتحسين التصنيف الزوجي، مما يحد من الذاتية. ثم يتم تمثيل النتائج مكانيًا باستخدام نظام المعلومات الجغرافية (SIG)، لإنتاج خرائط التعرض الذاتي والخاص التي تحدد المناطق عالية الخطورة.

تكشف النتائج عن ترتيب عوامل التعرض، مثل التسلسل الانتقائي أو الغطاء النباتي، وتُظهر أن حوالي 30% من الكتلة ذات تعرّض مرتفع، خاصة في مناطق الأحواض الدولينات وبالقرب من المصادر الزراعية الملوثة. يتميز هذا العمل بأول تطبيق مشترك لـ PAPRIKA و AHP في الهيدروجيولوجيا الكارستية بالجزائر، مما يقدم أداة قوية لصناع القرار في إدارة الموارد المائية. تشمل التطبيقات العملية اقتراح إجراءات حماية مستهدفة حول مناطق الضخ وتنظيم الأنشطة البشرية. وأخيرًا، يمكن تعميم هذه المنهجية في بيئات كارستية متوسطة أخرى، مما يفتح آفاقًا للإدارة المستدامة للطبقات المائية في مناطق ذات تحديات مماثلة.

الكلمات المفتاحية: الطبقة المائية الكارستية، التعرض، PAPRIKA، AHP، نظام المعلومات الجغرافية (SIG)، النمذجة متعددة المعايير، سيدي يوسف، الجزائر.

Sommaire

Résume	3
Introduction général :	11
Chapitre I :CADRE THEORIQUE ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	14
1. cadre théorique et revue bibliographique :	14
1.1 Le karst :	14
1.2 L'aquifère karstique :	15
1.3. Les caractéristiques des aquifères karstiques :	15
1.4. La vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :	17
1.4.1. Définition d'une pollution d'eau :	17
1.4.2. Vulnérabilité à la pollution :	18
A- Origine de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines :	18
B- Concept de la vulnérabilité :	18
C- Type de vulnérabilité :	18
□ La vulnérabilité intrinsèque	18
□ La vulnérabilité spécifique	19
D. Critères de vulnérabilité:	19
D-1. Critères relatifs au sol :	19
D-2. Critères de la zone non saturée :	19
D-3. Critères relatifs à la zone saturée:	19
1.5. Objet de la cartographie de la vulnérabilité :	21
1.6. Outils et Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :	21
1.6.1. Les Systèmes d'information géographique(Outils) :	21
1.6.2. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :	22
Chapitre II :PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	24
2. Caractérisation des monts de Saida :	24
2.1. Généralité territoriale :	24
2.2. Les caractéristiques physiques des monts de Saida :	Erreur ! Signet non défini.
2.2.1. Cadre géographique et physique :	Erreur ! Signet non défini.
2.2.1.1. Les pentes :	25
2.2.1.2. L'altitude :	28

2.2.2. Aspect géologique :	29
2.2.2.1. Stratigraphie et lithologie :	30
2.2.3. Occupation et utilisation des sols dans les Monts de Saida :	39
2.2.4. Caractéristiques de l'occupation du sol :	39
2.2. 5. Aspect climatologique :	41
2.2. 5.1. La pluviométrie :	42
2.2. 5.2. Les températures :	45
2.2. 5.3. Autres facteurs climatiques :	48
-Synthèse :	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre III :Évaluation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques par intégration des méthodes PAPRIKA et AHP : étude de cas du massif de Sidi Youssef, Saida, Nord-Ouest algérien	Erreur ! Signet non défini.
3.1. Présentation de la région de djebel Sidi Youssef :	54
3.1. 1. Localisation géographique :	54
3.1. 2. Contexte climatologique et hydrologique :	57
3.1. 3. Contexte hydrogéologique :	58
3.2. Matériels et méthodes :	58
3.2.1. La méthode PAPRIKA :	58
3.2.1.1. Principe de la méthode :	59
3.2.1.2. Poids des paramètres et classes de vulnérabilité :	66
3.2.2. La méthode AHP :	67
3.2.2.1. Principe de la méthode AHP :	67
3.2.2.2. Démarche de la méthode AHP :	68
CHAPITRE IV : RESULTAS ET ANALYSES	73
4 .RÉSULTATS :	73
4.1. Carte du facteur P :	73
4.2. Carte du facteur R :	76
4.3 Carte du facteur I	76
4.4 Carte du facteur Ka :	77
4.5. Cartographie de vulnérabilité :	79
4.5.1. Description des différentes versions obtenues :	79
4.6. Analyse comparative entre les versions (V0, V1, V2, VAHP) :	79
4.7. Évaluation de la sensibilité des pondérations :	81
4.8. Apports de l'intégration AHP dans PaPRIKa :	81

4.9. Comparaison avec d'autres méthodes ou indices de vulnérabilité :	82
4.9.1. Discussion des résultats à la lumière des études précédentes :	83
4.9.2. Limites méthodologiques et incertitudes :	84
4.9.3. Apport méthodologique de la combinaison AHP-PaPRIKa :	84
4.9.4. Intérêt pour la gestion et la protection de la ressource en eau :	84
Conclusion général :	87
Référence bibliographique :	90

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Critères de vulnérabilité.	20
Tableau 2 : Répartition des classes des pentes des monts de Saida.	28
Tableau 3 : Caractéristiques de la station météorologique.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4 : Les Précipitations moyennes mensuelles de Saida(1986/2018)	42
Tableau 5 : Régimes saisonniers des précipitations de la station de Saida (1986/2018).....	42
Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles de la station de Saida (en °C) (1986 à 2018)	44
Tableau 7 : Indice d'aridité de Demartonne	46
Tableau 8 : Situation bioclimatique de la station Saida	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 9 : Détermination de la nature d'un sol en fonction de sa texture et sa proportion de cailloux	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 10 :Détermination des classes du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 11 : Description du critère E, * Aquifère épikarstique *	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 12 : Tableau décrivant la lithologie de la zone non saturée.	50
Tableau 13 : : Tableau de l'attribution de la valeur de l'indice ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation	51
Tableau 14 : Description de l'état de surface dans les bassins versants	60
Tableau 15 : Tableau description des indices du critère R.	60
Tableau 16 : Tableau description du critère I	61

Tableau 17 : Tableau de description de l'indice Ka.	61
Tableau 18 : Valeurs d'intervalles des critères de vulnérabilité	62
Tableau 19 : Les classes de vulnérabilité définies en catégories associées à un indice et une couleur.	62
Tableau 20 : Echelle de mesure de la méthode AHP	63

Liste des Figures

Figure 1. Schéma représentant un paysage karstique	15
Figure 2. Schéma de fonctionnement d'un système karstique	16
Figure 3. Les deux types de systèmes karstiques	17
Figure 4. Carte de situation géographique des monts de Saida	25
Figure 5 . Les sous bassins hydrologiques	30
Figure 6 . Carte géologique de la région de Saida.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 7 .Coupe litho stratigraphique et hydrogéologique de la région de Saïda.	43
Figure 8 .Pluviosité moyenne mensuelle de la station Saida.....	45
Figure 9 .Régimes saisonniers des précipitations de la station de Saida (1986/2018).....	47
Figure 10. Répartition mensuelle des températures moyennes station de Saida, (en °C) (Rebahia -1986 à 2018).....	48
Figure 11. Diagramme Ombrothermique de Gaussen de la station de Saida (1986-2018).....	56
Figure 12. Carte géologique et de localisation de la zone d'étude.....	57
Figure 13. Coupes géologiques (A-A') et (B-B') de la zone d'étude.....	59
Figure 14 .Schéma de la méthode PaPRIKA.....	63
Figure 15. Schéma de localisation dans le karst du critère P et R.....	67
Figure 16. Hiérarchie de la décision.....	75
Figure 17 .Carte S (sols), UZ (zone non saturé) et couverture protectrice P pour le système karstique du Djebel Sidi Youssef.	78
Figure 18. Cartes des paramètres R, I et Ka caractérisant la vulnérabilité du système karstique du Djebel Sidi Youssef.....	80
Figure 19. Résultats de la cartographie de vulnérabilité appliquée au karst du Djebel Sidi Youssef.....	80

Introduction générale

Introduction générale :

Les ressources en eaux de surface et souterraines sont l'une des richesses capitales du pays. L'eau reste une ressource limitée et vulnérable qui est indispensable à la vie, au développement et à l'environnement. Sa protection et sa bonne gestion sont donc une nécessité.

Les aquifères karstiques représentent une composante majeure des réserves en eau douce de la planète, fournissant près de 25 % des ressources en eau potable à l'échelle mondiale (Ford et Williams, 2007). Leur importance est particulièrement marquée dans les régions semi-arides, où les précipitations irrégulières et les épisodes de sécheresse récurrents accentuent la dépendance à ces réservoirs naturels. Dans le Nord-Ouest algérien, le massif de Sidi Youssef, wilaya de Saïda, illustre parfaitement cette dynamique, constituant une source vitale pour plus de 200 000 habitants (Direction des Ressources en Eau, 2020). Pourtant, ces systèmes hydrogéologiques présentent une structure complexe, caractérisée par des réseaux de conduits interconnectés et une infiltration rapide, ce qui les rend extrêmement sensibles aux pollutions anthropiques et naturelles (Bakalowicz, 2005).

Face à cette vulnérabilité accrue, les méthodes classiques d'évaluation, telles que les modèles DRASTIC ou GOD, montrent leurs limites dans les contextes karstiques en raison de leur incapacité à intégrer pleinement les spécificités hydrodynamiques et structurales de ces milieux (Kavouri et al., 2011). Cette inadéquation souligne la nécessité de développer des approches innovantes, capables de combiner rigueur scientifique et adaptation aux particularités locales. C'est dans cette optique que s'inscrit cette recherche, qui propose une méthodologie intégrée associant l'analyse participative PAPRIKA (Mousseau et al., 2001) et la méthode de pondération multicritère AHP (Saaty, 1980).

Les objectifs de cette thèse s'articulent autour de trois axes principaux,

- Développer un modèle adapté aux aquifères karstiques algériens, sur la caractérisation des karsts méditerranéens.
- Appliquer cette méthodologie au massif de Sidi Youssef à travers une collecte exhaustive de données.
- Produire des cartes de vulnérabilité validées par une comparaison systématique.

Introduction générale

L'originalité de cette recherche réside dans la première application combinée des méthodes PAPRIKA et AHP en contexte nord-africain.

La thèse s'articule sur quatre chapitres :

- Le premier chapitre est basé sur le cadre théorique et revue bibliographique pour poser les bases scientifiques et les théories existantes et l'état de l'art.
- Le deuxième chapitre synthétisera le contexte géographique, l'hydrogéologie et le contexte climatique ainsi que la géologie de la région. Les descriptions litho stratigraphiques et structurales permettront de distinguer le réservoir d'aquifère de la région.
- Nous abordons en troisième chapitre, la méthodologie qui précise le choix et la justification des paramètres de vulnérabilité par le principe de la méthode PAPRIKA et la mise en œuvre de la méthode AHP.
- Enfin, nous présenterons dans le quatrième chapitre l'interprétation hydrogéologique des résultats cartographiques, et nous évoquerons dans le cinquième chapitre la discussion des résultats de la combinaison AHP-PAPRIKA.

En contribuant à une meilleure compréhension et gestion de ces aquifères stratégiques, ce travail participe à l'effort global de préservation des ressources en eau face aux pressions climatiques et anthropiques croissantes.

Chapitre I
CADRE THEORIQUE ET REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction :

Ce chapitre pose les fondements théoriques et conceptuels essentiels à la compréhension de l'objet d'étude. Il vise à définir les principaux concepts liés aux aquifères karstiques, à leur fonctionnement unique et à leur vulnérabilité intrinsèque à la pollution. Une revue détaillée de la littérature scientifique permettra de situer ce travail dans le paysage de la recherche existante, en passant en revue les méthodes classiques d'évaluation de la vulnérabilité (comme DRASTIC, EPIK, COP) et en identifiant leurs limites dans un contexte karstique algérien. Enfin, ce chapitre présentera les méthodes multicritères innovantes (PAPRIKA et AHP) qui seront mobilisées dans cette thèse pour combler ces lacunes

1. cadre théorique et revue bibliographique :

1.1 Le karst :

Le karst désigne un type de relief façonné par des mécanismes spécifiques d'érosion, appelés karstification. Ce phénomène est principalement dû à la dissolution hydrochimique des roches carbonatées (calcaires et dolomies) formant le substrat géologique de ces zones (Ford & Williams, 2007). L'eau météorique (pluie), en s'infiltrant dans ces roches, devient légèrement acide par absorption de dioxyde de carbone (CO_2) issu de l'activité biologique des sols (végétaux et microorganismes), ce qui favorise la dissolution des carbonates (White, 1988).

En surface, ce processus génère des dépressions fermées, telles que les dolines (petites cavités) ou les poljés (grandes plaines inondables), tandis qu'en profondeur, il forme des réseaux souterrains de grottes et de gouffres (Klimchouk et al., 2000). Ainsi, le karst constitue un système hydrologique dynamique où l'eau circule, s'accumule et ressort via des exurgences aux débits souvent élevés mais irréguliers (Bakalowicz, 2005).

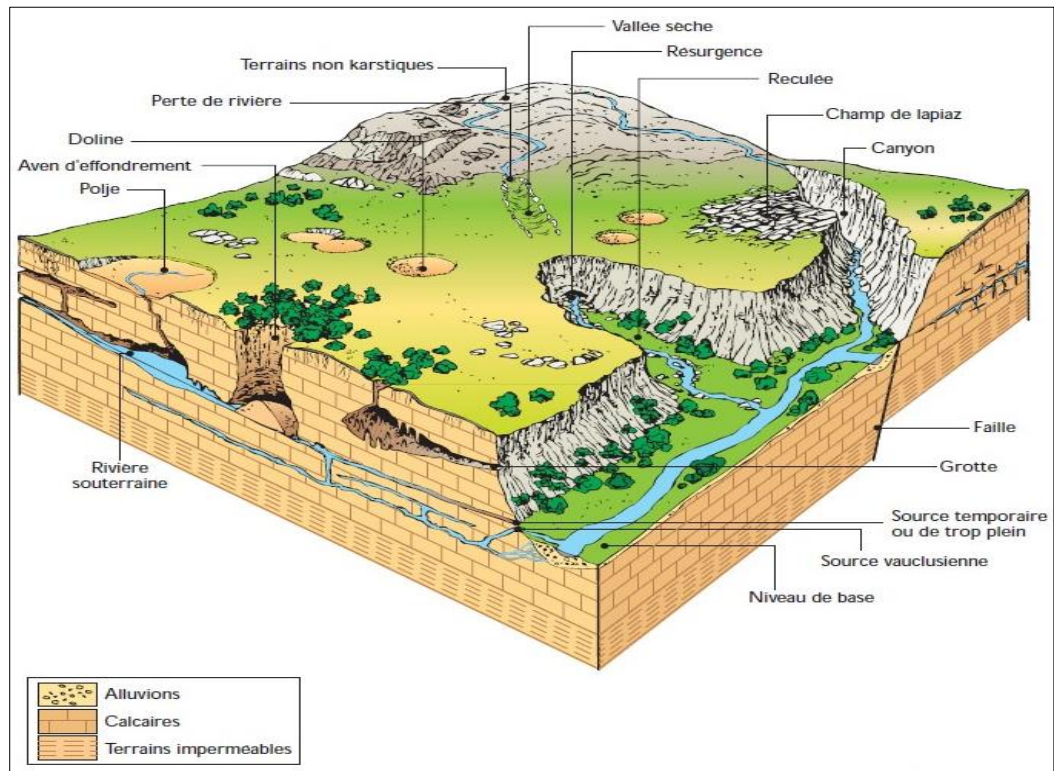


Figure 1. Schéma représentant un paysage karstique (BAKALOWICZ, 1999).

1.2 L'aquifère karstique :

Les aquifères karstiques se distinguent des autres aquifères par leur formation, leur structure et leur fonctionnement hydrogéologique uniques (Bakalowicz, 2005). Leurs vides présentent une hétérogénéité marquée, allant de microfissures (millimétriques) à des conduits karstiques de plusieurs mètres de diamètre et s'étendant sur des kilomètres (Ford & Williams, 2007). Cette variabilité morphologique engendre des vitesses d'écoulement extrêmement contrastées, pouvant passer de quelques centimètres par heure (écoulements diffus) à plusieurs centaines de mètres par heure (écoulements rapides dans les conduits), caractéristique majeure des systèmes karstiques (Worthington, 2009).

1.3. Les caractéristiques des aquifères karstiques :

Le karst présente une organisation verticale, divisée en trois zones hydrodynamiques distinctes (Klimchouk, 2000) :

- **La zone épikarstique** : Située près de la surface (quelques mètres à quelques dizaines de mètres), elle se caractérise par une forte porosité (5-10 %) et une perméabilité élevée (Williams, 2008). Cette zone stocke temporairement les eaux

d'infiltration, formant une nappe perchée discontinue. Les écoulements y sont principalement horizontaux, avec des transferts rapides vers les conduits karstiques ou une infiltration lente dans les fissures plus étroites (Mangin, 1975). Les formes de surface (dolines, lapiaz) favorisent l'infiltration et jouent un rôle clé dans la recharge de l'aquifère (Goldscheider & Drew, 2007).

- **La zone d'infiltration (non saturée) :** Elle assure la transition entre l'épikarst et la zone noyée. Les écoulements y sont bimodaux : lents dans les microfissures et rapides dans les conduits verticaux connectés au réseau karstique profond (Palmer, 1991).
- **La zone noyée (saturée) :** Principal réservoir des eaux souterraines, elle comprend des drains (rivières souterraines) assurant la transmission des écoulements et des systèmes annexes de drainage (SAD) jouant un rôle de stockage (porosité pouvant atteindre 15 %) (Perrin, J et al., 2004). Selon leur genèse, les drains peuvent se situer près de la surface piézométrique (karst jurassien) ou en profondeur (karst vaclusien), indépendamment de la structure géologique (Audra & Palmer, 2015). Seule une analyse hydrodynamique (tracage, étude des débits) permet d'évaluer leur capacité de stockage (Kresic, 2013).

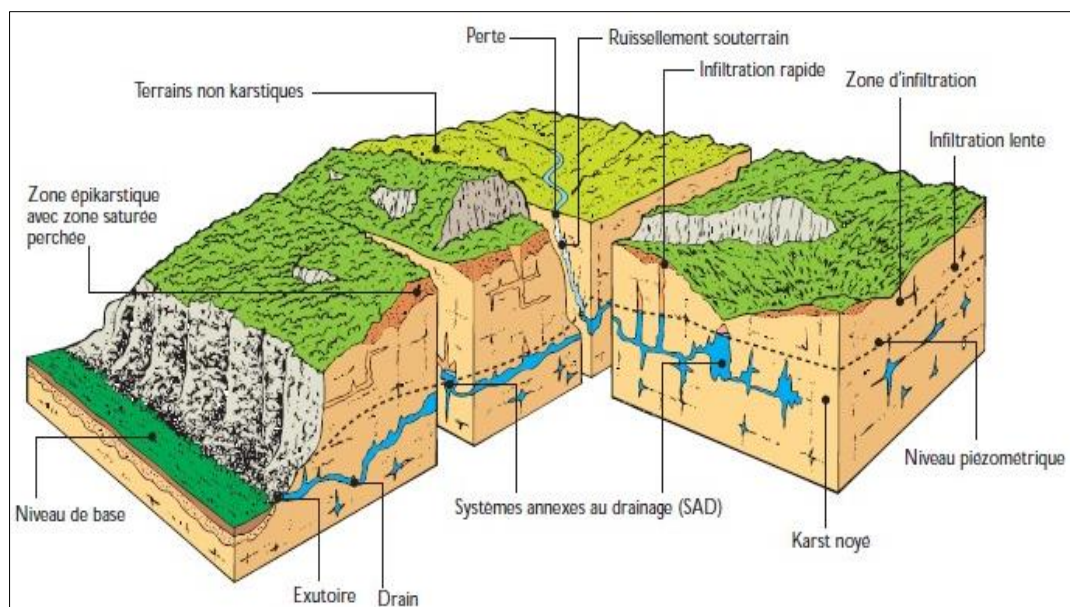


Figure 2. Schéma de fonctionnement d'un système karstique (Mangin, 1975).

En fonction des modalités d'arrivées des eaux de recharge, il est possible de distinguer deux types de systèmes karstiques :

- **Les systèmes karstiques unaires**, lorsque le système est entièrement alimenté dans les calcaires (système karstique = aquifère karstique) ;
- **Les systèmes karstiques binaires** : lorsque l'aquifère karstique proprement dit est alimenté en partie non négligeable par du ruissellement de surface (système karstique = aquifère karstique + bassin de surface drainé par des pertes).

