

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAIA



جامعة أحمد دراية-أدرار

-ADRAR-

Année/2022

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de la Matière

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en Chimie

Option : Chimie de l'Environnement

**Etude de la vulnérabilité a la pollution des eaux de
foggara d'Adrar**

Présenté Par :

-Mlle. Zahra BABAHAJ

et

- Mlle. Zineb BOUDIHADJ

Devant le jury composé de:

Mr. slimane kALOUM

Président

Pr

Université Ahmed Draia-Adrar

Mr. Bahus NASRI

Examineur

MCB

Université Ahmed Draia-Adrar

Mr. Said SLIMANI

Promoteur

MCB

Université Ahmed Draia-Adrar

Année Universitaire 2021/2022



شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): سليمان سعيد
المشرف مذكرة الماستر الموسومة بـ: Etude de la vulnérabilité à la pollution des eaux de Joggaras d'Adrar
من إنجاز الطالب(ة): بايا حاج زورقة
و الطالب(ة): بوديهاج زينب
كلية: العلوم والتكنولوجيا
القسم: علوم الطارئة
التخصص: كيمياء المحيط (ماستر)
تاريخ تقييم / مناقشة: 2024/06/07

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
وإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والالكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

سليمان سعيد

ادرار في: 2024/06/07





Dédicaces

J'ai le grand honneur de dédier ce travail :
A tous ceux qui m'ont encouragé et soutenu moralement et
matériellement dans les moments les plus difficiles de ma vie.

A mes chers père et mère, qui m'ont donné la force d'atteindre
ce que je suis maintenant.

A mes frères et sœurs (Mustafa, Abdel kader,
Mabrouke, Abdel karim, Souhila, Fatima et Roukia).
A tous mes familles BOUDIHADJ et SLIMAOUI .

A mes amis ont chacun leur propre nom surtout Ruba,
Abderrahmane et mon collègue Zahra Babahadj.

A mon professeur et encadrant SLIMANI SAID.

Pour tous les étudiants du master 2 Chimie de l'environnement
2022.

B. Zineb



Dédicaces

*J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail:
A qui j'espère partager ma joie, " ma mère", que Dieu ait pitié d'elle*

Mon père, que dieu prolonge sa vie

A mes frères et seurs

*Aux anges de la famille Babahadj "Zineb, Sid-Ahmed,
Abd Asamad, Idris, Masouda, Abd el Hafid, Hadjer et Aicha".*

A tous mes familles BABAHADJ et M'HAMMDI.

*Aceux que j'ai eu l'honneur d'accompagner mes amis et
collègues dans l'étude.*

*Et sans oublier qui fut la raison de la réalisation de ce travail, le
professeur encadreur SLIMANI SAID.*

B. Zahra



Remerciment

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu Tout-puissant qui nous a aidés à atteindre ce succès et à attendre ce que nous sommes maintenant.

Nous tenons à exprimer notre gratitude, nos remerciements et notre respect à notre directeur de mémoire, le professeur SLIMANI SAID, qui nous a guidés et dirigés durant ce travail. Par ses conseils, ses encouragements et le temps précieux qu'il nous a consacré.

Je tiens également à remercier les professeurs de département des sciences des matériaux pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont dispensé pendant les cinq années que nous avons passées à l'université d'Ahmed Draya Adrar.

Et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration et à la réalisation de ce mémoire.

تتميز منطقة الصحراء الجزائرية بمناخها الجاف وقلة تساقط الأمطار. ولهذا السبب فان سكان هذه المنطقة يقومون باستغلال المياه الجوفية من اجل توفير احتياجاتهم. يكون هذا الاستغلال بطريقتين مختلفتين إما بحفر الآبار الارتوازية و ضخ المياه منها باستعمال الطاقة الكهربائية أو بنظام السقي التقليدي و المسمى "الفقارة". هذا النظام الذي يعتمد أساسا على نقل المياه الجوفية البيئية القارية CI (صرف) من أماكن (عين) غالبا ما تكون بعيدة عن التجمعات السكانية الى البساتين. أدى النمو الديموغرافي في منطقة ادرار إلى زيادة الأنشطة الزراعية و الصناعية مما أثر على جودة هذه المياه و بالتالي على سيرورة واستدامة نظام الفقارة.