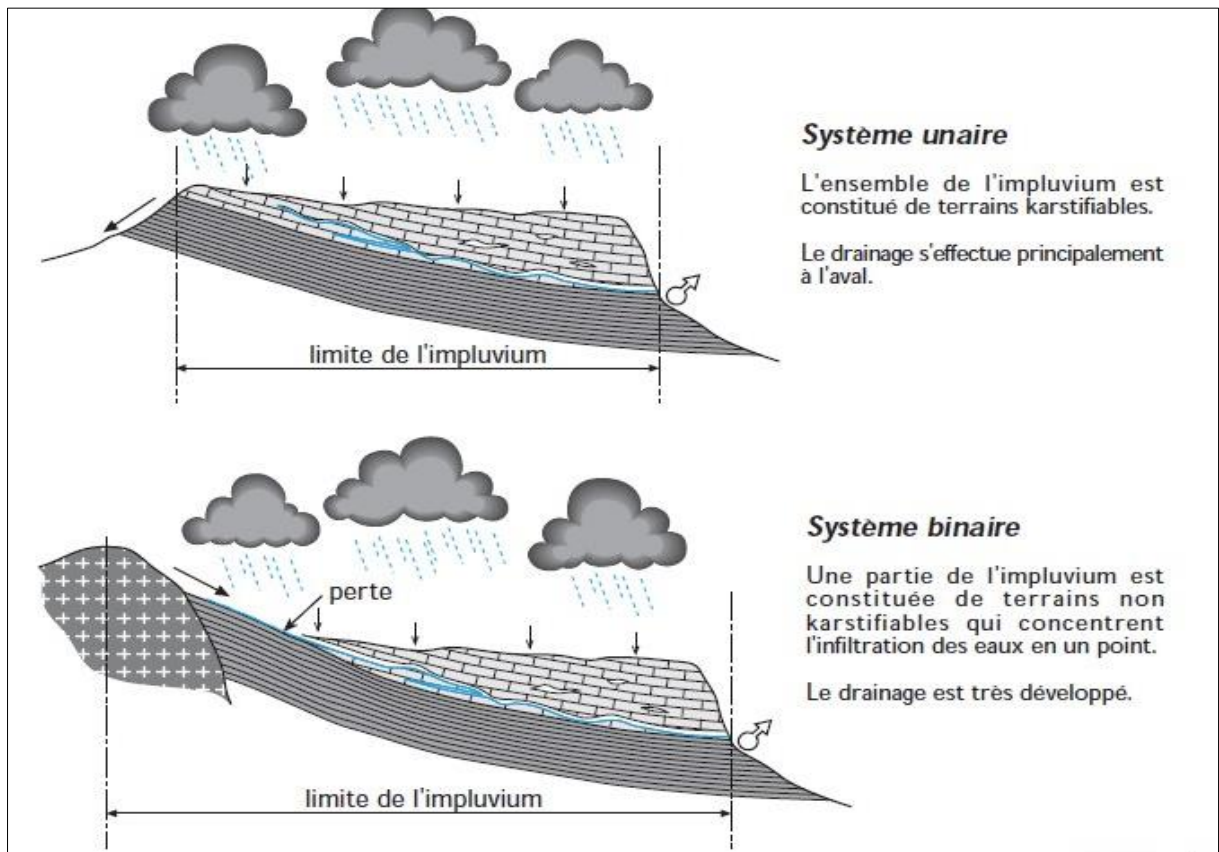


Figure 3. Les deux types de systèmes karstiques (BAKALOWICZ, 1999).

1.4. La vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution :

1.4.1. Définition d'une pollution d'eau :

La pollution de l'eau désigne une altération de ses caractéristiques naturelles (physico-chimiques), englobant à la fois l'action de contamination et les mécanismes de dégradation de sa qualité. La pollution des eaux souterraines représente un risque majeur, pouvant entraîner une raréfaction de cette ressource à court ou moyen terme. Elle est principalement liée aux activités anthropiques, indépendamment des processus naturels de dégradation d'origine géologique. Dans ce contexte, l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution permettrait

de prévenir les risques de contamination et d'optimiser leur gestion et exploitation (Schoeller, 1962).

1.4.2. Vulnérabilité à la pollution :

A- Origine de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines :

Le concept de vulnérabilité des eaux souterraines repose sur un modèle « origine-écoulements-cible ». Dans le cadre d'une cartographie de la vulnérabilité, on considère généralement que la contamination provient de la surface (à l'exception, par exemple, des fuites des réseaux d'assainissement enterrés) : cette source constitue l'origine (Zwahlen, 2004). Les écoulements représentent le trajet suivi par le polluant depuis son point d'émission à travers le milieu (zone non saturée et/ou zone saturée) jusqu'à la cible à protéger. Cette cible correspond soit :

- **à l'eau souterraine elle-même** (dans le cas de la protection de la ressource, où la cible est la surface de la nappe, c'est-à-dire l'interface entre zone non saturée et zone saturée),
- **ou à un point de captage spécifique** (forage, source, exutoire) dans le cas de la protection d'une exploitation.

B- Concept de la vulnérabilité :

La vulnérabilité à la contamination désigne la capacité de protection naturelle d'un aquifère face à une pollution. Ce concept repose sur l'idée que l'environnement physique (sol, zone non saturée, etc.) joue un rôle de barrière naturelle, atténuant les impacts des activités humaines et limitant la migration des polluants vers les eaux souterraines (Dörfliger et al., 2004, cité dans Vrba & Zaporozec, 1994).

La vulnérabilité est une propriété relative, non mesurable directement et sans dimension. Elle se décline en deux types principaux :

- La vulnérabilité intrinsèque, qui dépend uniquement des caractéristiques naturelles du milieu (géologie, hydrologie, etc.) ;
- La vulnérabilité spécifique, qui prend également en compte les propriétés physico-chimiques des contaminants (Bakalowicz, 1999).

C- Type de vulnérabilité :

On distingue deux types de vulnérabilité :

- **La vulnérabilité intrinsèque** : représente les caractéristiques naturelles d'un aquifère qui influencent sa sensibilité aux pollutions d'origine anthropique. Elle dépend

exclusivement des propriétés physiques du milieu (géologie, perméabilité, épaisseur de la zone non saturée, etc.), qui contrôlent le transfert des contaminants vers la nappe. Selon (Landreau ,1996) et Schnebelen et al. (2002), les méthodes d'évaluation de cette vulnérabilité peuvent être classées en fonction des facteurs physiques affectant la migration des polluants.

- **La vulnérabilité spécifique** : quant à elle, évalue la sensibilité des eaux souterraines à un polluant particulier ou à une famille de substances. Contrairement à la vulnérabilité intrinsèque, elle intègre les propriétés chimiques et comportementales des contaminants (dégradabilité, mobilité, etc.) et leurs interactions avec les caractéristiques du milieu (Schnebelen et al., 2002).

D. Critères de vulnérabilité:

La vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine dépend de multiples facteurs répartis dans trois zones principales : le sol, la zone non saturée et la zone saturée.

D-1. Critères relatifs au sol :

- **Topographie** : Influence la pente des terrains et la vitesse d'écoulement des eaux de surface (Derni, 2011).
- **Couverture pédologique** : La nature, l'épaisseur, la texture, ainsi que la teneur en argile et en matière organique du sol affectent directement le transfert des polluants vers la nappe.

D-2. Critères de la zone non saturée :

- **L'épaisseur de la zone non saturée**: Distance entre la surface et la nappe, déterminant le parcours des polluants.
- **L'amplitude de battement de la nappe**: Les variations importantes du niveau piézométrique constituent un facteur de vulnérabilité.
- **La perméabilité verticale de la zone non saturée**: Une perméabilité élevée réduit le temps de transfert des polluants (Ravbar & Goldscheider, 2007).
- **La structure de la zone non saturée**: La composition (texture, teneur en argile et matière organique) influence la rétention des contaminants.

D-3. Critères relatifs à la zone saturée:

- **Le type de nappe** : Les nappes libres sont plus vulnérables que les nappes captives.

- **Les paramètres hydrodynamiques:** Perméabilité, transmissivité et gradient hydraulique contrôlent la migration des polluants.
- **Piézométrie :** Décrit la dynamique de la nappe et ses variations saisonnières (Benslimane & Rahmoune, 2008).
- **La direction et le sens d'écoulement:** Détermine la trajectoire des polluants dans l'aquifère.
- **Le type du système hydrogéologique:** Le comportement hydraulique influence la vulnérabilité (Zwahlen, 2004).
- **Les relations nappe-cours d'eau:** Les échanges hydriques affectent les risques de contamination.
- **Épaisseur de l'aquifère :** Conditionne la capacité de dilution des polluants.

D-4. Critères communs à la zone non saturée et à la zone saturée :

- **La fracturation :** Accélère l'infiltration des polluants.
- **La recharge :** Volume d'eau atteignant la nappe, dépendant des précipitations efficaces (Dörfliger et al., 2004).

Tableau 1 : Critères de vulnérabilité (Zwahlen, 2004).

VULNERABILITE INTRINSEQUE		
Sol	Zone non saturée (ZNS)	Zone saturée (ZS)
Topographie (pente)	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe (libre ou captive)
Pédologie (perméabilité verticale des sols, nature et texture des sols)	Temps de transfert (perméabilité verticale)	Temps de résidence (dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères)
Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)		Relation eaux souterraines/eaux superficielles
	Structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur des discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matière organique et argile)	Piézométrie (sens et direction d'écoulement et évolutions selon la période du cycle hydrologique)
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Epaisseur de l'aquifère (quantité de réserve)

		La recharge (recharge annuelle nette).
		Type de système hydrogéologique (caractères plus ou moins capacitif et transmissif)
	Battement de la nappe	
Fracturation (directions et densité)		

1.5. Objet de la cartographie de la vulnérabilité :

L'objectif d'une carte de vulnérabilité d'une formation aquifère est de fournir le potentiel et le degré de risque de contamination, mais aussi le degré des conséquences possibles d'une contamination, de même que les éléments nécessaires, tant pour la prévention que pour les mesures mises en place à la suite d'une contamination (Duchaine D, 1998). La cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère permet une meilleure gestion de la nappe et des interventions rapides et appropriées en cas de pollution (Kebaili S et Herizi I, 2017).

1.6. Outils et Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :

1.6.1. Les Systèmes d'information géographique(Outils) :

Un système d'information géographique (SIG) est par définition un système permettant de stocker, de consulter, de traiter et d'afficher de l'information géographique. Les SIG doivent répondre aux besoins des décideurs en matière de gestion et d'aménagement des territoires. Le concept SIG englobe : logiciels, données, matériels et les savoir-faire liés à l'utilisation de ces derniers alors qu'un logiciel SIG est un ensemble de fonctionnalités utiles à l'exploitation d'un SIG. Parmi ces logiciels, on trouve des logiciels libres (AccuGlobe, Google Earth ...) ainsi que des logiciels propriétaires (Mapinfo, ArcGis, Surfer, Isatis...). Pour notre étude, nous avons utilisé logiciel Mapinfo.

Le Mapinfo : MapInfo est un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) commercialisé par Pitney Bowes, conçu pour analyser, visualiser et interpréter des données géospatiales. Il permet de créer des cartes thématiques, d'effectuer des requêtes spatiales et de croiser des données attributaires avec des informations géographiques, ce qui en fait un outil largement utilisé dans des

domaines tels que l'urbanisme, la logistique et la gestion des réseaux (Longley et al. 2015).

1.6.2. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité :

Plusieurs approches existent pour évaluer la vulnérabilité :

- **Approche directe** : Mesures in situ (traçages, monitoring) (Käss, 1998).
- **Méthodes par indices** : DRASTIC (Aller et al., 1987), EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1997), COP (Vías et al., 2006).
- **Méthodes multicritères** : Intégration de plusieurs facteurs pondérés (PAPRIKA) (Malczewski, 1999).

Les approches multicritères offrent une meilleure flexibilité pour les systèmes karstiques en intégrant des critères qualitatifs et quantitatifs (Tzeng & Huang, 2011).

Conclusion :

Ce premier chapitre a permis d'établir le cadre scientifique de la thèse. La spécificité des aquifères karstiques, caractérisés par une hétérogénéité et une double porosité, a été détaillée, expliquant leur haute sensibilité aux pollutions. La revue bibliographique a mis en évidence l'inadéquation des méthodes d'évaluation traditionnelles pour ces milieux complexes, soulignant la nécessité d'approches plus sophistiquées et adaptées. Les méthodes PAPRIKA et AHP ont été identifiées comme des outils prometteurs pour une modélisation plus fine de la vulnérabilité. Ainsi, ce cadre théorique justifie pleinement la méthodologie innovante qui sera appliquée et détaillée dans les chapitres suivants au massif de Sidi Youssef.

Chapitre II

**PRESENTATION DE LA ZONE
D'ETUDE**

Introduction :

La validité et la précision d'une étude hydrogéologique sont intrinsèquement liées à une connaissance approfondie du terrain. Ce chapitre a pour objectif de présenter de manière systématique la zone d'étude, le massif de Sidi Youssef dans les Monts de Saïda. Seront successivement abordés son cadre géographique et physique (relief, hydrographie, pentes), son contexte géologique et structural qui conditionne la présence de l'aquifère karstique, les caractéristiques de son occupation des sols, ainsi que son contexte climatologique et bioclimatique. Cette caractérisation multifactorielle est un prérequis indispensable pour comprendre le contexte dans lequel s'inscrit l'évaluation de la vulnérabilité.

2. Présentation des monts de Saïda :

Généralité territoriale :

À part la région sud de la wilaya, caractérisée par de vastes plaines steppiques, le reste du territoire est essentiellement montagneux, avec une dominance des Djebels des Monts de Dhaya et de Saïda. Cette configuration engendre un contraste net entre le sud et le nord de la wilaya. Ainsi, le territoire offre une grande diversité paysagère, mêlant des milieux variés tels que les zones montagnardes, les plateaux et les étendues steppiques.

2.1. Situation géographique :

Les Monts de Saïda s'inscrivent dans la région des Hauts Plateaux du Nord-Ouest algérien, délimités au sud par les Hautes Plaines oranaises ,incluant la dépression du Chott Chergui, au nord par les Monts de Sidi Kada et de la Mina, à l'ouest par les Monts de Daïa et à l'est par les Monts de Frenda. Le paysage montagneux est constitué d'une succession de djebels, majoritairement orientés du sud-ouest au nord-est (Conservation des forêts, 2008) .Au sud de ces plateaux ondulés se déploie une zone intermédiaire, transition vers les vastes étendues steppiques des hautes plaines, connue sous l'appellation de plaine de Hassasna.

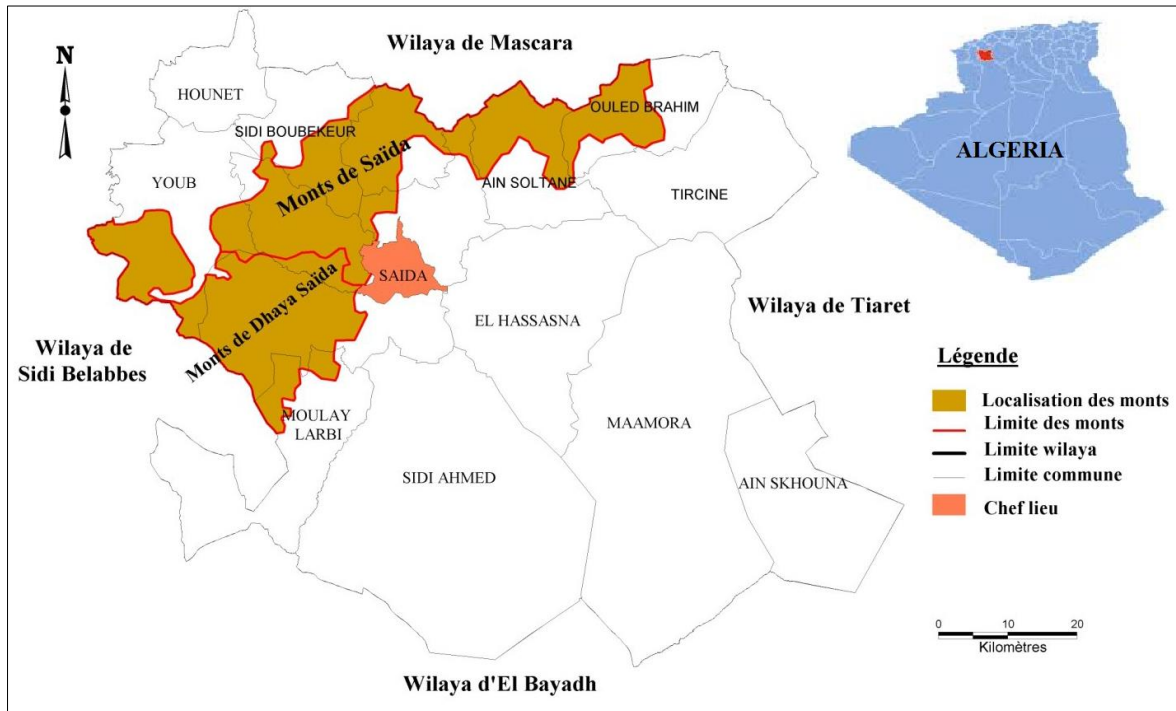


Figure 4. Carte de situation géographique des monts de Saïda (KERRACHE, G. 2011)

2.2. Cadre morphologique et hydrographique :

2.2.1. Morphologie :

Le relief constitue un facteur clé dans la modulation du potentiel de ruissellement. Notre zone d'étude, centrée sur l'Oued Saïda, s'étend du plateau de Ain Sultane à l'ensemble du plateau des Hassasnas, jusqu'aux contreforts du Djebel Sidi Youssef au sud-est et à la plaine de Maâlif au sud-ouest. Ce bassin se distingue par une mosaïque géomorphologique structurée en trois unités distinctes :

a) Les zones montagneuses

Dominées par la chaîne du Djebel Sidi Youssef (1 338 m d'altitude, orientation SO-NE), elles comprennent également les versants de la vallée de Saïda et le massif du Djebel Khenifer (1 246 m), formant un ensemble topographique accidenté.

b) Les plateaux

Cette unité regroupe les plateaux d'Ain Sultane et de Tidernatine, ainsi que les plaines d'Oum-Djirane et de Tamesna, offrant des surfaces plus homogènes mais stratifiées.

c) La vallée de l'Oued Saïda

Orientée sud-nord (avec une inflexion sud-est/nord-ouest dans sa partie septentrionale), cette vallée se situe à une altitude moyenne de 800 m, marquant une dépression centrale au sein du système.

Le réseau hydrographique, bien qu'assez bien hiérarchisé, présente un profil longitudinal marqué par des ruptures de pente prononcées. Le cours principal, d'une longueur de 80 km, se distingue par des déclivités importantes, générées par les discontinuités lithologiques du substrat.

- Caractérisation hydro morphologique

Avec un coefficient de compacité (K_c) de 1,21, le bassin versant des Monts de Saïda présente une morphologie modérément allongée et de type exoréique. La topographie, marquée par un dénivelé.

2.2.2. Hydrographie :

Avec une superficie planimétrique de 2134 km², le grand bassin des Monts de Saïda se structure en trois sous-bassins hydrographiques principaux, chacun surveillé par des stations hydrométriques stratégiques (**Figure 5**) : la station PK 50 sur l'Oued Saïda, celle de Tiffrit sur l'Oued Tiffrit, et enfin la station S. Mimoune sur l'Oued S. Mimoune. Parmi ces cours d'eau, l'Oued Saïda se distingue par un régime hydrique relativement pérenne tout au long de l'année, alimenté par des sources karstiques qui confèrent à son débit une irrégularité marquée, avec des étiages pouvant descendre jusqu'à 0,12 m³/s. Par ailleurs, l'Oued El Hammam bénéficie d'une alimentation abondante et continue, principalement assurée par les apports combinés de ces trois affluents majeurs, ce qui en fait un élément hydrologique stable au sein de ce système complexe.

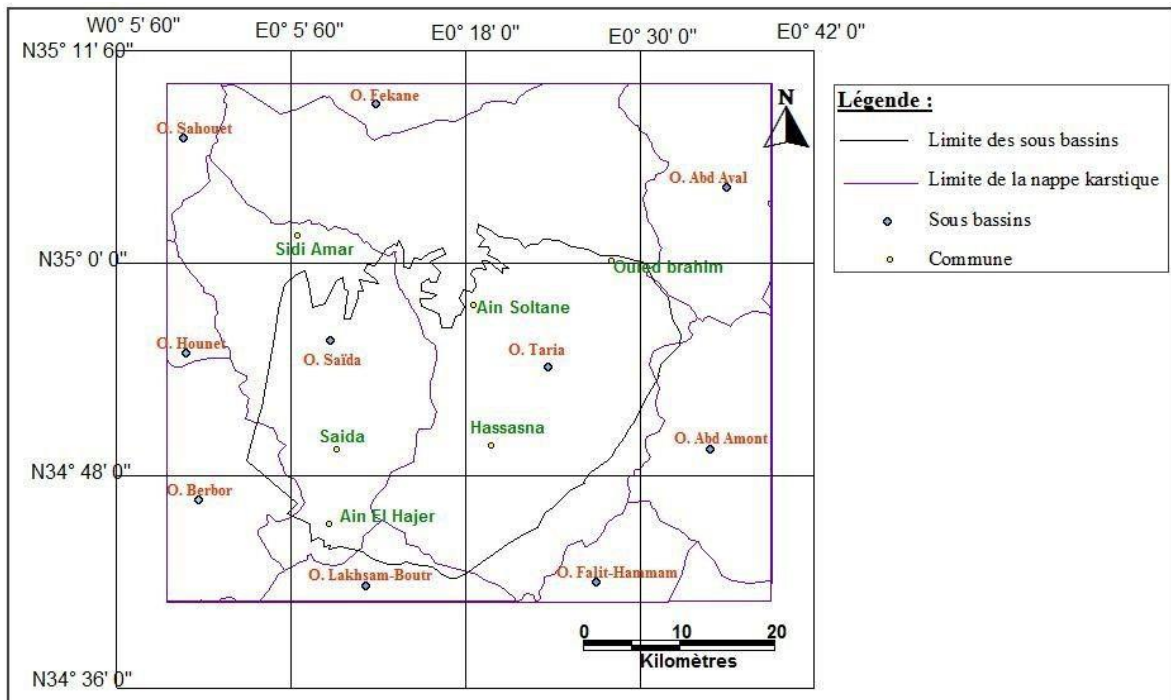


Figure 5. Les sous bassins hydrologiques (BENTABET, A .2020)

2.2.3. Les pentes :

Dans les monts de Saïda, la topographie est majoritairement peu accidentée, avec 84 % de la superficie totale (soit 62 620 ha) présentant des pentes inférieures à 13 %. Ces secteurs, essentiellement localisés dans les communes de Saïda, Doui Thabet, Sidi Amar, Sidi Boubkeur et Ouled Khaled.

À l'inverse, 16 % du territoire (11 940 ha) présente des déclivités plus prononcées, dont une part notable appartient à la classe intermédiaire (10-25 % de pente).

- Les zones dépassant 12,5 % correspondent principalement aux piémonts, en continuité des massifs montagneux. Ces espaces, souvent occupés par des parcours et des formations forestières clairsemées (maquis).
- Les pentes supérieures à 25 % concernent les hauts piémonts et les versants montagneux abrupts, généralement boisés, qui s'étendent sur l'ensemble des reliefs de la wilaya.

Tableau 2 : Répartition des classes des pentes des monts de Saida.

Classe des pentes	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
0 à 3 %	15280	20,49
3 à 12,5 %	47340	63,49
12,5 à 25 %	11200	15,02
+25%	740	0,99
Total	74560	100

2.2.4. L'altitude :

Les monts de Saida se caractérisent par différentes classes d'altitude. Ainsi, les classes d'altitudes retenues sont décrites comme suit :

- **Classe 1** : entre 500 et 750 m : Cette classe est la moins représentée, elle caractérise 27,88 % de la superficie totale des monts, où la topographie est généralement plane. Ce sont généralement les fonds de vallées et les zones des piémonts.
- **Classe 2** : entre 750 et 850 m : Cette classe caractérise un relief vallonné, formé de plateau ou de bas piedmonts de collines. Cette classe occupe 22,96 % de la surface des monts.
- **Classe 3** : entre 850 et 1080 m: Cette classe est dominante dans le massif montagneux, elle couvre 43 % de la surface totale.
- **Classe 4** : altitude supérieure à 1100 m : Cette classe représente à peu près 3% de la superficie totale ; elle se localise au sud de la région d'étude dans la commune de Doui Thabet et à l'Est dans la commune d'Ouled Brahim.

2.2.5. Aspect géologique :

La géologie, science étudiant les composantes observables de la Terre et reconstituant leur évolution par modélisation hypothétique, permet également de caractériser les ensembles géologiques régionaux. Dans cette perspective, la région située entre l'Atlas Tellien au Nord (d'âge secondaire) et les Hauts Plateaux Oranais au Sud (d'âge tertiaire) présente une unité géologique secondaire d'orientation est-ouest, englobant les Monts de Saïda. Ce secteur révèle une structure particulière où le substratum secondaire, profondément enfoui sous la dépression des Chotts, émerge progressivement avant de s'interrompre brutalement au contact de l'Atlas Tellien. Positionnés en marge nord des Hautes Plaines oranaises, les Monts de Saïda constituent le prolongement oriental des Monts de Daïa, formant une entité géologique et géographique bien individualisée. Leur délimitation s'établit au nord-est par les Monts de la Mina. Structuralement, ils correspondent à un anticlinal de grand rayon de courbure, d'orientation Ouest, Sud-ouest, Est, Nord-est parallèle aux structures telliennes et à l'axe de la dépression des Chotts. Cet ensemble anticlinal, en continuité avec celui des Monts de Daïa, voit son relief s'atténuer progressivement vers l'est pour passer aux structures su-tabulaires des Monts de Frenda.

Les Monts de Saïda constituent un vaste plateau structural dont l'armature supérieure est formée par les formations carbonatées du Bajo-Bathonien. Ces roches, principalement des dolomies et calcaires fortement karstifiés, sont recouvertes dans la vallée de l'Oued Saïda par d'épaisses formations argilo-gréseuses du Callovo-Oxfordien, ainsi que localement par des dépôts meubles plus récents d'âge Quaternaire, Plio-Quaternaire et Néogène (Pitaud, 1973). Le karst de surface se manifeste notamment sur le plateau par des dolomies très fracturées, des pertes, des reculées et des entonnoirs spectaculaires. Les dépressions et lits d'oueds présentent quant à eux des formations continentales d'âge Tertiaire à Quaternaire, incluant des dépôts fluviatiles et éoliens, ainsi que des tufs et travertins calcaires témoignant d'anciennes émergences sources. Cette configuration géologique complexe fait des Monts de Saïda un secteur d'intérêt majeur pour l'étude des processus karstiques en milieu carbonaté.

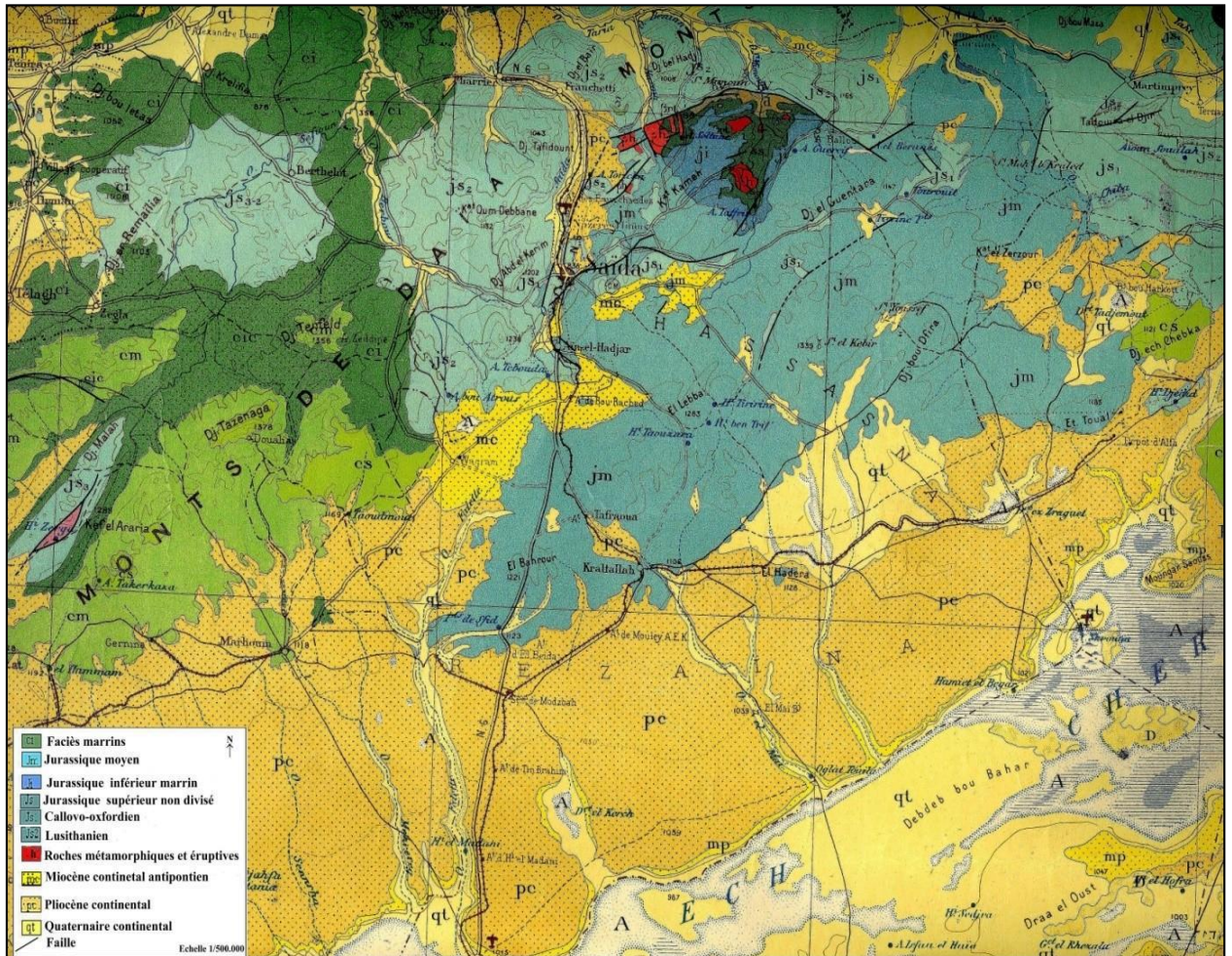


Figure 6 : Carte géologique de la région de Saïda (Djidi , k . 2015).

2.2.5.1. Stratigraphie et lithologie :

A. Primaires (Paléozoïque inférieur) :

L'unité primaire, constituée principalement d'une alternance de schistes et de quartzites, affleure de manière significative dans plusieurs secteurs clés de la région d'étude telle que la vallée de l'Oued Tifrit–Sidi Mimoun et l'ensemble de ses affluents, dans La vallée de l'Oued Guernida ainsi que la région du Djebel Modz bab, notamment à proximité de la localité des « Eaux Chaudes » (Pitaud, 1973).

Cet ensemble lithologique, d'âge Silurien, se caractérise par un style tectonique intensément plissé, témoignant d'une histoire géodynamique complexe. Bien que son épaisseur excède 100 mètres, la nature exacte de son substratum demeure inconnue à ce jour.

Chapitre II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

C'est à l'intérieur de cet ensemble que l'on peut noter la présence d'intrusions granitiques, ainsi que des coulées de laves basaltiques.

L'ensemble constitue un substratum imperméable, jouant un rôle structural majeur dans l'architecture géologique régionale.

Les schistes et quartzites de Tifrit dévisés en 3 groupes :

-**Quartzites multicolores** (nuances dominantes : noires à rouges), organisés en bancs métriques (10 à 20 cm d'épaisseur). Ces niveaux sont particulièrement développés :

- À la base de la formation schisteuse de Tifrit,
- Dans le secteur d'Aïn Soltane.

-**Schistes siliceux**, formant des séquences épaisses au sein des zones concentriques des massifs granitiques. Leur répartition privilégie :

- La vallée de l'Oued Tifrit,
- Les grandes vallées adjacentes.

-**Schistes noirs**, fréquemment observés en contact stratigraphique direct avec les terrains jurassiques.

B. Secondaires (Mésozoïque) :

B.1. Trias

Le Trias repose en **discordance angulaire marquée** sur les formations paléozoïques sous-jacentes (Figure. 7). Ses affleurements dessinent une frange sinueuse suivant le tracé des vallées incisées dans le socle primaire (Pitaud, 1973).

Lithologie et architecture triasique :

- **Membre inférieur** : Faciès carbonaté (dolomies et calcaires),
- **Membre supérieur** : Séquence sédimentaire détritique,
- **Membre basaltique** : Coulées volcaniques subhorizontales (élément le plus épais).

Cet ensemble volcano-sédimentaire, globalement imperméable, présente une épaisseur moyenne de **100 m**. Les formations gypseuses y sont relativement discrètes.

B.2. Lias inférieur et moyen

Cette unité se caractérise par :

- Des dolomies cristallines bréchiques, à passages argileux,
- Des alternances rythmiques d'argiles grisâtres, de dolomie et de calcaire bréchique.

Colonne stratigraphique type :

- Base : 40–50 m de dolomies massives,
- Intercalation : 8–10 m de grès grossiers rougeâtres,
- Sommet : 50 m de schistes et argiles silteuses.

B.3. Toarcien

Représenté par une séquence de 30 mètres de marnes et calcaires marneux blanchâtres, renfermant une abondante faune de brachiopodes (marnes d'Essaféh).

B.4. Jurassique

Le Jurassique constitue l'unité la plus structurante de la région. Il se subdivise en trois grands ensembles (Figure. 7) :

- Membre carbonaté inférieur (Jurassique inférieur à moyen, dominé par des faciès dolomitiques),
- Membre détritique intermédiaire (Callovo-Oxfordien argilo-gréseux et Lusitanien gréseux),
- Membre carbonaté supérieur (Kimméridgien dolomitique).
- **Jurassique inférieur et moyen ("Dolomies de Tifrit") :**

Principale unité aquifère régionale (Pitaud, 1973). Subdivisions :

- Formation de Baloul (Hettangien-Pliensbachien) : Calcaires à ciment dolomitique,
- Marnes d'Es Safah (Toarcien) : Dépôts marneux à brachiopodes,
- Formation d'Aïn Dez (Aalénien-Bajocien) : Dolomies cristallines,

- Argiles bigarrées de Sidi Youssef (Bajocien) : Séquence hétérogène à dominante argileuse,
- Carbonates de Zerzour (Bathonien) : Calcaires à rudistes,
- Marnes d'Om Debab (Bajo-Bathonien) : Intercalations marneuses.

Cet ensemble présente une épaisseur fortement variable, atteignant un maximum de 400 m dans le secteur sud de la région (Pitaud, 1973), puis s'amincissant progressivement jusqu'à disparaître complètement au nord au contact du Trias. Dans les localités de Tifrit, de la vallée de l'Oued Abd et du vieux Saïda, la série stratigraphique montre à la base les marno-calcaires toarciens et en intermédiaire des niveaux calcaires fréquemment silicifiés, contenant des interlits argileux verts, au sommet l'épaisse série des dolomies supérieures.

La partie basale de ces dolomies, traditionnellement rattachée au "Dogger", est attribuée à l'Aalénien.

Dans le secteur nord de Saïda (Djebel Modzbab), l'épaisseur des dolomies est notablement réduite par rapport à la région de Saïda proprement dite. La succession stratigraphique y comprend, de bas en haut :

- 10 à 15 m de marnes vertes riches en ammonites (Bajocien supérieur à Bathonien inférieur)
- 50 m de calcaires argileux
- Un banc calcaire massif
- **Callovo-Oxfordien et Lusitanien**
Cette formation est composée des « Argiles de Saïda », qui incluent quelques bancs gréseux. Elle est largement présente dans les vallées, notamment celle de l'Oued Saïda. De plus, elle forme des reliefs plus ou moins isolés sur le plateau et les versants des vallées. Son épaisseur totale atteint environ 250 m. (Pitaud, 1973)
- **Lusitanien**
Le Lusitanien est représenté par les « Grès de Franchetti », qui surplombent les vallées au nord de Guernida et Sidi Mimoun, ainsi que sur le flanc ouest de la vallée de l'Oued Saïda jusqu'à la latitude de cette ville. Cette formation est perméable. (Pitaud, 1973)

- **Kimméridgien**

Cette formation est très peu présente dans la région et est constituée des « Dolomies de Tlemcen », qui dominent toutes les autres formations uniquement au nord-ouest. Dans cette zone, comme le Lusitanien, elle est entièrement drainée.

C. Le Tertiaire

Il recouvre partiellement les monts de Saïda, souvent divisé en deux par une discordance.

C.1. Miocène

Cette formation est constituée de marnes argileuses de couleur rouge brique clair, caillouteuses, présentant à leur base un niveau conglomératique important composé de gros éléments mal roulés issus de l'altération du substratum. La partie supérieure est principalement marneuse, de teinte brique ou ocre. Le Miocène est bien développé au sud-est et au sud de Saïda. (Clair, 1952)

C.2. Pliocène

Il s'agit de formations plus récentes, bien représentées au sud, où elles comblent la large vallée de l'Oued Saïda.

C.3. Plio-Quaternaire

Ces sédiments apparaissent en faible épaisseur dans les fonds de vallées et les dépressions du plateau, mais occupent parfois des niveaux plus élevés (comme le plateau d'Aïn El Hadjar). Ils sont constitués de conglomérats, d'argiles, de limons et de croûtes calcaires. Des massifs de travertins se forment également au bord de certaines falaises dolomitiques (Tiffrit, Saïda). L'épaisseur varie généralement entre 3 et 4 mètres. Les travertins sont des roches grises à crème, tendres et friables. Les conglomérats sont formés de fragments et blocs de différentes tailles, principalement des quartz, des roches magmatiques, des dolomies et des calcaires. Leur épaisseur ne dépasse pas 25 mètres. L'ensemble de ces formations est globalement peu perméable. Les dépôts plio-quaternaires sont les plus répandus dans la vallée de Saïda, où ils remplissent généralement les dépressions morphologiques.

D. Tectonique

D.1. Les faille

La région présente une tectonique cassante bien marquée, avec de nombreuses failles identifiées par les études géologiques et géophysiques. Ces fractures affectent principalement les terrains carbonatés, créant des blocs dolomitiques de tailles et de formes très variées. Ces blocs apparaissent décalés les uns par rapport aux autres dans toutes les directions. L'organisation spatiale de ces failles suit des lignes tectoniques majeures qui reflètent les anciennes contraintes géodynamiques de la région.

On observe des zones particulièrement fracturées, formant des alignements orientés principalement nord-sud dans la vallée de Saïda, et sud-ouest/nord-est dans le reste de la région. Ces systèmes de failles sont connectés entre eux par des fractures secondaires perpendiculaires, avec une concentration remarquable au niveau de la région d'Oum Djerane (Pitaud, 1973).

Parmi les structures tectoniques majeures, on note particulièrement le fossé d'effondrement de la vallée de Saïda et la zone d'affaissement située entre l'alignement Saïda-Oum Djerane-Tifrit et le djebel Sidi Youssef. Ces déformations résultent à la fois des mouvements profonds du socle et des effets de la compression liée au plissement tellien contre le horst de Tifrit. Les formations carbonatées rigides du Jurassique inférieur et moyen ont réagi à ces contraintes principalement par fracturation, avec des ondulations de très grand rayon de courbure. L'analyse structurale suggère que la masse dolomitique du plateau de Saïda subit une poussée profonde, probablement liée au mouvement du socle au nord qui forme le horst de Tifrit. Ce horst joue un rôle important en bloquant la propagation vers le sud des contraintes liées au plissement tellien. La combinaison de ces forces a entraîné :

- Une surélévation générale de la dalle dolomitique
- Un effondrement selon un axe nord-sud marqué par la vallée de l'Oued Saïda
- Le développement de deux systèmes de failles principaux orientés sud-ouest/nord-est et nord-ouest/sud-est

Ces deux systèmes de fractures se croisent au sud du horst de Tifrit, dans la région d'Oum Djerane, et s'appuient sur les bordures est et ouest de ce horst. L'ensemble crée une structure complexe où le plateau, incliné vers le nord et le sud à partir de l'axe du djebel Sidi Youssef, est traversé par ces deux systèmes de failles majeurs. Ce réseau tectonique communique avec le système de failles de la vallée effondrée de Saïda au niveau de la région de Nazereg (Rebahia).

D.2. Les fissurations

Le réseau de fractures présente des caractéristiques dimensionnelles variées, depuis des microfissures de 0,1 à 0,2 mm jusqu'à des fractures de 10 à 12 cm dans certains secteurs. Ces discontinuités, généralement subverticales (pendage de 75° à 90°), suivent trois directions principales : 40°-220°, 140°-320° et 155°-335°.

Cette fracturation intense a permis le développement d'un karst important, phénomène caractéristique des monts de Saïda. Un exemple remarquable est observé à l'est d'Oum Djerane, où la karstification des calcaires du membre des carbonates de Zerzour suit précisément les directions de fracturation dominantes (60°-240° et 140°-320°). L'ensemble de ces structures tectoniques contrôle fondamentalement les processus de karstification et le fonctionnement du système hydraulique régional.

Les principales unités paysagères de la région, en étroite interaction avec les ressources naturelles, comprennent les formations karstiques, les glacis d'érosion et les affleurements dolomitiques et calcaires. Ces ensembles géomorphologiques distincts, par leur diversité lithologique et structurelle, génèrent une complexité notable dans la gestion durable des ressources naturelles locales. Les formations karstiques, issues de la dissolution des roches carbonatées, présentent une hydrodynamique particulière et une vulnérabilité accrue aux pollutions. Les glacis d'érosion, quant à eux, jouent un rôle clé dans la redistribution des matériaux détritiques et la recharge des aquifères. Enfin, les affleurements dolomitiques et calcaires constituent les principaux réservoirs aquifères de la région. Cette configuration géologique particulière influence directement la répartition des ressources hydriques, les potentialités agricoles, les risques naturels (érosion, effondrements karstiques) et les possibilités d'aménagement du territoire. Les unités litho-stratigraphiques peuvent être synthétisées comme suite dans le (Tableau 4). Cette organisation spatiale des formations géologiques souligne la nécessité d'une approche différenciée dans la gestion des ressources, adaptée aux spécificités de chaque unité paysagère.