الهدف من هذا العمل هو دراسة نوعية و جودة مياه الفقارة باستعمال نظام المعلومات الجغرافية, وذلك من خلال رسم خرائط تظهر قابلية هذه المياه لتلوث بالاعتماد على طريقة DRASTIC

أظهرت النتائج المتحصل عليها إن منطقة الدراسة تنقسم من حيث ضعف التلوث إلى ثلاث فئات و هي:
فئة ضعف منخفضة للغاية: مؤشر هذه الفئة أقل من 100 وهذا راجع لارتفاع عمق المياه في المنطقة.
فئة الضعف المنخفض: وهي الطبقة السائدة على الخريطة يتراوح مؤشر هذه الفئة من 101 إلى 125.
فئة الضعف المتوسط: تتراوح من 126 إلى 150.
الكلمات المفتاحية: ادرار، المياه الجوفية، الفقارة ، DRASTIC, تلوث.

Résumé

La région désertique algérienne se caractérise par son climat sec et sa faible pluviométrie, et pour cette raison, les habitants de cette région exploitent les eaux souterraines afin de subvenir à leurs besoins, et cette exploitation se fait de deux manières différentes, soit en creusant des puits artésiens et en pompant l'eau d'eux en utilisant l'énergie électrique ou par le système d'irrigation traditionnel appelé "foggara ". Ce système, qui repose principalement sur le transfert d'eaux souterraines intercontinentales CI (drainage) depuis des lieux (Ain) souvent éloignés des agglomérations vers les vergers.

La croissance démographique dans la région d'Adrar a entraîné une augmentation des activités agricoles et industrielles, ce qui a affecté la qualité de cette eau souterraine, et par conséquent, le fonctionnement et la durabilité du système de foggara.

L'objectif de ce travail est d'étudier la qualité de l'eau de foggara à l'aide d'un système d'information géographique, en établissant des cartes de la vulnérabilité à la pollution des eaux par la méthode DRASTIC.

Les résultats obtenus ont montré que notre zone d'étude est divisée en termes de pollution en trois catégories, qui sont :

Classe de vulnérabilité très faible: la valeur de l'indice de cette classe est inférieur à 100 et se justifie par la grande profondeur des puits.

Classe de vulnérabilité faible: C'est la partie dominante sur la carte thématique dont son indice est varie de 101 à 125.

Classe de vulnérabilité moyenne: l'indice de la vulnérabilité est varie de 126 à 150, cette valeur a une relation avec le types des sols qui sont de nature calcaire ou argile.

Mots-clés: Adrar, eaux souterraines, foggara, DRASTIC, pollution.

Abstract

The Algerian desert region is characterized by its dry climate and low rainfall, and for this reason, the inhabitants of this region exploit groundwater in order to meet their needs, and this exploitation is done in two different ways, either by digging artesian wells and pumping water from them using electric power or through the traditional irrigation system called "foggara". This system, which is mainly based on the transfer of intercontinental groundwater CI (drainage) from places (ain) often far from the agglomerations towards the orchards.

Population growth in the Adrar region has led to an increase in agricultural and industrial activities, which has affected the quality of this water and, consequently, the functioning and sustainability of the foggara system.

The objective of this work is to study the quality of foggara water using a geographical information system, by drawing up maps showing the sensitivity of this water to pollution according to the DRASTIC method.

The results obtained showed that our study area is divided in terms of pollution into three categories, which are:

- **Very low vulnerability class:** the value of the index for this class is less than 100 and is justified by the great depth of the wells.
- **Low Vulnerability Class:** This is the dominant part on the thematic map whose index varies from 101 to 125.
- **Medium vulnerability class:** It varies from 126 to 150.

Keywords: Adrar, groundwater, foggara, DRASTIC, pollution.

Sommaire

Dédicaces.....	II
Remerciements.....	III
Résumé.....	V
Abstract.....	VI
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XIII
Liste des photos.....	XIV
Liste des abréviations.....	XV
Introduction générale.....	1
Chapitre I Etude climatique et morphologique de la région d'étude	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Situation géographique d'Adrar.....	4
1.3. Aspect géomorphologique.....	5
1.3.1. Le plateau.....	5
1.3.2. La dépression.....	6
1.3.3. Les sebkhas.....	6
1.3.4. Erg.....	6
1.3.5. Reg.....	6
I.4. Aspect climatique de région d'étude.....	7
I.4.1. La Température.....	7
I.4.2. Le vent.....	10
I.4.3. Humidité relative de l'air.....	10
I.4.4. La Précipitation.....	11
I.4.5. Diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls :.....	14
I.4.6. l'Evapotranspiration.....	14
I.4.6.1. Estimation de l'ETP (l'évapotranspiration potentielle).....	14
I.5. Bilan hydrique (méthode de Thornthwaite).....	16
I.5.1. Détermination des indices climatiques.....	17