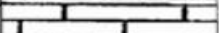
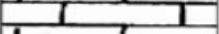
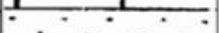
Épaisseur en mètre	Âge	Log	Description géologique
20	Quaternaire		Limons plus ou moins sableux et travertins.
75	Tertiaire		Argile brique sableuse ou gypseuse à intercalation de calcaire et de graviers, galets.
100	Sénonien		Calcaires gris clairs à pâte fine très altérés à la partie supérieure.
300	Barrémien		Grès de Youb (anciennement appelé Berthelot).
310	Kimméridgien		Dolomies de sidi Boubekeur (anciennement appelé Charrier), marno-calcaire de Raouraï, calcaire de Stah, antérieurement appelé dolomies de Tlemcen, enfin calcaires de Zarifet.
180	Lusitanien		Grès de sidi Amar anciennement appelé Franchetti, avec rares passées carbonatées et argiles sableuses. Les grès présentent une stratification entrecroisée.
250	Callovo-Oxfordien		Argiles de Saïda: (puissante série argilo gréseuse).
150	Aaléno-Bajo-Bathonien		Dolomies cristallines et calcaires fissurées.
25	Toarcien		Marne d'Essafah (marno-calcaire et marnes).
30	Domérien		Dolomies cristallines bréchiques avec argile.
90	Trias		Argiles saline, grès argileux, basalte.
30	Primaire		Schistes, granites, rhyolites, diorites.

Figure 7: Coupe litho stratigraphique et hydrogéologique de la région de Saïda. (Clair, 1952 et Pitaud, 1973).

2.2.3. Occupation et utilisation des sols dans les Monts de Saida :

L'occupation du sol revêt un intérêt particulier pour l'étude de la vulnérabilité des aquifères. La zone montagneuse des Monts de Saida, caractérisée par un relief modérément accidenté (pentes de 3 à 12,5%), est majoritairement réservée au domaine forestier. Ce paysage est entaillé par des vallées et oueds où se pratique la céréaliculture dans les parties basses, tandis que l'arboriculture rustique occupe les piémonts et les cultures maraîchères se concentrent le long de l'oued Saida, zone bénéficiant des précipitations les plus favorables (350-400 mm/an).

2.2.4. Pédologie de la région :

Les données disponibles sur les ressources en sol des monts de Saida sont très mal connues. En effet très peu d'études ont été réalisées au niveau de cet espace. Les plus récentes sont celles décrits et répertoriés par l'étude pédologique réalisée par le B.N.E.D.E.R (1992). Pour ce faire et afin de donner un aperçu général sur les principaux types de sols existants au niveau des monts de Saida.

D'une manière générale les principaux types de sols rencontrés au niveau des monts de Saida peuvent être résumés comme suit :

-Sols alluviaux : ils comprennent les sols alluviaux de plaine ou de terrasse alluviale et les sols alluviaux de lits d'oueds.

-Sols bruns : parmi ces sols, on distingue les sols bruns calcaires largement étendu au nord des monts de Saida.

-Sols bruns rouges : parmi ces sols on distingue les sols brun rouges à horizon humifère, les sols bruns rouges méditerranéens à texture légère.

-Les lithosols : sont assez étendus et se retrouvent sur presque tous les versants dénudés. Ils ont peu épais (moins de 20 cm généralement) et très morcelés.

-Autres sols :

-Sols calcaires : Formés sur des roches calcaires plus ou moins compactes, ils contiennent une certaine proportion de matière organique qui permet de les diviser en deux sous -type selon l'importance de cet élément. Les zones où ces sols dominent sont le plus souvent caillouteuses, des bancs de roc apparaissent sur les crêtes. C'est des terrains le plus souvent légers, perméables, à humus peu abondant se transformant assez rapidement. Ces sols se caractérisent par la présence de calcaire à un taux en liaison avec la nature de la roche-mère, un horizon superficiel toujours moins riche en calcaire que l'horizon sous-jacent, une teneur en argile diminue en profondeur et la présence généralement d'un seul horizon différencié.

-Sols rouges : On distingue trois types caractérisés généralement par une richesse en fer libre, une texture argilo-limoneuse et une friabilité :

- terra rossa non calcaire (Ca CO₃ inférieur à 1 %),
- terra rossa peu calcaire (Ca CO₃ inférieur à 10 %),
- rendzines rouges.

La formation des terres rouge se rencontrant dans les régions karstiques (calcaire cristallin et dolomie), c'est des paléosols ayant pris naissance à la fin du tertiaire et ayant poursuivi leur formation au début du quaternaire. En ce temps les processus sur la pédologie étaient gouvernés par le climat tropical.

A ce sujet (Durand ,1954) soulignait : " les terra rossa servent de roche mère aux sols actuels qui peuvent être calcaires, insaturés, solonetziques et même podzoliques".

Elles ont pris naissance sur des sols calcifiées tendres, comme les marnes, par un processus identique à celui qui a donné naissance aux terra rossa. Les rendzines rouges se caractérisent également par le fait que l'horizon superficiel est plus riche en calcaire que les horizons sous-jacents, mais moins riche en cet élément que la roche mère."

2.2. 5. Aspect climatologique :

La caractérisation du climat représente un élément fondamental de toute étude environnementale. Cette analyse s'appuie principalement sur l'étude des paramètres thermiques et pluviométriques, tout en intégrant l'influence d'autres facteurs météorologiques comme les chutes de neige, les vents et les épisodes de gel. Dans le contexte méditerranéen, quatre paramètres clés permettent de définir le climat local : la distribution mensuelle et annuelle des précipitations, les températures (avec leurs extrêmes), ainsi que les mesures d'évaporation et d'humidité atmosphérique.

La situation géographique particulière de l'Oranie, en marge sud de la zone méditerranéenne, se traduit par des contraintes écologiques marquées : une sécheresse estivale prolongée et une forte variabilité interannuelle des précipitations. Ces caractéristiques climatiques limitent considérablement le développement des écosystèmes naturels et réduisent les zones propices à la croissance végétale. Cette aridité accentuée s'explique par la position méridionale de l'anticyclone des Açores, qui conditionne la pénétration des perturbations atmosphériques en provenance de l'ouest.

De nombreux travaux scientifiques (Seltzer, 1946) confirment l'appartenance climatique de l'Algérie au domaine méditerranéen. Les monts de Saida présentent quant à eux un climat méditerranéen semi-aride marqué par une double influence maritime et continentale, ainsi que par un relief étagé orienté nord-sud avec des dépressions longitudinales.

Notre méthodologie d'analyse combine des approches rationnelles basées sur des formules régionales adaptées et une synthèse des études antérieures concernant la région. L'évaluation des différents paramètres climatiques repose sur des séries chronologiques suffisamment longues pour garantir une significativité statistique.

Le traitement des données a principalement exploité les enregistrements de la station de Saida, tout en confrontant plusieurs sources :

- Données pluviométriques Les Précipitations moyennes mensuelles de Saida (1986-2018)
- Températures : Températures moyennes mensuelles de la station de Saida

Malgré certaines lacunes dans les séries chronologiques, cette analyse permet d'établir un premier diagnostic climatologique fiable de la zone d'étude.

2.2. 4.1. Les précipitations:

Les précipitations, qui se manifestent sous forme liquide (pluie, rosée) ou solide (neige, grêle, givre), représentent le facteur primordial du comportement hydrologique d'un bassin. Elles constituent un élément indispensable pour l'estimation quantitative de l'écoulement des eaux.

-Collecte des données :

Les données pluviométriques analysées dans cette étude ont été collectées auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrologiques (A.N.R.H, 2020). Elles comprennent les totaux mensuels (valeurs maximales, moyennes et minimales) provenant des relevés originaux de quatre stations météorologiques, dont une située à proximité immédiate de la zone d'étude. Ces résultats mettent en évidence une irrégularité spatio-temporelle marquée des précipitations, directement liée à l'exposition spécifique.

Tableau 3 : Caractéristiques de la station météorologique

Station	Altitude	Latitude	Longitude
Saida (Rebahia)	858 m	34° 49' 49'' N	00° 09' 06'' E
Ain. El Hadjar	1015 m	34° 45' 00'' N	00° 18' 00'' E
Youb	650 m	34° 55' 00'' N	00° 12' 00'' W
Sidi Amar	550 m	35° 03' 00'' N	00° 11' 00'' E

Tableau 4 : Les Précipitations moyennes mensuelles de Saida (1986-2018)

Mois	Sep	Oct	Nov	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Total
P Moy Mensuelle en (mm)	20,88	40,33	39,73	32,66	40,08	32,52	37,26	37,34	25,82	10,08	2,65	10,33

Source : A.N.R.H, 2020.

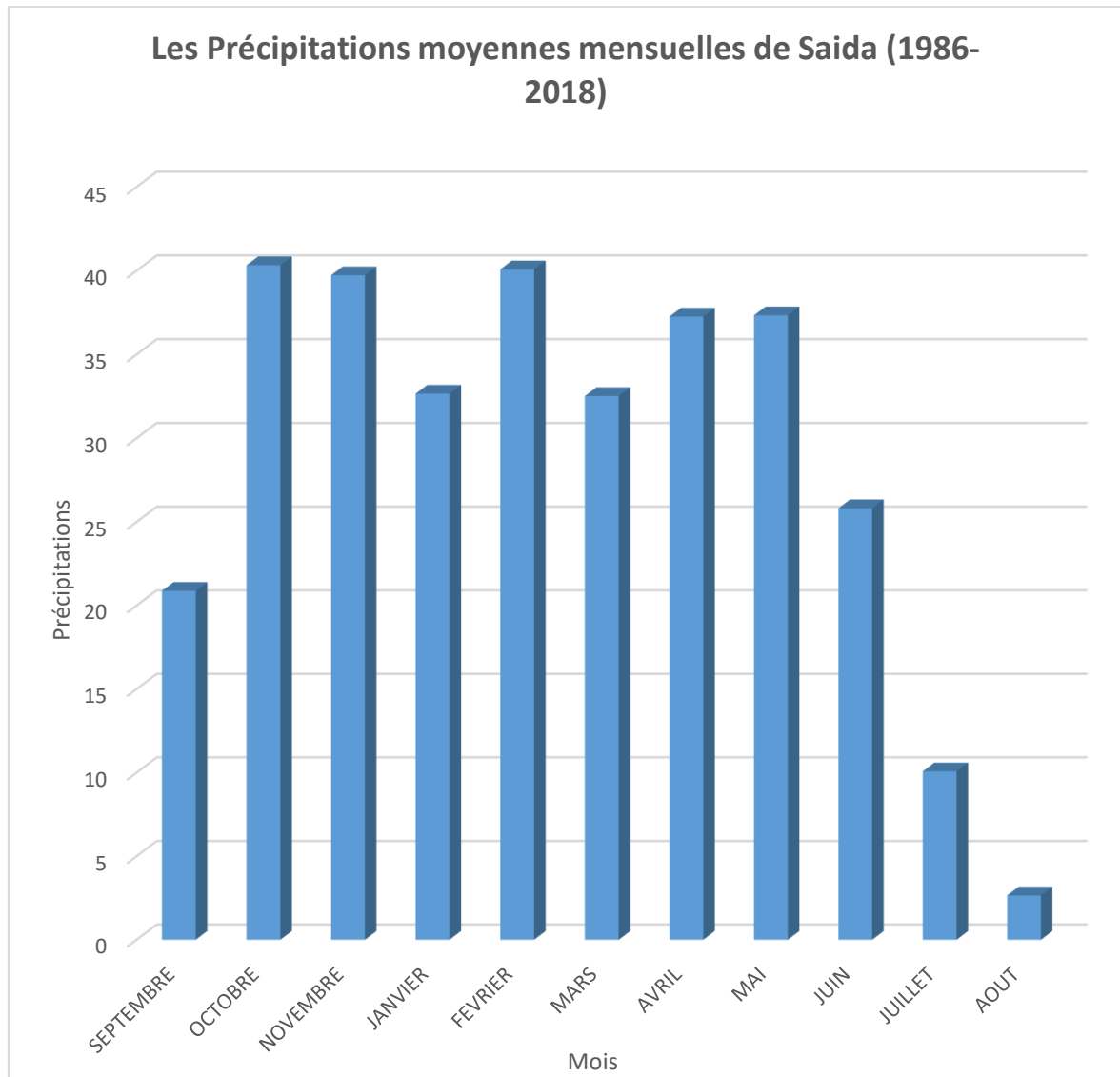


Figure 8. Pluviosité moyenne mensuelle de la station Saida, (Période 1986 – 2018).

D'après l'histogramme de la précipitation moyenne mensuelle, nous remarquons que :

- Le mois octobre a eu le plus de précipitations par rapport aux autres mois.
- Le mois juillet a eu le moins les précipitations par rapport aux autres mois.

Tableau 5 : Régimes saisonniers des précipitations de la station de Saida (1986/2018)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Total
	Sep-oct-nov	Déc- Jan- Fév	Mar- Avr- Mai	Juil- Juil- Aout	
précipitation en (mm)	100,94	105,25	100,41	23,05	329.67
%	30.62%	31.93%	30.46%	6.99%	100%

Source : A.N.R.H, 2020.

Ce tableau révèle l'existence de deux régimes pluviométriques distincts :

- **Une période humide**, qui s'étend de septembre à mai, couvrant ainsi l'automne, l'hiver et le printemps. C'est durant cette phase que se concentrent les précipitations, avec un maximum moyen de 105,25 mm atteint en hiver.
- **Une période sèche**, correspondant aux mois de juin, juillet et août (la saison estivale), où les précipitations sont nettement plus faibles, avec une moyenne de 23,05 mm.

Il en ressort que près des trois quarts ($\frac{3}{4}$) des précipitations annuelles tombent durant la période humide. La répartition saisonnière confirme cette tendance, avec un maximum de pluviométrie en hiver (31,43 % du total annuel) et un minimum estival (6,99 %).

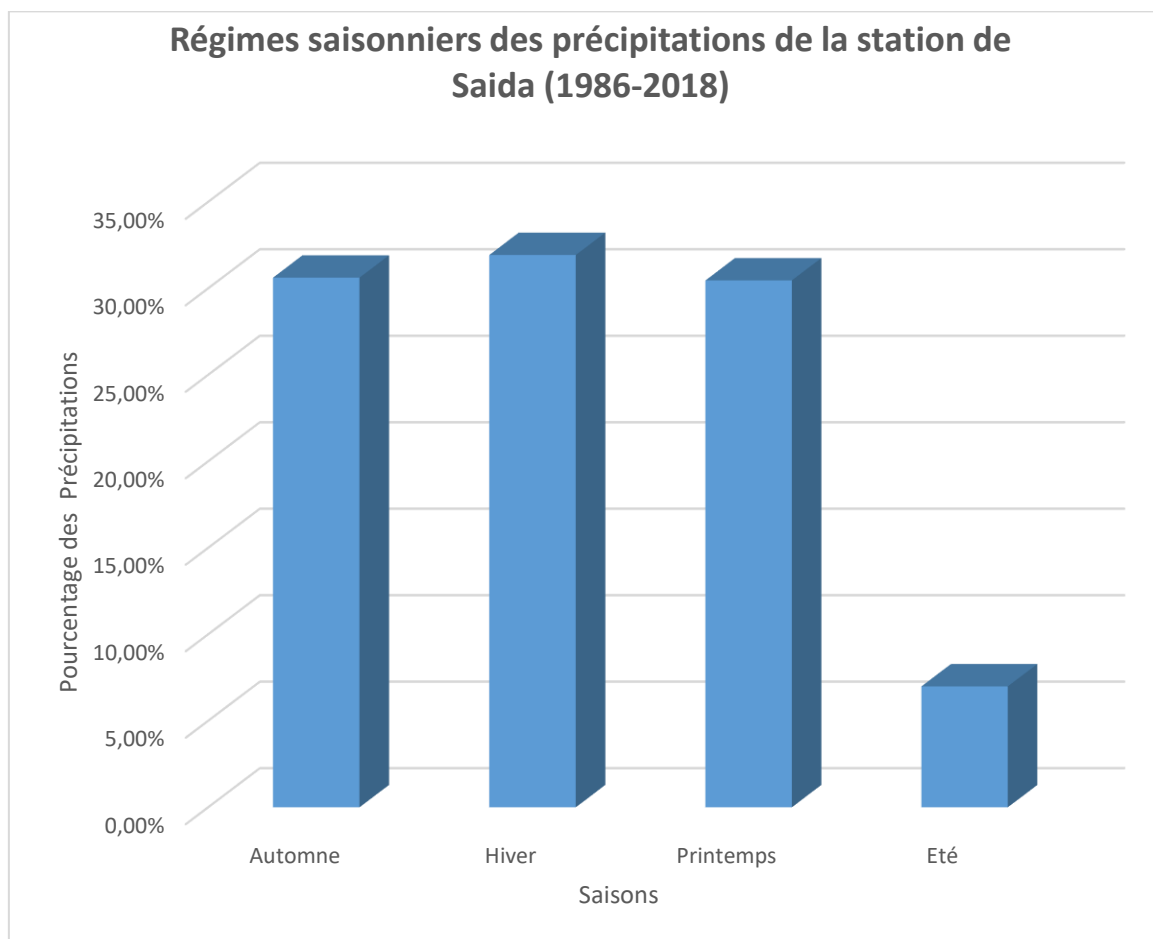


Figure 9. Régimes saisonniers des précipitations de la station de Saida (1986/2018).

2.2. 4.2. Les températures :

La température constitue un paramètre écologique fondamental qui influence directement la végétation. Dans le contexte méditerranéen, elle représente un facteur limitant majeur, régulant l'ensemble des processus métaboliques et déterminant la répartition des espèces (Ramade, 2005).

Notre analyse s'appuie sur les données thermiques de la station de Saida, recueillies sur une période de (1986-2018). Bien que ces informations ne soient pas complétées par des séries équivalentes pour les autres stations

Chapitre II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

de la région - ce qui limite les possibilités de comparaison spatiale - elles permettent néanmoins d'établir un diagnostic fiable des tendances thermiques caractéristiques de la zone d'étude.

Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles de la station de Saida (en °C) (1986 à 2018)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	total
Température	20,94	15,87	9,82	6,58	5,43	6,37	9,63	12,61	17,4	22,75	26,74	26,26	481,04

(Source station Métrologique Saida 2019)

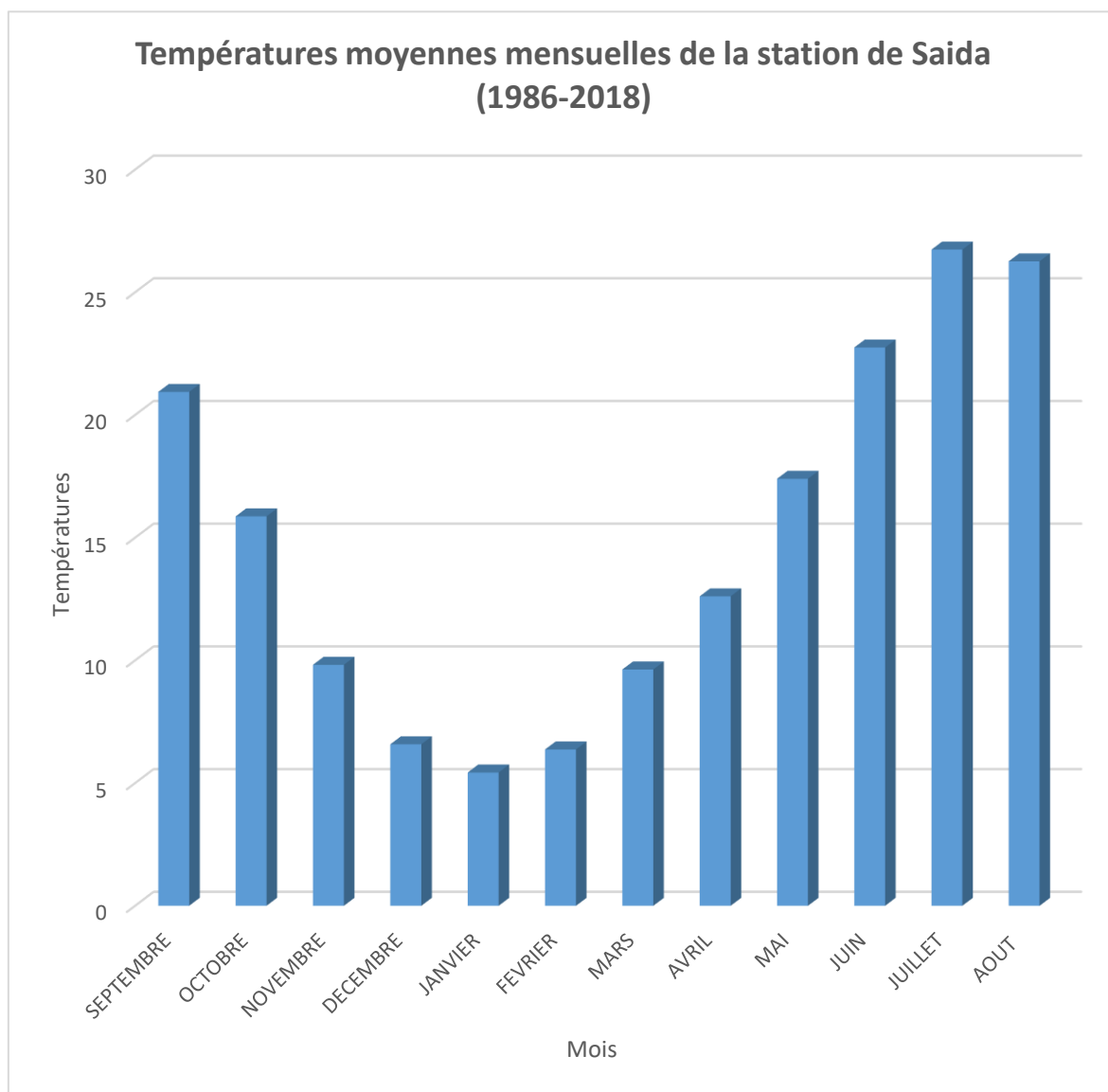


Figure 10. Répartition mensuelle des températures moyennes station de Saida, (en °C)
(Rebahia -1986 à 2018)

Les variations des températures moyenne mensuelle indique que :

- janvier est le mois la plus froid avec moyenne température de 5,43C°.
- juillet set le mois la plus chaud avec 6moyenne température de 26,74C°.

Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN: il permet d'estimer les éléments de climat d'une région de points de vue précipitation et température pendant une période données et permet également de préciser les périodes sèches et humides. Le système du diagramme ombrothermique proposé par Bagnouls et Gaussen en (1953) est simple et le plus utilisé. IL permet de calculer la durée de la saison sèche en portant la pluviométrie mensuelle (P en mm) et la température moyenne mensuelle (T en °C) sur le même graphe, l'échelle de graphe est de $P \text{ (mm)} = 2 T \text{ (°C)}$.

La zone comprise entre la courbe pluviométrique et celle des températures constitue la zone sèche. Selon Bagnouls et Gaussen un mois est biologiquement sec, si le total moyen des précipitations P (mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne T (°C), c'est à- dire $P < 2T$ $P \text{ (mm)} < 2 T \text{ (°C)}$. Cette relation permet d'établir les diagrammes pluviométriques sur les quels la température est à une double échelle de celle des précipitations.

A cet effet, le diagramme ombrothermique de la station de Saida a été établi pour une période de (1986-2018), nous pouvons relevée ce que suit :

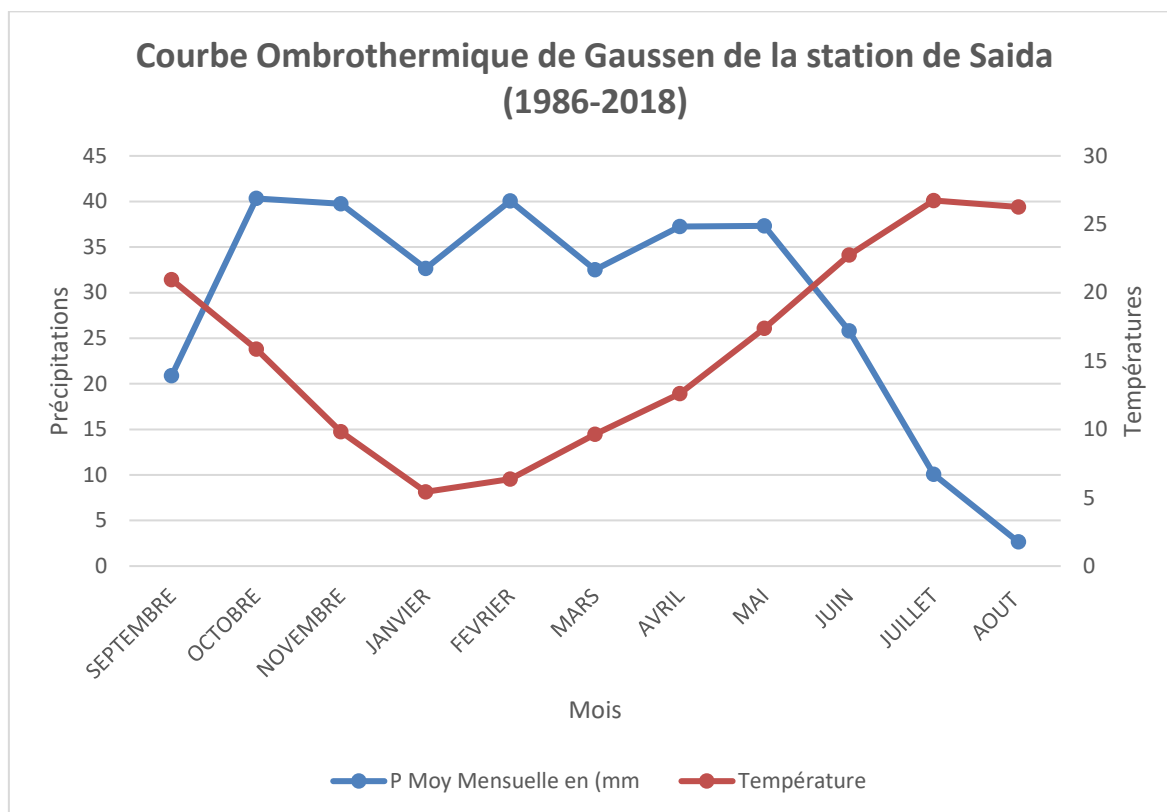


Figure 11. Diagramme Ombrothermique de Gaussen de la station de Saida (1986-2018)

La courbe ombrothermique de la station de Saida révèle que la région est caractérisée par deux périodes climatiques :

- Une période humide, qui s'étend d'octobre à avril. Celle-ci est définie par la surface délimitée entre les deux points d'intersection des courbes de précipitations et de température, où les précipitations sont supérieures à la température.
- Une période sèche, qui couvre les mois de mai à septembre. Durant cette saison, les précipitations sont inférieures aux températures.

2.2. 4.3. Autres facteurs climatiques :

- **Le vent :**

Le vent a un pouvoir très important. Heurtaux (1971) a démontré qu'un vent violent et fréquent même avec un déficit thermique provoque une évaporation intense qu'un vent modéré avec une température relativement

plus élevée. Le vent agit directement sur le sol, particulièrement en été. Dans les monts de Saida, les vents sont très violents surtout de la direction nord-ouest, leurs violences causent des dégâts. Les vents de sud ont une importance relativement faible, ils sont responsables par leurs actions de dessiccation, de propagation du feu, de l'accroissement de l'évaporation associée à la sécheresse estivale très prononcée et longue dans la région de la destination de la strate herbacée et même arbustive sensible. La région d'étude est le siège des vents de différentes directions. Les vents dominants sont ceux du Nord de caractère sec et froid en hiver, provoquant une diminution de la température et de l'humidité avec une fréquence de 14,7 % et ceux venant du Sud (Sirocco) avec une fréquence de 10,6 %. Pour la période d'études considérée, la vitesse moyenne, annuelle des vents sur le massif, varie entre les valeurs 2,8 et 3 m/s avec une moyenne de 2,66 m/s.

- **Le siroco :**

Vent chaud et sec à pouvoir desséchant élevé par l'augmentation brutale de la température et l'abaissement simultané de l'humidité de l'air qu'il provoque. Le sirocco en Algérie est lié aux perturbations de nature orageuse. Il souffle du sud vers le nord généralement en été où il cause plus de dégâts aux sols déjà déshydratés par l'effet de la chaleur estivale. Les maximums sont observés aux mois de Juin, Juillet et Août avec 3 jours en moyenne.

- **La gelée :**

Ce paramètre est utile à savoir car il a une incidence sur le cycle végétatif des cultures. Selon les données de l'office national de météorologie, la période de gelée s'étale moyennement sur une période de 39 jours répartis sur six mois dans l'année soit de novembre à avril (station de Saida) sachant que c'est au mois de décembre et janvier qu'elle intervient avec force.

2.2. 5. Aspect bioclimatique:

Les indices les plus employés utilisent la température et la pluviosité, qui sont les facteurs les plus importants et les mieux connus. Le climat d'une station

donnée résulte de l'action combinée de l'ensemble des facteurs cités précédemment. Pour une expression synthétique de ce dernier, plusieurs auteurs ont proposé des formules de synthèses. Ils se sont contentés sur des données qui ont un impact direct sur la végétation. En climat méditerranéen, ils se sont intéressés surtout à la pluviométrie, aux températures et à leurs variations.

- **Indice d'aridité de De Martonne** : De Martonne (1923) a défini un indice d'aridité I correspondant au rapport entre la moyenne mensuelle des précipitations P (mm) et la moyenne annuelle des températures T (°C), tel que :

$$I = P/(T+10)$$

L'utilisation de cette formule permet de classer nos stations comme suit en se basant sur la répartition suivante :

- De 0 à 5 : climat « Hyper aride ou désertique »

- 5 à 10 : climat « Aride »

- 10 à 20 : climat « Semi-aride »

- 20 à 30 : climat « Subhumide »

- Plus de 30 : climat « Humide »

Tableau 7 : Indice d'aridité de Demartonne

Station	P (mm)	T (°c)	I	Type de climat
Rebahia	329,67	15,03	13,17	Semi-aride

- **Quotient pluviothermique et diagramme d'Emberger:**

Le botaniste Emberger en 1930 a proposé un quotient Pluviothermique (Q_2) qui permet de situer la station dans l'étage bioclimatique convenable, où il fait intervenir le total des précipitations annuelles (P), la moyenne des maxima des mois les plus chauds (M) et la moyenne des minima des mois les plus froids (m) (Philippe, D. 1977). Il permet d'apprécier physiquement la notion d'aridité annuelle en tenant compte des précipitations et de la température. Il est calculé selon l'équation suivante :

$$Q2 = 1000 P / (M+m)/2 * (M-m)$$

Avec :

Q2: Quotient pluviothermique.

P: Précipitation moyenne annuelle en mm.

M: Moyenne de maxima des mois les plus chauds en K°.

m : Moyenne minima des mois les plus froids en K°

M et m sont exprimés en Kelvin ($T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273,5$)

Quand: $50 < Q2 < 100$: Climat tempéré.

$25 < Q2 < 50$: Climat semi-aride.

$10 < Q2 < 25$: Climat aride.

$10 < Q2$: Climat désertique.

P= 329,67 mm ; M= 299,89(°K) ; m = 278,58(°K)

Sur la base des valeurs des précipitations et des températures obtenues on estime que la région est caractérisée par une valeur du quotient d'Emberger $Q2 = 53,49$ qui permet de situer la région de Saida dans l'étage bioclimatique semi-aride à hivers frais.

Tableau 8: Situation bioclimatique de la station Saida

Station	Q2	Etage bioclimatique
SAIDA	35.68	Semi-aride à hiver frais

Conclusion :

La caractérisation détaillée de la zone d'étude a révélé un contexte favorable au développement d'un système karstique actif. La structure géologique, dominée par les formations carbonatées du Jurassique intensément fracturées, constitue l'ossature du réservoir aquifère. Le climat semi-aride, avec une pluviométrie irrégulière et une évaporation élevée, accentue la pression sur la ressource en eau et sa vulnérabilité. La combinaison d'un relief accidenté, d'une lithologie propice à la karstification et d'activités anthropiques (agriculture) définit un terrain d'étude complexe et représentatif des enjeux des karsts méditerranéens. Cette connaissance fine du milieu fournit toutes les données de base nécessaires à l'application méthodologique qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef, Nord-Ouest algérien

Introduction :

Ce chapitre constitue le cœur méthodologique de la thèse. Il a pour objectif de décrire de manière précise et justifiée la procédure suivie pour évaluer et cartographier la vulnérabilité de l'aquifère du massif de Sidi Youssef. Après une présentation succincte du site d'étude et de son contexte hydrogéologique, le chapitre se concentrera sur l'explication détaillée des deux méthodes multicritères choisies : la méthode PAPRIKA (Potentially all Pairwise Rankings of all possible Alternatives), adaptée spécifiquement aux karsts, et la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) utilisée pour pondérer objectivement les critères. Le processus de collecte des données, leur intégration dans un SIG (Système d'Information Géographique) et le mode de calcul final de l'indice de vulnérabilité seront explicités.

3.1. Présentation de la région de djebel Sidi Youssef :

3.1. 1. Localisation géographique :

Le djebel Sidi Youssef est un massif montagneux situé dans la région de Saïda, au nord-ouest de l'Algérie, avec des coordonnées géographiques approximatives de 34°49' de latitude nord et 0°09' de longitude est. Cette montagne, dont l'altitude varie entre 1 200 et 1 400 mètres, s'inscrit dans le contexte géologique et géomorphologique de l'Atlas tellien, une chaîne montagneuse s'étendant le long de la côte méditerranéenne de l'Afrique du Nord. L'Atlas tellien est caractérisé par des formations sédimentaires datant principalement du Mésozoïque et du Cénozoïque, composées de calcaires, de marnes et de grès, qui ont été intensément plissées et fracturées lors des phases tectoniques associées à l'orogénèse alpine (Boudjema, 1987). Ces processus tectoniques ont contribué à la formation du relief actuel, marqué par des structures complexes et une morphologie variée incluant crêtes, vallées et plateaux.

La région de Saïda, où se trouve le djebel Sidi Youssef, est également reconnue pour son importance hydrogéologique, avec des aquifères localisés dans les formations calcaires et gréseuses qui alimentent les ressources en eau de la région. D'un point de vue géomorphologique, la montagne s'intègre dans un paysage dynamique influencé par l'érosion et les mouvements tectoniques récents, qui continuent de façonner le relief. Les études menées dans la région, notamment celles de (Benaouali et al. 2006), ont mis en évidence les interactions entre tectonique et sédimentation dans le bassin de Saïda, révélant des phases de compression et d'extension ayant modelé la structure

géologique de la zone. Ces travaux soulignent également l'importance du djebel Sidi Youssef comme témoin des processus géodynamiques ayant affecté l'Atlas tellien au cours du temps géologique.

En résumé, le djebel Sidi Youssef constitue un site scientifique majeur pour la compréhension de l'évolution géologique et géomorphologique du nord-ouest algérien. Sa position au sein de l'Atlas tellien, ses caractéristiques lithologiques et ses structures tectoniques en font un sujet d'étude privilégié pour les géo scientifiques, notamment dans l'analyse des paysages montagneux et des ressources naturelles de la région (Benaouali et al. 2006). (Voir figures 12 et 13).

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef

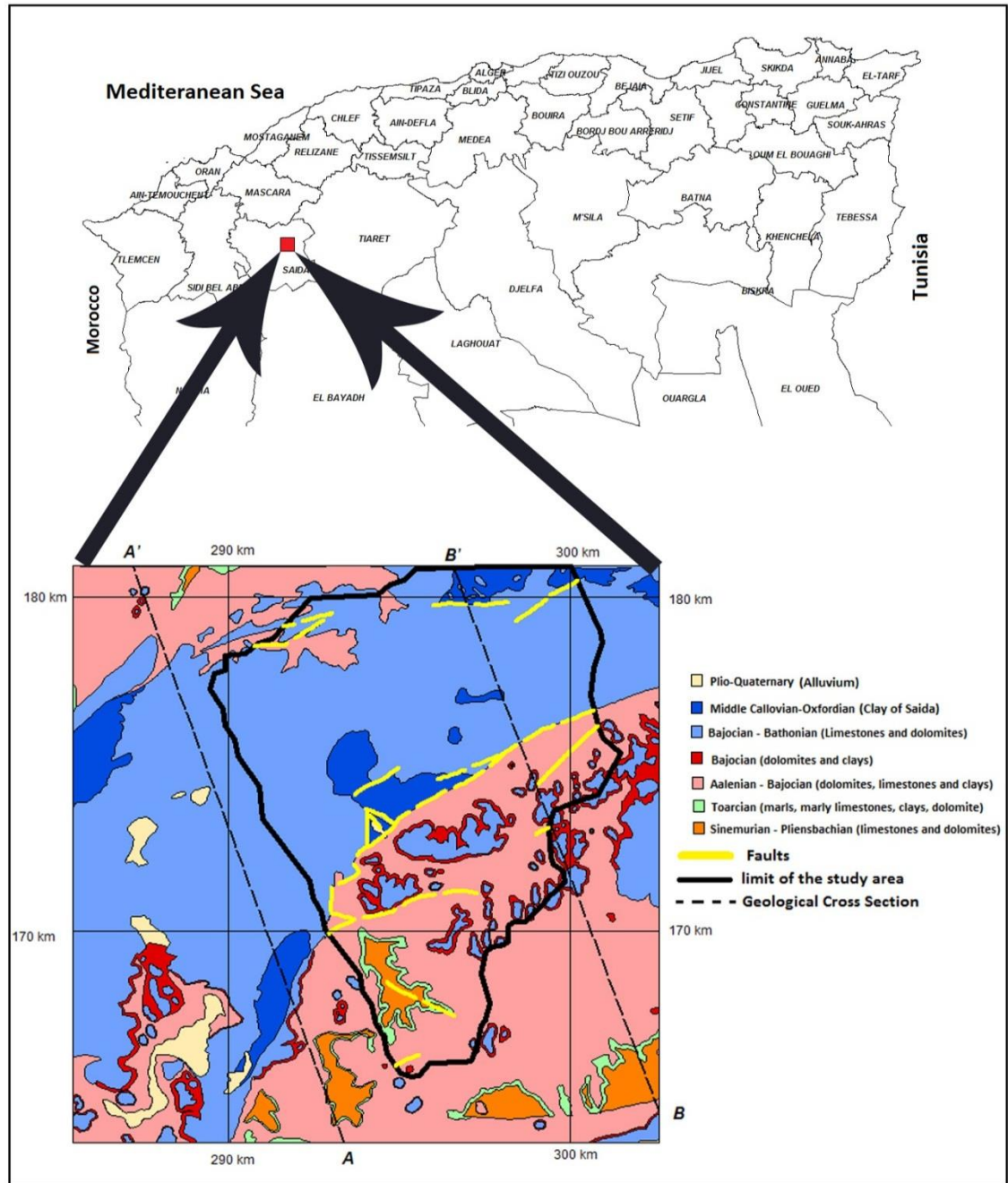


Figure 12. Carte géologique et de localisation de la zone d'étude.

stratégies d'adaptation pour renforcer la résilience de la région face aux stress climatiques croissants (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), 2019 ; Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (Algérie), 2020).

3.1. 3. Contexte hydrogéologique :

Le contexte hydrogéologique de la région du djebel Sidi Youssef est marqué par un système aquifère complexe, influencé par la géologie locale et les conditions climatiques semi-arides. Cette zone est principalement constituée de formations calcaires et gréseuses crétacées, qui forment des réservoirs aquifères majeurs. La recharge des aquifères est assurée par les précipitations saisonnières, mais elle reste limitée en raison des taux d'évaporation élevés et de la faible perméabilité des sols. Les études hydrogéologiques menées dans la région ont mis en évidence une exploitation intensive des eaux souterraines pour l'agriculture et l'alimentation domestique, entraînant une baisse significative des niveaux piézométriques et une dégradation de la qualité de l'eau due à la salinisation et aux pollutions anthropiques. Ces travaux soulignent la nécessité d'une gestion durable des ressources en eau, intégrant des modèles hydrogéologiques précis et des stratégies de recharge artificielle pour préserver ces aquifères vulnérables.

3.2. Matériels et méthodes :

3.2.1. La méthode PAPRIKA :

La méthode PaPRIKa, élaborée par le BRGM, est une évolution de la méthode RISKE2 afin de distinguer les critères associés à la structure, des critères associés au fonctionnement hydrogéologique. Elle signifie « Protection des aquifères karstiques basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et le degré de Karstification ». Elle se base donc dans un premier temps sur les critères : couverture Protectrice, Réservoir souterrain, Infiltration, degrés de Karstification. Dans un deuxième temps, le critère Infiltration est modifié avec la notion de vitesse de transfert au sein de l'aquifère permettant d'obtenir une carte de vulnérabilité du captage pouvant servir à la délimitation des périmètres de protection.

La méthodologie de la méthode PaPRIKa est décrite dans le guide RP-57527-FR du BRGM.

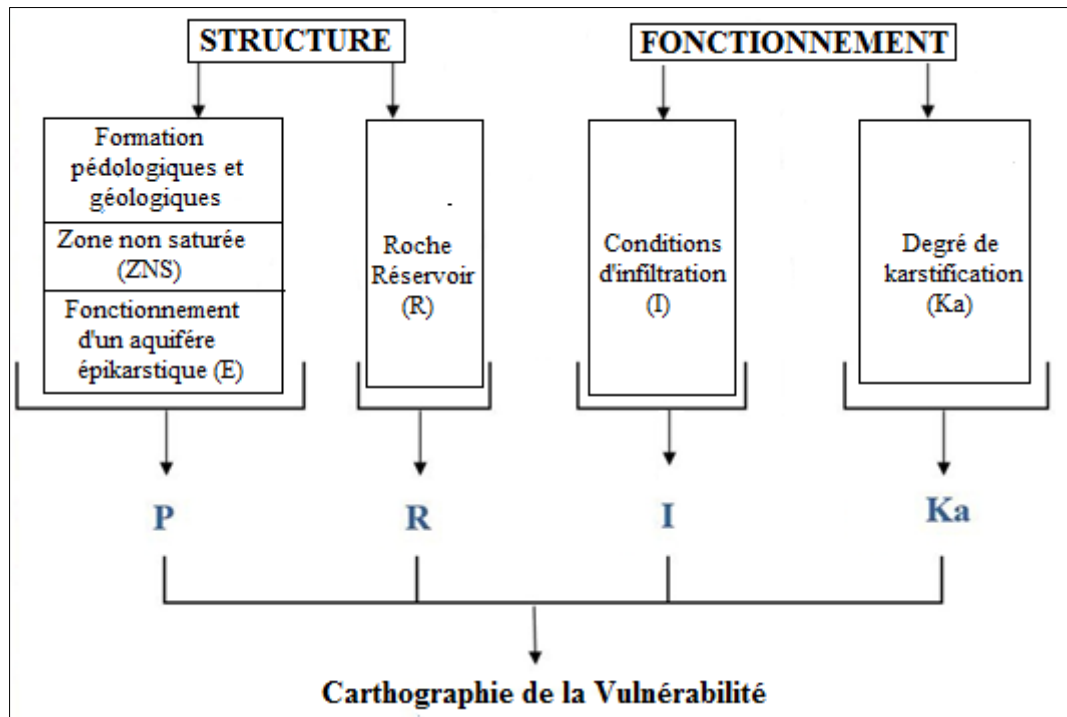


Figure 14. Schéma de la méthode PaPRIKA.