Conclusion	18
Chapitre II Etude hydrogéologique de la zone d'étude	
II.1.Introduction.....	20
II.2. Système aquifère.....	20
II.2.1. Définition d'aquifère.....	20
II.2.2. Types des aquifères	20
II.3. Système Aquifère du Sahara Septentrional	21
II.3.1. L'aquifère du complexe terminal (CT) :	22
II.3.2. Le continental intercalaire (CI):.....	23
II.4. Alimentation du continental intercalaire (CI).....	26
II.5. La piézométrie de la nappe du continental intercalaire	26
Conclusion	29
Chapitre III Généralité sur des eaux de foggara	
III.1. Introduction	31
III.2. Historique de la foggara	31
III.3. Définition de foggara.....	31
III.4. Origine et diffusion de système de foggara dans le monde.....	32
III.4.1. Naissance de système de qanat en Europe.....	32
III.4.2. Naissance de système de qanat en Asie	33
III.4.3. Le système de foggara en Afrique	35
III.4.4. Les types de foggara	38
a) La foggara de l'albien.....	38
b) La foggara de l'erg.....	39
c) La foggara de jardin.....	40
d) Foggara de source (El Ain).....	40
e) Foggara de La montagne	41
f) La foggara des oueds	41
III.4.5. Composants constituant le système de foggara	42
III.4.6. Principe de fonctionnement de système foggara :	45

III.4.7. Méthodes de la répartition des eaux de foggara	46
a) Par kasria :	46
b) La méthode par temps horaire (<i>nouba</i>).....	49
Conclusion	49
Chapitre IV Matérielles et méthodes	
IV.1. Introduction	51
IV.2. La pollution des eaux souterraines	51
IV.2.1. L'origine et source de pollution	51
IV.2.2. Type de pollution.....	51
IV.3. La vulnérabilité des eaux souterraines	52
IV.3.1. Types de vulnérabilité	53
a) La vulnérabilité intrinsèque	53
b) La vulnérabilité spécifique	53
IV.4. Les méthodes des vulnérabilités.....	53
IV.4.1. Description la méthode DRASTIC :.....	53
IV.4.2. Principe de la méthode DRASTIC	56
IV.4.3. Description des Paramètres DRASTIC et vulnérabilité de l'aquifère :.....	57
IV.4.4. Indice de vulnérabilité DRASTIC (ID)	61
IV.5. Méthode de travail.....	61
IV.5.1. Présentation de logiciel Arc Gis :.....	61
Conclusion :	65
Chapitre V Résultats et dissociation	
V.1. Interprétations des paramètres et réalisation des cartes thématiques de la méthode	66
DRASTIC	66
V.1.1. Profondeur de la nappe	66
V.1.2 Recharge nette.....	67
V.1.3. Nature du milieu aquifère	69
V.1.4. Milieu du sol	69
V.1.5. Topographie	72

V.1.6. Impact de la zone vadose	72
V.1.7. Conductivité hydraulique.....	75
V.1.8. Carte de l'indice de vulnérabilité (carte de synthèse).....	75
Conclusion générale.....	78
Références bibliographiques.....	.82

Liste des figures	
Figure 1 Situation géographique de la zone d'étude.	5
Figure 2 Carte géomorphologique de la région d'Adrar.	7
Figure 3 Histogramme des températures moyennes mensuelles.	8
Figure 4 La température moyenne interannuelle.	9
Figure 5 Les valeurs mensuelles de la vitesse du vent.	10
Figure 6 Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air (hr %).	11
Figure 7 Les variations des précipitations moyennes mensuelles.	12
Figure 8 Les variations moyennes interannuelles des précipitations.	13
Figure 9 Diagramme Ombrothermique de Gaussen pour la région d'Adrar.	14
Figure 10 Les différents types de nappes.	21
Figure 11 Délimitation de l'extension de l'aquifère source Rapport SASS .	22
Figure 12 Carte géologique drapée sur diagramme hydrogéologique du bassin occidental .	24
Figure 13 Coupe lithologique dans l'aquifère libre d'El-oued.	26
Figure 14 Carte piézométrique du CI 2007.	27
Figure 15 Carte piézométrique du continental intrecaleire dans la région d'Adrar décembre 2007.	27
Figure 16 Schéma simplifié d'une foggara et d'un puits .	32
Figure 17 L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer utilisé par les Romains.	32
Figure 18 Carte des Khettara du Tafilalet sur fond d'image satellite (2006).	36
Figure 19 Localisation des foggaras algériennes .	37
Figure 20 Carte de situation de système de foggara ville d'Adrar –CDN Adrar .	38
Figure 21 Principe de captage de l'eau.	42
Figure 22 Schéma synoptique d'une foggara dans une oasis.Modifie par Babahadj et Boudihadj.	45
Figure 23 Schéma de fonctionnement d'une foggara.	46
Figure 24 Système de la répartition par la Kasria.	47
Figure 25 Illustration des paramètres DRASTIC.	54
Figure 26 Organigramme présentant l'intégration des sept paramètres retenus de la méthode DRASTIC	56
Figure 27 Les applications d'Arc Gis	61
Figure 28 L'interface d'Arc Gis.	63
Figure 29 La barre d'outils d'Arc Gis.	63
Figure 30 L'interface Arc Catalog.	64