3.2.1.1. Principe de la méthode :

PaPRIka est une méthode multicritère de cartographie intrinsèque d'un aquifère karstique.

- **Critère P :** Protection vis-à-vis de l'infiltration

« P » se rapporte à la partie supérieure de l'aquifère, à la tranche située au-dessus de la roche aquifère et de la zone noyée. Ce critère caractérise la protection induite par un retard à l'infiltration des eaux météoriques.

Ainsi, trois « sous-critères » vont influencer ce retard :

- S : « couverture pédologique et géologique » ;
- E « aquifère épikarstique » ;
- ZNS « caractéristique de la zone non saturée » (nature, épaisseur et fracturation).

C'est le sous-critère le plus protecteur, qui est alors retenu dans chaque maille de l'aire d'alimentation. En revanche, dans les bassins versants des pertes, le critère P caractérise l'état de surface vis-à-vis du refus à l'infiltration.

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef

➤ S : Couverture pédologique et géologique

S est une couche protectrice de surface qui correspond à l'épaisseur recouvrant l'épikarst, s'il existe, ou recouvrant les roches réservoir du système karstique. La couche S est donc caractérisée, par la couverture pédologique (sol) ou par les formations superficielles (moraine, limons de plateau,...). Dans un premier temps, la nature de sol est définie en croisant la texture (dominante argileuse, dominante limoneuse ou dominante sableuse), d'après les classes du tableau suivant :

Tableau 9 : Détermination de la nature d'un sol en fonction de sa texture et sa proportion de cailloux

		Texture		
		1 (argiles)	2 (limons)	3 (sables)
% CAILLOUX	1 (0-30%)	1	1	2
	2 (30-60%)	1	2	3
	3 (>60%)	2	3	4

Tableau 10 : Détermination des classes du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur

S		NATURE DU SOL				
		Inconnue	1	2	3	4
Zones imperméabilisées		S0				
EPAISSEUR	> 5 m	S1	S1	S1	S2	S3
	1-5 m	S1	S1	S2	S3	S3
	60-100 cm	S2	S2	S3	S4	S4
	30-60 cm	S3	S3	S4	S4	S4
	0-30 cm	S4	S4	S4	S4	S4

➤ E : Aquifère épikarstique :

L'épikarst correspond à la partie superficielle d'une formation carbonatée fortement altérée située directement sous la couverture pédologique lorsqu'elle est présente. La porosité et la perméabilité sont plus fortes à proximité de la surface, ces paramètres hydrodynamiques diminuent avec la profondeur. Ainsi, l'eau d'infiltration des précipitations peut-être être stockée au niveau de la base de l'épikarst et constituer un aquifère perché susceptible d'alimenter des sources temporaires. Ce stockage temporaire peut donc constituer un retard à l'infiltration. L'épikarst n'est pas toujours présent.

Quatre classes E sont ainsi définies dans la méthode :

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef

Tableau 11 : Description du critère E, * Aquifère épikarstique *

Critère E : aquifère épikarstique	
E1	Aquifère perché avec présence de puits et d'un niveau piézométrique, voire d'un lac temporaire
E2	Aquifère épikarstique continu latéralement avec des sources temporaires d'un débit de l'ordre du litre/seconde et existence de puits collectant les eaux ; effet de stockage vérifié
E3	Existence d'un aquifère avec présence de sources de débits peu importants et d'une continuité latérale plus ou moins bien représentée ; l'effet de retard est limité ;
E4	Pas d'aquifère épikarstique

➤ **ZNS : Caractéristique de la zone non-saturée :**

La zone non-saturée de l'aquifère assure le transfert de l'eau vers la zone saturée.

La vitesse de ce transfert va donc dépendre de la lithologie, de l'épaisseur ainsi que du degré de fracturation/fissuration.

Quatre classes sont tout d'abord définies en fonction de la lithologie :

Tableau 12 : Tableau décrivant la lithologie de la zone non saturée.

Lithologie de la ZNS (LZNS)	
LZNS0	Couches d'argiles de forte épaisseur
LZNS1	Marno-calcaires, craie
LZNS2	Calcaires en petits bancs et/ou intercalation d'argiles
LZNS3	Calcaires en gros bancs massifs

Ces quatre classes sont ensuite complétées avec les données de fracturation et d'épaisseur telle qu'indiqué dans le tableau suivant pour obtenir cinq classes caractérisant la zone non saturée :

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef

Tableau 13 : Tableau de l'attribution de la valeur de l'indice ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation

ZONE NON SATURÉE (ZNS)		EPAISSEUR		
		> 15 m	15-50 m	> 50 m
FACTURATION	Faible-moyenne	LZNS+1	LZNS	LZNS
	Importante	LZNS+1	LZNS+1	LZNS+1
	Forte au niveau de faille	4	4	4

➤ L'état de surface :

L'état de surface peut favoriser le ruissellement vers une perte, Ce critère est le seul critère à renseigner au niveau des bassins versants des pertes temporaires ou pérennes.

Quatre classes P sont ainsi définies dans la méthode :

Tableau 14 : Description de l'état de surface dans les bassins versants

État de surface dans les bassins versants des pertes	
P1	Terrains caractérisés par de fortes perméabilités : graviers et conglomérats non cimentés
P2	Terrains caractérisés par des perméabilités moyennes : arènes granitiques, sables, calcaires
P3	Terrains caractérisés par des perméabilités faibles : grès peu fissurés, conglomérats cimentés, roches magmatiques et métamorphiques saines.
P4	Terrains caractérisés par des perméabilités très faibles : argiles, marnes, zones de cours d'eau pérenne ou temporaire

➤ Carte du Critère P :

Le critère P résulte du croisement des cartes S, E et ZNS pour les zones karstiques et de la carte « état de surface » pour les zones de pertes.

En chaque point, c'est le critère le plus protecteur qui est retenu, pour tracer la carte P.

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef

- **Critère R : Nature de la roche réservoir**

Ce critère caractérise la nature de la roche réservoir en considérant d'une part la nature lithologique (calcaires à marnes) et d'autre part le caractère massif ou non de la roche et l'état de fracturation locale à régionale.

La cartographie de ce critère est réalisée à partir de la carte géologique (1/50 000e), des coupes géologiques réalisées au niveau des systèmes karstiques étudiés et par des connaissances du terrain.

Quatre classes R sont ainsi définies dans la méthode :

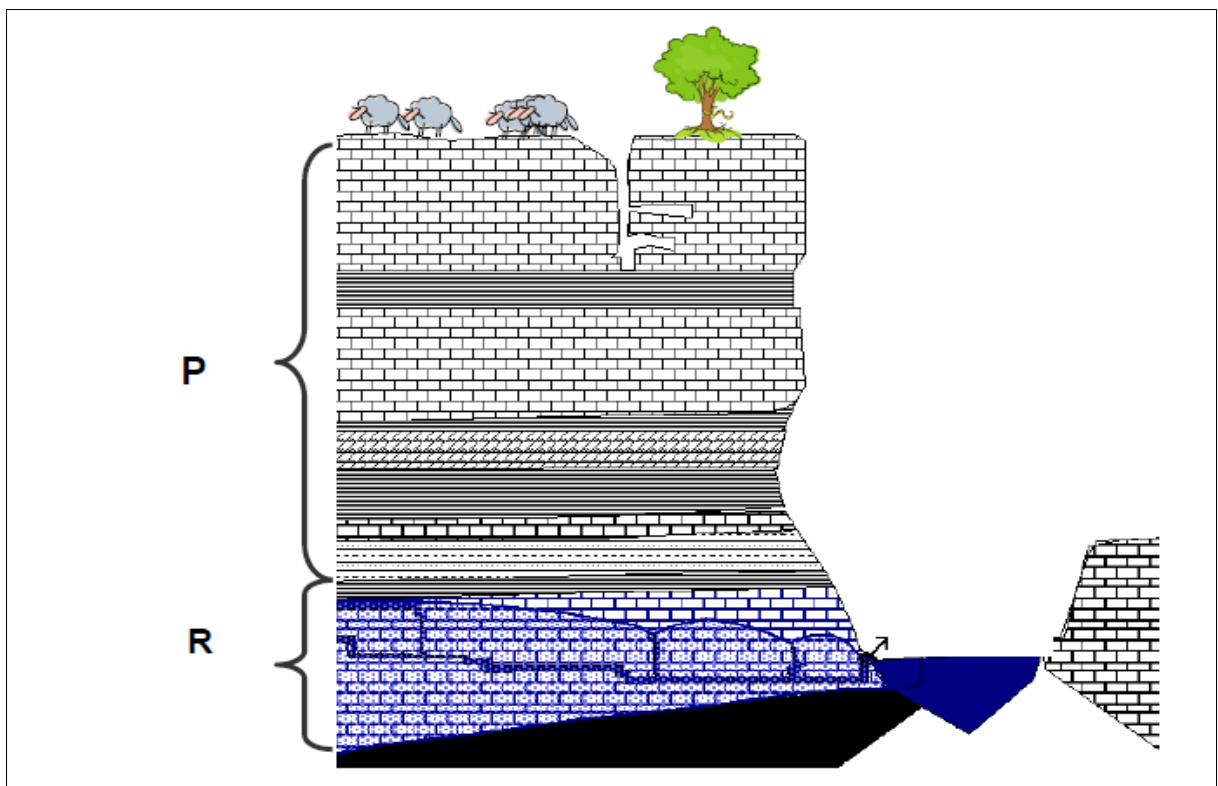


Figure 15. Schéma de localisation dans le karst du critère P et R (source: BRGM).

Tableau 15 : Tableau description des indices du critère R.

Critère R : Nature de la roche réservoir	
Indice	Description
R1	Cette classe regroupe les formations marno-calcaires (25-35% de minéraux argileux) ainsi que la craie, affectée d'une déformation faible qui auront une influence limitée en termes de vulnérabilité, les circulations d'eau restant là encore relativement lentes.
R2	Cette classe regroupe les formations de calcaires marneux (la proportion

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef

	argileuse est plus faible que pour la classe R1 : 10-25%), craie affectée d'une fracturation forte ; calcaires et dolomies en petits et gros bancs avec fracturation homogène et pendage ou contre pendage inférieur à 45°, dont le sens est favorable à un écoulement en direction du captage comme cela l'est confirmé par ailleurs lors de la délimitation préalable du bassin d'alimentation.
R3	Cette classe regroupe les formations calcaires et dolomitiques, soit massives en gros bancs fracturés, soit en plus petits bancs avec des intercalations argilo-marneuses avec une fracturation homogène. Ce type de formation permet des circulations relativement faciles et rapides : Calcaires et dolomies massif en gros bancs fracturés et karstifiés, Calcaires et dolomies en gros bancs avec un pendage ou contre pendage supérieur à 45° par rapport à la localisation de la source.
R4	Cette classe regroupe les zones reconnues cartographiées ou présumées de réseau de cavités et de zones de failles affectant le réservoir, parallèles au gradient hydraulique.

- **Critère I : Conditions d'infiltration**

Le critère I caractérise l'infiltration. Dans le karst, l'infiltration est à la fois diffuse et concentrée en certains points (pertes). Par définition, l'infiltration dépend à la fois de la pente des terrains et également de leur nature. Dans la méthode PaPRIKa, le critère I repose d'une part sur la notion de pente, et d'autre part sur des critères morphologiques (dolines, vallées sèches, lapiez, pertes).

Ainsi, cinq classes I sont définies dans la méthode :

Tableau 16 : Tableau description du critère I

Critère I : Conditions d'infiltration	
Indice	Description
I0	Cette classe regroupe les zones du bassin où les pentes sont très fortes (>50%) induisant un ruissellement de l'eau très important (vers d'autres aquifères ou la mer etc...) et une infiltration négligeable voire même nulle.
I1	Zones où les pentes sont fortes (15-50%) favorisant grandement le ruissellement.
I2	Zones du bassin où la pente est moyenne (5-15%) et/ou zones où le ruissellement est limité (vallées sèches, lapiez peu développé verticalement).
I3	Zones à pente faible (0-5%) où le ruissellement est limité et l'infiltration beaucoup plus forte. Les zones avec dolines et poljés sont prises en compte dans cette classe. De plus, les lapiez bien développés verticalement avec des cannelures métriques font partie de cette classe.
I4	Manifestations de l'infiltration concentrée au niveau des pertes. Ne sont retenues quand la classification « perte » que les pertes situées sur un cours d'eau pérenne ou temporaire. À la perte elle-même est associée le bassin versant du cours d'eau l'alimentant dont l'état de surface est caractérisé à

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef

	l'aide de P.
--	--------------

- **Critère Ka : Degré de karstification**

Ce critère Ka définit le degré de développement du karst. La fonctionnalité d'un système traduit la structure des vides résultants de la karstification, mais également de l'organisation des écoulements. L'aquifère est alors fonctionnel, caractérisé par l'existence de vitesses d'écoulement souterrain très rapides (jusqu'à quelques centaines de mètres par heure) et par une vulnérabilité spatio-temporelle des caractéristiques physiques et hydrauliques de l'aquifère. Le caractère unaire ou binaire du système karstique est également pris en compte dans la définition de ce critère.

Tableau 17 : Tableau de description de l'indice Ka.

Critère Ka : degré de karstification	
Indice	Caractéristiques
Ka1	Degré de karstification correspondant aux systèmes de type 1 (ayant une aire d'alimentation <10 km ² et un débit moyen annuel faible) et uniquement si le système karstique est caractérisé par un comportement peu fonctionnel (faible variabilité du débit et des paramètres physico-chimiques), et en l'absence de preuves ou d'indices de circulation rapide.
Ka2	Degré de karstification de type 2 (aire d'alimentation >10 km ²) ou de type 3 unaire et peu fonctionnel (la fonctionnalité est appréciée à partir d'indices caractérisant le degré de karstification tels que des vitesses de traçages rapides, la variabilité du débit et de la chimie de la source), soit à des systèmes complexes tels que définis dans la classification de Mangin (domaine de référence 1)
Ka3	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 2 ou 3, fonctionnels et binaires/unaires ; il s'agit soit de systèmes binaires peu fonctionnels ou unaires très fonctionnels. Le réseau karstique de ce type de systèmes karstiques est bien développé avec la présence d'un drain collecteur de petite taille connu, connecté avec la surface. Les vitesses de transit mises en évidence à l'aide d'essais de traçages sont importantes (entre 50-100 m/h). Domaine de référence 2 de la classification de Mangin.
Ka4	Degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques binaires de type 2. Le réseau karstique très bien développé avec la présence d'un gros collecteur connecté avec la surface, comme l'atteste la fonctionnalité du système. Les vitesses de transit mises en évidence à l'aide d'essais de traçage sont importantes (>100 m/h). Domaines de référence 3 voire 4 de la classification de Mangin.

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef

3.2.1.2. Poids des paramètres et classes de vulnérabilité :

L'indice de la vulnérabilité globale **Vg** se calcule par la formule suivante :

$$Vg = p \times P + i \times I + r \times R + k \times Ka$$

- i, r, p et k correspondent au poids des critères,

- I, R, P et Ka correspondent à la valeur des critères indexés.

La pondération se fait selon la règle suivante : la somme des pondérations des critères relatifs au fonctionnement de l'aquifère karstique (K et I) est comprise entre 50 et 65% alors que la somme des pondérations des critères relatifs à la structure de l'aquifère karstique (P et R) est comprise entre 35 et 50%.

Pour les bassins versants des pertes seuls, les critères I et P sont pris en considération selon la pondération suivante : 50% I et 50% P.

Les valeurs ne sont pas uniques, des intervalles des valeurs sont proposés afin d'évaluer la sensibilité des critères, ils sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 18 : Valeurs d'intervalles des critères de vulnérabilité.

Critères	Abréviation	Pondération (%) pour le réservoir karstique	Pondération (%) pour le bassin amont des pertes
Protection	P	20-25	50
Roche réservoir	R	15-20	/
Infiltration	I	40-30	50
Karstification	Ka	20-30	/

Les pondérations utilisées sont données pour chaque cartographie de la vulnérabilité. Le meilleur contraste est recherché.

Tableau 19 : Les classes de vulnérabilité définies en catégories associées à un indice et une couleur.

Reclassification	Indice	Vulnérabilité
3,2 - 4	4	Très élevée
2,4 – 3,19	3	Élevée
1,6 – 2,39	2	Modérée
0,8 – 1,59	1	Faible
0 – 0,79	0	Très faible

3.2.2. La méthode AHP :

3.2.2.1. Principe de la méthode AHP :

Le processus d'analyse hiérarchique ou AHP (de l'anglais Analytic Hierarchy Process) a été développée par Saaty en 1980 permet aux décideurs de modéliser un problème complexe dans une structure hiérarchique montrant les relations entre le but, les objectifs (critères), les sous objectifs et les alternatives (voir la figure 16.). Tout en accélérant et facilitant le processus de décision.

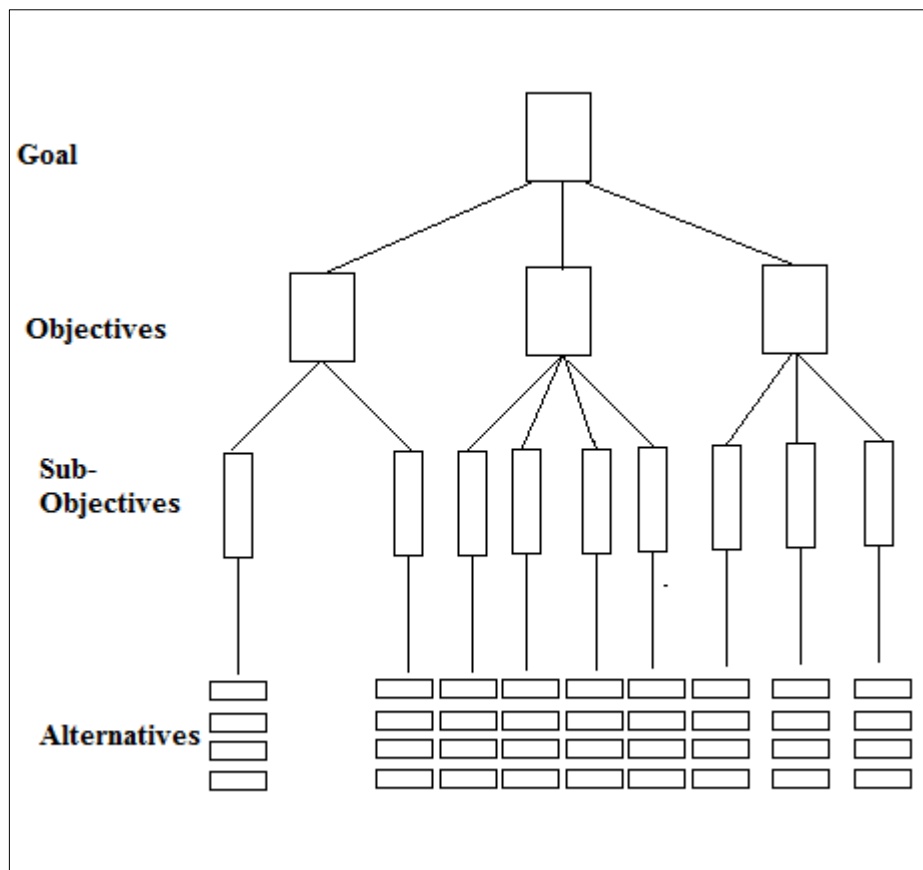


Figure 16. Hiérarchie de la décision (Forman E.H ; 2001).

3.2.2.2. Démarche de la méthode AHP :

La méthode AHP repose sur trois principes fondamentaux dont l'énoncé est donné dans les paragraphes qui suivent :

- **Construction de la hiérarchie :**

Cette phase consiste à décomposer le problème décisionnel en ses composantes principales. Ensuite, la construction de la hiérarchie s'opère selon une démarche descendante. Elle conduit à structurer la réalité complexe en une arborescence hiérarchique.

- **Etablissement de priorités :**

Cette étape consiste à comparer l'Importance Relative des Critères (IRC) ou (Poids) de tous les éléments appartenant à un même niveau hiérarchique. Cette comparaison s'effectue par éléments pris deux à deux par rapport à l'élément du niveau supérieur en tenant compte d'une échelle numérique présentée dans le tableau 20.

Tableau 20 : Echelle de mesure de la méthode AHP proposée par Saaty and Kearns.

Echelle numérique	Echelle verbale	Description
1	Importance égale des deux critères : Egalement important	Les deux critères contribuent autant au critère père.
3	Faible importance d'un critère par rapport à un autre : Légèrement plus important	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre.
5	Importance forte ou déterminante d'un critère par rapport à un autre : Fortement important	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un critère par rapport à un autre.
7	Importance attestée d'un critère par rapport à un autre : Très fortement plus	Un critère est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la

Chapitre III : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques à l'aide des méthodes PAPRIKA et AHP : étude appliquée au massif de Sidi Youssef

	important	pratique.
9	Importance absolue d'un critère par rapport à un autre : Absolument plus important	Les preuves favorisant un critère par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible.
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations

- **Cohérence logique :**

Pour garantir la cohérence des jugements, l'AHP introduit l'Indice de Cohérence (IC) et le Ratio de Cohérence (RC).

L'IC est calculé à l'aide de la formule suivante (2) :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Où λ_{max} est la valeur propre maximale de la matrice de comparaison, et n représente le nombre de critères.

Le RC est ensuite calculé comme le rapport entre l'IC et un Indice de Cohérence Aléatoire (RI), qui dépend du nombre de critères n , selon l'équation (3) :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Un $RC \leq 0,10$ est généralement considéré comme acceptable, indiquant que les jugements sont suffisamment cohérents. L'AHP est largement utilisé dans divers domaines tels que la gestion de projet, l'ingénierie et la planification stratégique, grâce à sa capacité à intégrer des jugements à la fois qualitatifs et quantitatifs.

Pour approfondir, les travaux fondateurs de Saaty (1980) dans son ouvrage *The Analytic Hierarchy Process* offrent une compréhension exhaustive de la méthode. Par ailleurs (Saaty, 1980), des applications et revues récentes, comme celles de Vaidya et Kumar dans leur étude sur les applications de l'AHP (*European Journal of Operational Research*) (Vaidya et Kumar, 2006), apportent des éclairages précieux sur son utilisation pratique dans des

contextes scientifiques. Ces références constituent une base solide pour comprendre et appliquer cette méthode dans des cadres académiques et professionnels.

3.2.2.3. Avantages de la méthode :

- Structuration claire des critères.
- Flexibilité dans l'intégration de données qualitatives et quantitatives.

3.2.2.4. Limites de la méthode :

- Subjectivité dans les jugements experts.
- Risque d'incohérence dans les comparaisons (Saaty, 2003).

3.2.3. Approches combinées AHP-PAPRIKA :

L'intégration de l'AHP et de PAPRIKA permet de combiner leurs avantages :

- **AHP** pour la pondération des critères.
- **PAPRIKA** pour l'agrégation des préférences et le classement des alternatives.

Cette synergie a été appliquée avec succès dans des études environnementales (Feizizadeh et al ,2017) et pourrait améliorer l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères karstiques.

-Synthèse et positionnement de la recherche :

Cette thèse propose une approche innovante combinant **PAPRIKA** et **AHP** pour évaluer la vulnérabilité des aquifères karstiques du massif de Sidi Youssef. Contrairement aux méthodes classiques (DRASTIC, COP), cette approche permet une meilleure intégration des spécificités karstiques et des critères qualitatifs.

Les résultats attendus contribueront à une gestion plus durable des ressources en eau en Algérie, en fournissant des cartes de vulnérabilité précises et adaptées aux contextes locaux.

Conclusion :

La méthodologie employée dans cette thèse a été scrupuleusement définie pour répondre aux spécificités du milieu karstique. L'approche combine la finesse d'analyse de la méthode PAPRIKA, qui décompose le système en facteurs clés (Protection, Réservoir, Infiltration, Karstification), et la rigueur de la méthode AHP, qui permet une pondération objective et hiérarchisée de ces facteurs basée sur des comparaisons par paires. L'utilisation concertée de ces deux méthodes, intégrée dans un environnement SIG, offre un cadre robuste, reproductible et adapté pour produire une cartographie fiable de la vulnérabilité intrinsèque. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus par l'application de cette méthodologie.

CHAPITRE IV

RESULTAS ET ANALYSES

Introduction :

Ce chapitre présente et interprète les résultats obtenus suite à l'application de la méthodologie décrite précédemment. Il s'articulera autour de la présentation des cartes des facteurs individuels (P, R, I, Ka) puis des différentes cartes synthétiques de vulnérabilité obtenues selon plusieurs scénarios de pondération (V0, V1, V2, VAHP). Une analyse comparative de ces différentes versions sera réalisée pour évaluer la sensibilité du modèle et identifier la cartographie la plus robuste et la plus représentative de la réalité du terrain. Les résultats seront discutés et confrontés aux études antérieures, tout en soulignant les apports, les limites et les implications pratiques de ce travail pour la gestion de la ressource en eau.

4. RÉSULTATS :

4.1. Carte du facteur P :

L'évaluation de la couverture protectrice (P) repose sur l'analyse des caractéristiques des sols, de la zone non saturée (ZNS) et de la présence ou non d'un aquifère épikarstique. La superposition cartographique de ces critères permet de retenir les valeurs les plus protectrices d'un critère par rapport à un autre pour générer la carte P.

La région du Djebel Sidi Youssef présente un contexte karstique majoritaire ($\approx 60\%$ de la superficie d'étude), rendant le système vulnérable aux perturbations. Les formations dolomitiques karstifiées y sont prédominantes. L'absence d'épikarst observable et de pertes superficielles a permis d'exclure le critère E (épikarst) dans notre modélisation. Ainsi, la carte P a été élaborée exclusivement à partir des cartes S (sols) et UZ (zone non saturée)

Concernant le facteur S, deux types de sols ont été identifiés :

- Sols calcaires (classés S1)
- Calcaires humifères (classés S2)

-La cartographie du facteur S s'appuie sur :

-La carte pédologique régionale (échelle 1:500 000)

-La carte mondiale des sols numérisée (FAO, 2003)

Pour le facteur UZ, les niveaux les plus protecteurs correspondent à des lithologies mamo-calcaires, modérément fracturées et exemptes d'accidents tectoniques majeurs.

L'épaisseur de la ZNS dépasse systématiquement 50 m sur l'ensemble du site. La carte UZ a été construite à partir :

- De la carte géologique régionale
- Des coupes géologiques disponibles
- L'indexation UZ a été réalisée comme suit : (Figure 17)
- UZ = 0 : Argiles de Saïda et marnes
- UZ = 1 : Argilites variées
- UZ = 2 : Carbonates
- UZ = 3 : Calcaires fortement à très fortement fracturés
- UZ = 4 : Zones de faille (fracturation majeure)

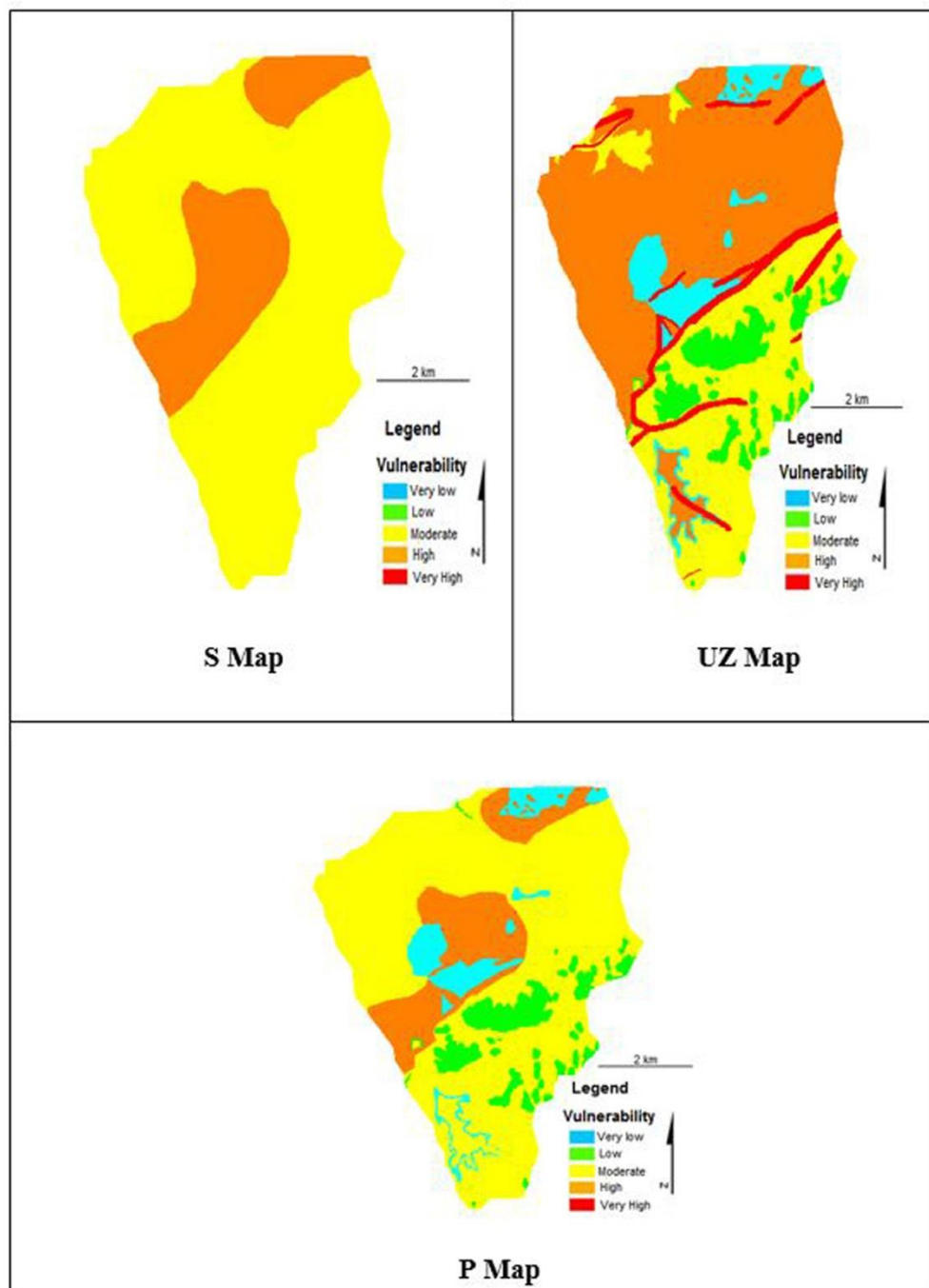


Figure 17. Carte S (sols), UZ (zone non saturé) et couverture protectrice P pour le système karstique du Djebel Sidi Youssef

4.2. Carte du facteur R :

La spatialisation du critère R a été réalisée à partir de la carte géologique de la région, intégrant des données de surface issues des coupes géologiques et des observations de terrain. Le réservoir karstique étudié se développe au sein des différents niveaux litho stratigraphiques de la série carbonatée, principalement représentée par le membre carbonaté d'Aïn Dez. Cette série présente localement des intercalations argileuses, classées sous l'indice R2. Les autres formations géologiques comprennent des séquences de calcaires massifs à bancs épais et de calcaires finement lités, catégorisées sous l'indice R3. Enfin, les failles majeures et les structures tectoniques, caractérisées par une vulnérabilité particulièrement élevée, ont été identifiées et indexées sous l'indice R4. (Figure 18).

4.3 Carte du facteur I

L'analyse du Modèle Numérique de terrain (MNT) a permis d'établir la carte de facteur (I). Les classes de pente et la morphologie karstique ont été indexées selon une approche systématique :

Pentes fortes (favorisant un ruissellement rapide et limitant l'infiltration) sont classées en vulnérabilité faible (I1), reflétant une sensibilité réduite à la contamination des eaux souterraines.

Pentes modérées (équilibre entre ruissellement et infiltration) présentent une vulnérabilité moyenne (I2), nécessitant une attention particulière dans les études d'impact environnemental.

Pentes douces (< 5 %, favorisant une infiltration accrue) sont classées en vulnérabilité élevée (I3), justifiant des mesures de protection renforcées contre la pollution des aquifères. Cette classification hiérarchisée offre une évaluation précise des risques environnementaux et constitue une base solide pour la gestion des ressources en eau en milieu karstique. (Figure 18).

4.4 Carte du facteur Ka :

L'interprétation de la carte Ka, dans le cadre de la méthode PaPRIKa, met en évidence deux systèmes karstiques distincts au sein du réservoir :

Système Ka1 (Jurassique inférieur) : Réseau karstique bien développé, avec une dynamique hydrologique active.

Système Ka3 (Jurassique moyen) : Karstification modérée (degré faible), traduisant un fonctionnement hydrogéologique limité (faible capacité de circulation et de stockage).

Ces systèmes sont séparés par une faille d'orientation NE-SO, jouant un rôle clé dans la différenciation des propriétés hydrogéologiques (barrière ou conduit pour les écoulements). La carte Ka fournit ainsi des insights essentiels pour la compréhension des processus karstiques et la gestion des ressources en eau. (Figure 18).

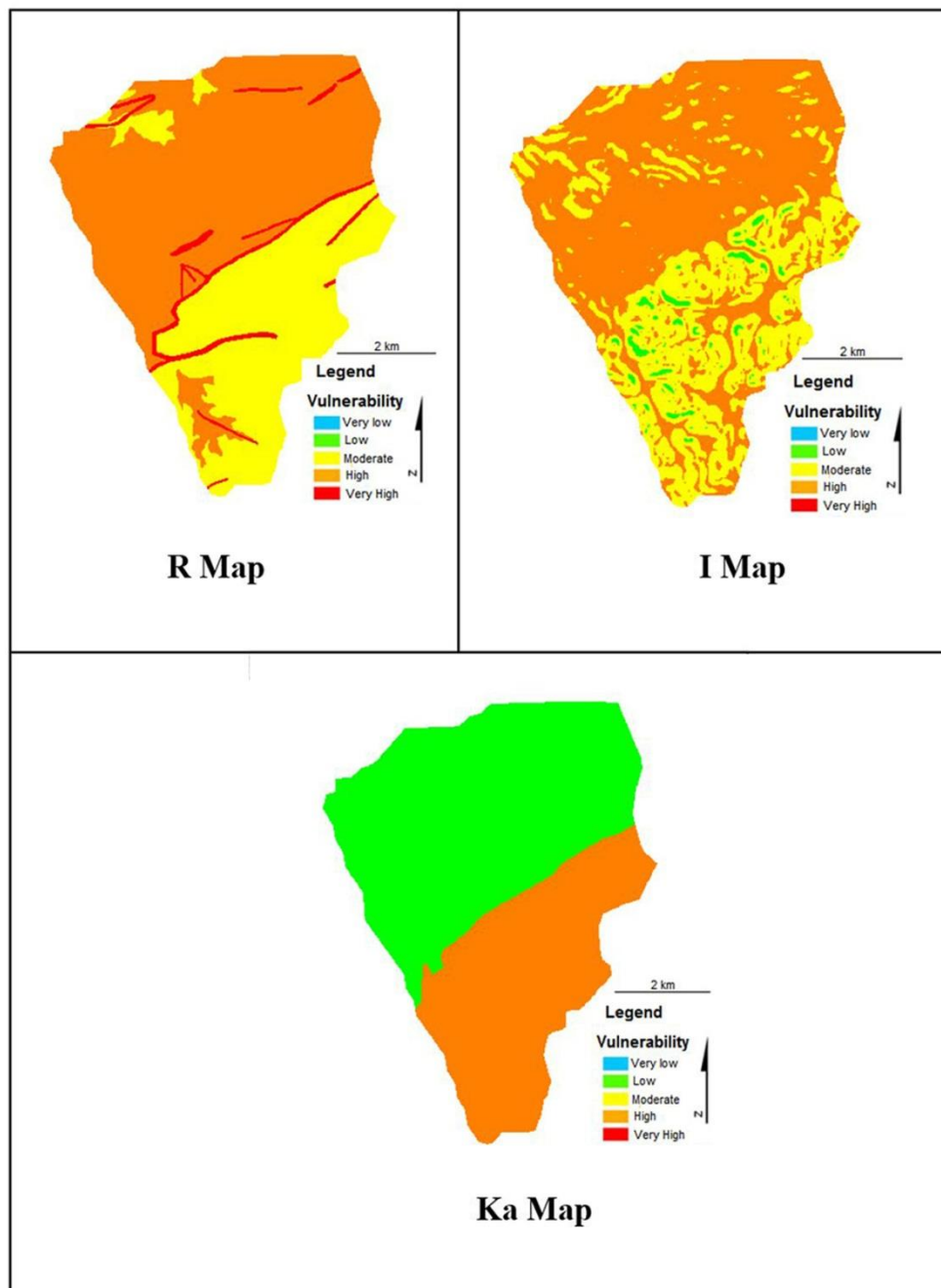


Figure 18.Cartes des paramètres R, I et Ka caractérisant la vulnérabilité du système karstique du Djebel Sidi Youssef

4.5. Cartographie de vulnérabilité :

4.5.1. Description des différentes versions obtenues :

Les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères karstiques du massif de Sidi Youssef ont permis de générer quatre cartographies distinctes, reflétant des scénarios de pondération variés. La version V0, basée sur des poids équilibrés entre les critères P (Protection), R (Réservoir), I (Infiltration) et Ka (Karstification), révèle une vulnérabilité modérée à élevée dans la partie nord de la zone d'étude, où les formations calcaires fracturées dominent. À l'inverse, le sud, caractérisé par des alternances de calcaires et d'argiles, présente une vulnérabilité atténuée en raison de la capacité de rétention des argiles. La version V1, avec un poids accru accordé à l'infiltration (I), accentue la vulnérabilité dans les zones de pentes douces, favorisant une infiltration rapide. Enfin, la version V2 ($0.2P + 0.2R + 0.3I + 0.3Ka$) montre une répartition plus homogène, avec des zones de vulnérabilité élevée moins étendues mais plus dispersées, soulignant l'influence limitée de la karstification dans ce scénario. La carte VAHP, issue de l'intégration de l'AHP, se distingue par une pondération dominante de l'infiltration (0.5), alignée sur les spécificités hydrogéologiques du contexte montagneux. Cette version identifie des zones critiques le long des failles majeures, cohérentes avec les données géologiques (Figures 18 et 19).

4.6. Analyse comparative entre les versions (V0, V1, V2, VAHP) :

Une analyse comparative des quatre cartes met en évidence des similitudes et divergences clés. Les versions V0, V1, et VAHP partagent une vulnérabilité élevée dans le nord, liée aux calcaires fracturés et aux réseaux karstiques, confirmant la robustesse de cette tendance malgré les variations de pondération. Cependant, VAHP amplifie les zones très vulnérables (en rouge sur la Figure 19) grâce au poids prépondérant de l'infiltration (0.5), aligné sur les observations de terrain. En revanche, V2 minimise ces zones en attribuant un poids égal à I et Ka (0.3 chacun), suggérant que la karstification locale est moins développée que dans d'autres contextes (Kavouri et al. 2011). Ces divergences soulignent l'importance d'adapter les modèles aux spécificités locales, notamment la dynamique d'infiltration prédominante dans les systèmes montagneux semi-arides.

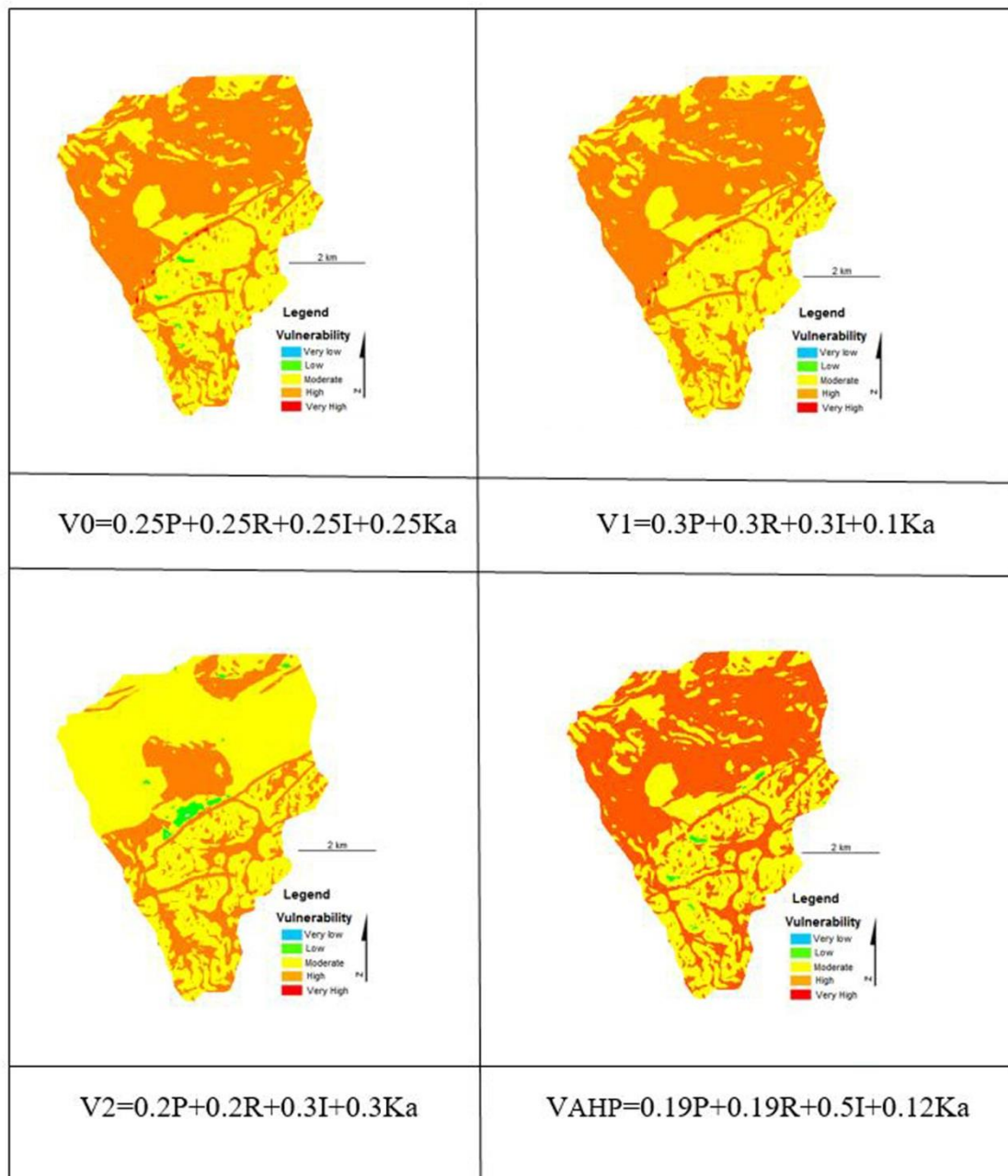


Figure 19. Résultats de la cartographie de vulnérabilité appliquée au karst du Djebel Sidi Youssef

4.7. Évaluation de la sensibilité des pondérations :

La sensibilité des résultats aux variations de pondération a été testée via des ajustements incrémentaux ($\pm 10\%$) des poids initiaux. Le critère I (Infiltration) s'est avéré le plus influent : une augmentation de 10 % de son poids dans VAHP étend les zones "très vulnérables" de 8 %, tandis qu'une réduction équivalente atténue leur étendue. À l'inverse, les critères P (Protection) et Ka (Karstification) montrent une influence marginale, avec des variations inférieures à 3 % pour des ajustements similaires. Ces tests confirment la robustesse de VAHP, où l'infiltration domine, mais révèlent aussi une incertitude résiduelle liée à la subjectivité des poids attribués à R et P, malgré l'utilisation de l'AHP. Une analyse Monte Carlo pourrait affiner cette évaluation dans de futures études.