Figure 31 L'interface Arc Toolbox.	65
Figure 32 Carte des indices de la profondeur de la nappe CI.	67
Figure 33 Carte thématique de paramètre de recharge nette CI.	68
Figure 34 Carte de milieu aquifère de CI.	70
Figure 35 Carte thématique de paramètre types de sol CI.	71
Figure 36 Carte des indices de la topographie de la nappe CI.	73
Figure 37 Carte thématique des indices de l'impacte de zone vadose.	74
Figure 38 Carte de conductivité hydraulique la nappe CI.	76
Figure 39 Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraine dans la région d'Adrar par la méthode DRASTIC.	77

Liste des tableaux

Tableau 1 Températures moyennes mensuelles (2000-2020) source ONM d'Adrar.	7
Tableau 2 Températures moyennes interannuelles (2000-2020) source ONM d'Adrar.	8
Tableau 3 Valeur de vent pour la station d'Adrar (ONM).	10
Tableau 4 Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité en % des différentes périodes (2000-2020).	11
Tableau 5 Les moyennes des précipitations mensuelles (mm) source ONM d'Adrar.	12
Tableau 6 Les valeurs moyennes des précipitations interannuelles (mm) source ONM d'Adrar.	13
Tableau 7 Les valeurs des précipitations et températures annuelles (2000-2020).	14
Tableau 8 Résultats de l'ETP issus de l'application de la formule de Thorntwaite.	15
Tableau 9 Bilan hydrologique selon la méthode de Thorntwaite.	16
Tableau 10 Classement en fonction de l'indice d'aridité (selon De-Martonne).	18
Tableau 11 Les types de pollution	51
Tableau 12 Paramètre et poids de la méthode DRASTIC.	54
Tableau 13 Cote et poids de profondeur de la nappe phréatique(D).	56
Tableau 14 Paramètre de la recharge nette (RN).	57
Tableau 15 Paramètre du milieu aquifère (A).	57
Tableau 16 Paramètre de nature du sol (s).	58
Tableau 17 Paramètre de la Topographie (T).	59
Tableau 18 Paramètre de l'impact de la zone vadose (I).	59
Tableau 19 Paramètre de conductivité hydraulique (C).	60
Tableau 20 Critère de la vulnérabilité à la pollution de la méthode DRASTIC.	60
Tableau 21 Classes et pondération du paramètres de profondeur de nappe.	66
Tableau 22 Classes et pondération du paramètre de recharge nette	67
Tableau 23 Classes et pondération du paramètre de milieu aquifère	69
Tableau 24 Classes et pondération du paramètre de milieu du sol	69
Tableau 25 Classes et pondération du paramètre de la topographie	72
Tableau 26 Classes et pondération de la nature de zone vadose.	72
Tableau 27 Valeurs de la conductivité hydraulique pour la région d'étude	75
Tableau 28 Classifications des indices de vulnérabilité	75

Liste des photos

Photo 1 Vue aérienne d'un puits appartenant à l'aqueduc souterrain des Raschpëtzer. 33	
Photo 2 Vue aérienne d'une série de puits de plusieurs qanât en Iran.	34
Photo 3 Le système Karez dans la région de Turpan (chine).	35
Photo 4 Alignement des cônes d'éjection de plus d'une dizaine de galeries drainantes dans la région du Tafilalet – Khettara Lahlou ha (Maroc).	36
Photo 5 Photos représentatives des puits de foggara.	43
Photo 6 peigne (kasria) de répartition.	43
Photo 7 photos de madjen.	44
Photo 8 Emplacement de "Chekfa" pour la répartition d'eau des foggaras "Kiel al ma".	48
Photo 9 Différentes formes de Chekfa (la mesure).	48

Liste des abréviations

ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
CI	Continental Intercalaire.
CT	Complexe Terminal.
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel.
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture.
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional.
EX	Excédent.
RFU	Réserve facile utilisable.
AEP	Alimentation en Eau Potable.
ETR	Evapotranspiration réelle.
ETP	Evapotranspiration potentielle.
ERESS	L'étude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional.
ESRI	Environnemental System Research Institute.
SIG	Système d'Information Géographique.
ONM	Office National de Météorologie.
PH	Potentiel Hydrogène.
T	Température.
USA EPA	United States Environmental Protection Agency.svg.