4.8. Apports de l'intégration AHP dans PaPRIKa :

L'intégration de l'AHP a permis de dépasser les limites des pondérations fixes traditionnelles en PaPRIKa. En structurant hiérarchiquement les critères (ex. : infiltration > karstification > protection) et en validant la cohérence des jugements via l'indice de consistance ($CR < 0.1$), l'AHP a renforcé l'objectivité du modèle. Par exemple, le poids de 0.5 attribué à I dans VAHP découle de comparaisons par paires confirmant son rôle prépondérant dans la recharge des aquifères en zone montagneuse, en accord avec les travaux (Andreo et al. 2008). Cette approche hybride offre ainsi un cadre reproductible pour d'autres aquifères karstiques, combinant la spécialisation de PaPRIKa et la rigueur statistique de l'AHP.

Les cartes finales reflètent étroitement les processus hydrogéologiques locaux. Les zones de vulnérabilité élevée (nord) coïncident avec :

Les calcaires fracturés du Crétacé, où les failles NE-SW agissent comme drains préférentiels (Bracène et Frizon, 2002).

Les pentes douces ($< 5\%$), favorisant l'infiltration rapide des eaux de surface, potentiellement contaminées.

À l'opposé, les secteurs modérés (sud) correspondent aux alternances calcaire/argile, où l'argile ralentit les flux et filtre les polluants. Ces résultats corroborent les études antérieures sur les aquifères du Tell Atlas (Aifa et Baali,

2005), mais soulignent aussi le rôle sous-estimé des failles cachées, identifiées uniquement via l'approche AHP-PaPRIKa.

4.9. Comparaison avec d'autres méthodes ou indices de vulnérabilité :

Une comparaison préliminaire avec la méthode COP (Marín et al., 2012) appliquée à des karsts méditerranéens montre des similarités dans la localisation des zones critiques, mais avec une surévaluation de la vulnérabilité en COP due à sa sensibilité accrue à la couverture végétale. Contrairement à DRASTIC, inadapté aux karsts (Goldscheider et al., 2000), PaPRIKa capte mieux l'hétérogénéité des systèmes fracturés. Toutefois, l'absence de données de contamination systématiques, limite la validation quantitative, une piste pour de futures recherches.

4.9.1. Discussion des résultats à la lumière des études précédentes :

Nos résultats s'inscrivent dans la lignée des travaux sur la vulnérabilité des karsts méditerranéens, mais avec des nuances. Comme (Kavouri et al. 2011) dans les Pyrénées, nous identifions l'infiltration comme le critère dominant, mais notre intégration de l'AHP affine cette hiérarchie. En revanche, (Taheri et al. 2015) en Iran privilégiaient la karstification, reflétant des contextes géodynamiques distincts. Cette divergence souligne la nécessité d'adapter les modèles aux spécificités régionales, notamment l'aridité et la tectonique active du Maghreb.

Les cartes de vulnérabilité (V0, V1 et VAHP) présentent des résultats similaires, avec une dominance de vulnérabilité modérée à élevée, principalement concentrée dans la partie nord de la zone d'étude. Cette distribution s'explique par la présence de calcaires et dolomies fracturés, associés à un système karstique marqué par des failles non apparentes ou présumées. Ces structures augmentent la perméabilité et favorisent l'infiltration des eaux, accroissant ainsi le risque de contamination des aquifères.

Dans le sud, la vulnérabilité est majoritairement modérée, en raison de l'interaction entre les calcaires et les formations argileuses, qui retiennent l'eau et ralentissent son infiltration. Les zones de vulnérabilité très élevée (représentées en rouge) sont rares et associées à des failles profondes, créant des chemins préférentiels pour les écoulements et augmentant le risque de pollution des eaux souterraines.

La carte V2, basée sur un schéma de pondération spécifique ($0,2P + 0,2R + 0,3I + 0,3Ka$), diffère des autres, affichant une vulnérabilité majoritairement modérée et des zones élevées plus dispersées. Ce résultat reflète l'impact limité de la karstification dans la région.

À l'inverse, l'intégration de la méthode AHP dans PaPRIKa, avec une pondération ajustée ($0,19P + 0,19R + 0,5I + 0,12Ka$), maximise le poids du critère d'infiltration (I), particulièrement adapté au contexte montagneux. Cette combinaison fournit des résultats cohérents et fiables, permettant une meilleure compréhension des facteurs de vulnérabilité et une gestion plus éclairée des risques de pollution.

Ainsi, cette approche méthodologique, qui tient compte des spécificités géologiques locales, est retenue pour l'estimation de la vulnérabilité dans la zone d'étude. (Figure 19).

4.9.2. Limites méthodologiques et incertitudes :

Les principales limites incluent :

La résolution des données : Les cartes géologiques (1:500,000) lissent les hétérogénéités locales.

L'absence de traçages pour valider les connexions hydrogéologiques supposées.

La subjectivité résiduelle de l'AHP, malgré son formalisme. Une approche participative incluant plus d'experts pourrait réduire ce biais.

4.9.3. Apport méthodologique de la combinaison AHP-PaPRIKa :

Cette combinaison constitue une avancée majeure pour :

L'objectivation des poids, via des comparaisons par paires validées statistiquement.

L'adaptabilité à d'autres karsts, en ajustant la hiérarchie des critères (karstification > infiltration en contextes différent).

4.9.4. Intérêt pour la gestion et la protection de la ressource en eau :

Les cartes VAHP fournissent un outil décisionnel pour :

- Cibler les zones prioritaires : Restrictions d'activités polluantes près des failles critiques.
- Optimiser les suivis : Installation de piézomètres dans les secteurs "très vulnérables".
- Sensibiliser les acteurs locaux : Intégration dans les plans de gestion (ANRH, 2019). Cette approche proactive est essentielle face aux enjeux environnementaux actuels.

Conclusion :

L'analyse des résultats a permis de produire une cartographie détaillée et fiable de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère karstique du Djebel Sidi Youssef. La comparaison des scénarios a démontré la robustesse des résultats, tout en mettant en évidence la prépondérance du facteur d'Infiltration (I) dans ce contexte montagneux semi-aride, ce qui a été confirmé et quantifié par l'approche AHP (scénario VAHP). Les zones de vulnérabilité élevée à très élevée, identifiées principalement dans le nord du massif, coïncident avec les calcaires fracturés et les zones de failles, confirmant les observations géologiques. Cette étude valide l'intérêt de la combinaison méthodologique AHP-PAPRIKA pour une évaluation plus objective et adaptée des aquifères karstiques, fournissant un outil décisionnel précieux pour les gestionnaires de l'eau. Les limites inhérentes aux données et les perspectives de recherche futures, notamment la validation par traçage, ont également été identifiées.

Conclusion générale

Conclusion général

Conclusion général :

Cette étude a évalué et cartographié la vulnérabilité des aquifères karstiques en utilisant la méthode PaPRIKa, améliorée par l'intégration du Processus Hiérarchique Analytique (AHP) pour déterminer la pondération des critères. Trois scénarios de pondération (V0, V1, V2) et un quatrième test intégrant la méthode AHP (VAHP) ont été comparés, révélant des insights significatifs sur la dynamique de vulnérabilité de la zone d'étude.

Les cartes de vulnérabilité issues des scénarios V0, V1 et VAHP présentent des similitudes marquées, avec une vulnérabilité majoritairement modérée à élevée, concentrée dans la partie nord de la zone d'étude. Cette distribution s'explique par la présence de calcaires et dolomies fracturés, ainsi que par un système karstique caractérisé par des failles masquées. Ces structures géologiques augmentent la perméabilité et favorisent une infiltration rapide de l'eau, accroissant ainsi le risque de contamination des aquifères. Dans le sud, la vulnérabilité est principalement modérée en raison de l'interaction entre les calcaires et les argiles, qui retiennent l'eau et ralentissent son infiltration. Les zones de vulnérabilité très élevée, bien que rares, sont associées à des failles profondes, créant des chemins préférentiels pour les écoulements et augmentant le risque de pollution des eaux souterraines.

Le scénario V2, basé sur un schéma de pondération spécifique ($0,2P + 0,2R + 0,3I + 0,3Ka$), diffère des autres, affichant une vulnérabilité majoritairement modérée, avec des zones élevées moins fréquentes et plus dispersées. Ce résultat met en évidence l'impact limité de la karstification sous cette configuration de pondération. À l'inverse, l'intégration de la méthode AHP dans PaPRIKa, avec un schéma de pondération ajusté ($0,19P + 0,19R + 0,5I + 0,12Ka$), a maximisé le poids du critère d'infiltration (I), particulièrement adapté au contexte montagneux de la zone d'étude. Cette approche a fourni des résultats cohérents et fiables, offrant une meilleure compréhension des facteurs de vulnérabilité et permettant une gestion plus éclairée des risques de pollution.

En conclusion, cette étude démontre l'importance d'adapter les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères karstiques aux spécificités géologiques locales. L'intégration de la méthode AHP dans PaPRIKa s'est avérée particulièrement pertinente pour affiner les schémas de pondération et améliorer la précision des cartes de vulnérabilité. Les résultats

Conclusion général

soulignent la nécessité de prendre en compte les processus hydrodynamiques locaux, ainsi que les structures géologiques, pour une gestion durable des ressources en eau souterraine.

Cette étude propose une approche innovante combinant les méthodes PaPRIKa et AHP pour l'évaluation de la vulnérabilité. Le choix de ces deux méthodes est justifié par leur complémentarité : tandis que PaPRIKa permet une pondération transparente des critères via des comparaisons par paires simplifiées, AHP apporte une structuration hiérarchique rigoureuse des facteurs d'évaluation, améliorant ainsi la précision et l'objectivité du modèle.

Des tests de traçage pourraient également être envisagés dans de futures recherches pour renforcer la robustesse du modèle proposé.

Référence bibliographique

Référence bibliographique

Référence bibliographique :

1. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) (2004). Rapport sur les ressources en eau en Algérie.
2. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) (2020). Rapport sur les ressources en eau en Algérie.
3. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) (2019). Rapport sur les ressources en eau en Algérie.
4. Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. EPA/600/2-87/035.
5. Andreo, B.; Vias, J.; Duran, J. J.; Jimenez, P.; Lopez-Getal, J. A., and Carrasco, F. (2008). Methodology for groundwater recharges assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 911-925. <https://doi.org/10.1007/S10040-008-0274-5>.
6. Bakalowicz, M. (1999). Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3, SDAGE Rhône - Méditerranée - Corse. Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse, Lyon, 40 p.
7. Bakalowicz, M. (2005). Karst groundwater: A challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, *13*(1), 148–160. DOI: 10.1007/s10040-004-0402-9.
8. Bentabet, A. (2020). Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saida ; approche hydrodynamique et hydrochimique.
9. Benaouali-Mebarek, N., Frizon de Lamotte, D., Roca, E., Bracène, R., Faure, J.-L., Sassi, W., and Roure, F. (2006), Post-Cretaceous kinematics of the Atlas and Tell systems in central Algeria: Early foreland folding and subduction-related deformation, *C. R. Geoscience*, 338, 115-125.
10. Benslimane, I., & Rahmoune, N. (2008). Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes souterraines par la méthode DRASTIC "cas de la nappe du Synclinal de Djelfa". Mémoire d'ingénieur, Fac. des Sci. et Sci. de l'Ingéniorat, Univ. Ammar Telidji-Laghout, 111p.
11. B.N.E.D.E.R. Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural. (1992). Etude du développement agricole de la wilaya de Saida. Rapport final et annexes, 1992 ; 212 p
12. Clair, A, 1952. Etude Hydrogéologique des Monts De Saida (Hydrogeological study of the Saida Mountains). Paris: Presse Universitaire France.
13. Direction des Ressources en Eau. (2020). Rapport sur les ressources en eau du massif de Sidi Youssef, wilaya de Saïda. Ministère des Ressources en Eau, Algérie.
14. Direction Générale des Forêts (2007). Rapport sur les écosystèmes montagneux de Saïda.
15. Doerfliger, N. Zwahlen, F. (1997). *EPIK: A New Method for Outlining of Protection Areas in Karstic Environment*. IntSymp on Karst Water and Environmental Impacts, Antalya, Turkey. Balkema, Rotterdam, 117-123.

Référence bibliographique

16. Dorfliger, N., and Plagnes, V , avec la collaboration de Kavouri K., Gouin J., 2009 : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques, guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. Rapport BRGM RP-57527-FR.
17. Dörfliger N., Jauffert D., Loubier S., Petit V., 2004 : Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté. Rapport final BRGM/RP-53576-FR. Vulnerability Mapping of Karst Aquifers: The European Approach.
18. DJIDI, K. (2015) .Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de saïda .
19. Duchaine, D. (1998). Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (par l'intégration d'un SIG, de la télédétection et d'un modèle mathématique). Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Maîtrise en sciences de l'eau.
20. Durand, J. (1954). Les sols d'Algérie. Gouvernement général de l'Algérie. Service pédologie et hydraulique.
21. Em. de Martonne (1926). Bulletin de l'Association de Géographes Français, *9*, pp. 3-5.
22. Feizizadeh, B ; Blaschke, T ;Ghorbanzadeh,O . (2017). Multi-criteria risk evaluation by integrating an analytical network process approach into GIS-based sensitivity and uncertainty analyses.
23. Ford, D., and Williams, P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley&Sons,Chichester,562.<https://doi.org/10.1002/9781118684986>
24. Forman E.H. and Selly M.A. (2001). Decision by Objectives: How to Convince Others that you are Right. DOI: 10.1142/4281
25. Goldscheider, N., & Drew, D. (2007). Methods in Karst Hydrogeology. <https://doi.org/10.1201/9781482266023>.
26. Goldscheider, N.; Klute, M.; Sturm, S. and Hotzl, H. (2000). The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifer.
27. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2021). Rapport sur les changements climatiques.
28. Kavouri, K., Plagnes, V., Tremoulet, J., Dörfliger, N., & Rejiba, F. (2011). PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability-application to the Ouyse karst system (southwest France).
29. Kebaili, S., Herizi, I. (2017). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe du Hodna par la méthode Drastic (cas de région Magra). Mémoire Master, sci-tech. Unive Mohamed Boudiaf - M'Sila.
30. Klimchouk , A; Ford,C; Palmer,A; Wolfgang,D. (2000). Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00341-3.
31. Kerrache, G. (2011). Impacts du préaménagement sur les formations forestières : cas de la forêt de Fenouane (Commune de Ain El Hadjar, W de Saïda, Algérie).
32. Kresic, N. (2013). Water in Karst: Management, Vulnerability, and Restoration. New York: McGraw-Hill.
33. Landreau, A. (1996). « Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des eaux souterraines», Rapport BRGMR 38846.

Référence bibliographique

34. Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems*.
35. Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
36. Mangin, A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Annales de Spéléologie*.
37. Marín, A.I., Dörfliger, N. & Andreo, B. (2012). Comparative application of two methods (COP and PaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain). *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1056-2>.
38. Meddi, M. et Boucefiane, A. (2013). Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales Cas du Bassin Chott-Chergui.
39. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (Algérie) (2020). Stratégie nationale de gestion des ressources en eau.
40. Mousseau, V., Figueira, J., & Naux, J.-P. (2001). Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method: Some experimental results. *European Journal of Operational Research*.
41. Nichane, M. et Khelil, M.A. (2015). Changements Climatiques Et Ressources En Eau En Algérie Vulnérabilité, Impact Et Stratégie D'adaptation .
42. Office National de la Météorologie (ONM Algérie) (2020). Données climatiques de la région de Saïda.
43. Palmer, A.N. (1991). Origin and morphology of limestone caves. *GSA Bulletin*.
44. Pitaud, G., 1973, Etude hydrogéologique de la région de Sidi Youssef (Saïda).
45. Ramade, F. (2005). *Eléments d'écologie. Ecologie appliquée*. 6e édition. Dunod, Paris.
46. Ravbar, N., & Goldscheider, N. (2007). Proposed Methodology of Vulnerability and Contamination Risk Mapping for the Protection of Karst Aquifers in Slovenia.
47. Remini, B. et al. (2023). L'eau en Algérie.
48. Robert, M. (1996). *Le sol : Interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Paris.
49. Saaty T.L. and Kearns K.P. (1985). The Analytic Hierarchy Process. In: Saaty, T.L. and Kearns, K.P., Eds., *Analytical Planning*, Elsevier, Amsterdam
50. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation*. McGraw-Hill, New York.
51. Saaty, T.L. (2003). Decision-Making with the AHP: Why Is the Principal Eigenvector Necessary . *European Journal of Operational Research*.
52. Schoeller, H. (1962). *Les eaux souterraines – Hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources*. Masson et Cie, Paris.
53. Schnebelen, N., Platel, J. P., Lenindre, Y., Baudry, D., Hoarau, A., Dufour, P. & Benhammouda, S., (2002). *Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise*.
54. Seltzer, P. (1946). *Le climat de l'Algérie*.
55. Taheri, K.; Gutierrez, F.; Mohseni, H.; Raeisi, E., and Taheri, M. (2015). Sinkhole susceptibility mapping using the analytical hierarchy process (AHP) and

Référence bibliographique

- magnitude–frequency relationships: A case study in Hamadan province, Iran. *Geomorphology*,. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.005>.
56. Tzeng, G.H., & Huang, J.J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*
57. Vaidya, O. S., and Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>.
58. Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., & Jiménez Gavilán, P. (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal*.
59. Vrba, J., Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability -IAH*. International Association of Hydrogeologists.
60. White, W. (1988). *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. New York, Oxford University Press.
61. Williams, P.W. (2008). The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology. *International Journal of Speleology*.
62. Worthington, Stephen R. H. (2009). Diagnostic hydrogeologic characteristics of a karst aquifer. (Kentucky, USA). DOI: 10.1007/s10040-009-0489-0
63. Zwahlen, F. (2004). *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*.

Référence bibliographique

Tableau d'abréviation :

Abréviations	Signification	Definition / Commentaires
A.N.R.H	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques	Organisme public algérien
B .N.E.D.E.R	Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural	Organisme public algérien
O .N.M	Office National de la Météorologie	Organisme public algérien
D .R.E	Direction des Ressources en Eau	Organisme public algérien
D .G.F	Direction Générale des Forêts	Organisme public algérien
G .I.E.C	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	Organisme public algérien
B.R.G.M	Bureau de Recherches Géologiques et Minières	Service géologique national français
M .A.D.R	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural	Organisme public algérien
AHP	Analytic Hierarchy Process	Processus d'Analyse Hiérarchique. Méthode multicritère pour la pondération des facteurs
PaPRIKa	Protection des Aquifères Karstiques	Méthode de cartographie de la vulnérabilité basée sur la Protection, le Réservoir, l'Infiltration et la Karstification
MNT	Modèle Numérique de Terrain	Représentation 3D de la topographie d'une zone
P	Protection	Facteur "Couverture Protectrice" dans la méthode PaPRIKa
R	Roche réservoir	Facteur "Nature de la Roche Réservoir" dans la méthode PaPRIKa
I	Infiltration	Facteur "Conditions d'Infiltration" dans la méthode PaPRIKa
Ka	Karstification	Facteur "Degré de Karstification" dans la méthode PaPRIKa
ZNS	Zone Non Saturée	Partie du sol et du sous-sol où les pores sont remplis d'air et d'eau
SIG	Système d'Information Géographique	Geographic Information System (GIS). Outil de cartographie et d'analyse spatiale