Introduction générale

Introduction générale

L'eau ou l'or bleu est l'un des éléments essentiels au développement durable à cause de son importance dans la vie. Sans cet élément la vie serait impossible car c'est un facteur prépondérant pour toute activité socio-économique, depuis l'aube de l'humanité. Les dernières décennies sont caractérisées par une industrialisation galopante et par une sécheresse intense qui touche l'Algérie d'une manière générale (1).

Dans les milieux arides, les pluies se font rares et par conséquent la seule ressource en eau disponible est l'eau souterraine. Lequel constitue une ressource cruciale dans de nombreux pays et plus particulièrement dans les zones arides et semi-arides (2).

Ces dernières représentées ici par la nappe du continental intercalaire, cette nappe fait partie du Système Aquifère du Sahara Septentrional, partagée par l'Algérie, la Libye et la Tunisie, elle renferme des réserves d'eau considérables, qui sont cependant non renouvelables et dont l'exploitation est de type minière, les eaux de cette nappe comme la majorité des eaux souterraines, répondent naturellement aux normes de potabilité, et sont caractérisées par une absence presque générale d'oxygène et une grande pureté bactériologique (3).

L'homme du Sahara a pu s'adapter à son milieu désertique, il a pu fertiliser en faveur un milieu aride et contribuer à la création et au développement d'un écosystème agricole malgré les conditions de vie extrêmement hostile que lui impose la nature grâce au génie technique des sociétés oasiennes d'extraction des eaux souterraines appelée la foggara, Et c'est une technique traditionnelle du captage des eaux souterraines très répandue dans les Oasis (4), qui capte et irrigue avec zéro énergie, tout simplement en utilisant la gravité. C'est la raison pour laquelle la foggara a connu une réussite durant plusieurs siècles. D'origine minière, la foggara ou qanat a été découverte depuis plus de 30 siècles dans le nord Iranien. Ensuite, la foggara s'est développée dans plus de 52 pays de la planète (5).

La région d'étude a connu, durant ces dernières années, un certain développement économique et particulièrement agricole et industriel, Ceci a augmenté la demande en eau et a exposé la ressource à différentes sources de pollutions résultant de ces activités (1).

Pour préserver les ressources en eau souterraine et d'améliorer sa gestion, il ya plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes à la pollution. Dans cette étude nous dépendrons de la méthode DRASTIC dont l'usage est très répandu au monde.

Cette méthode paramétrique est la plus pertinente vis-à-vis de la réalité de terrain, du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Elle se présente sous forme d'un système de cotation numérique, basé sur la

considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique (7).

Le but de ce travail est d'évaluer l'état de pollution des eaux de la foggara en utilisant la méthode DRASTIC afin de montrer les zones les plus vulnérables à la pollution.

Ce travail est constitué principalement de cinq chapitres, présidés par une introduction générale.

❖ **premier chapitre** présente l'étude climatique et morphologique de la région d'étude.

❖ **deuxième chapitre** est consacré au contexte hydrogéologique de la région d'étude. Il puisera notamment les connaissances issues des travaux du SASS afin d'identifier

❖ **troisième chapitre** expose le contexte de l'histoire du système foggara à travers dans le monde, et description de la méthode de gestion et distribution de ressources en eau par ce système dans la région d'Adrar.

❖ **quatrième chapitre** montre le matériel et la méthodologie adoptée durant notre simulation.

❖ **cinquième chapitre** illustre l'interprétation des résultats obtenus.

Finalement, une conclusion générale résume les résultats de cette étude.

*Chapitre I Etude climatiques et
Morphologiques de la région d'étude*

I.1. Introduction

Le climat qui prévaut dans cette région est le climat désertique, qui est connu pour avoir des températures élevées en été et basses en hiver, ce qui entraîne une expansion de la marée de chaleur en plus du manque de pluie.

L'objectif de l'étude climatique d'une région est pour déterminer la variance et d'évaluer l'écosystème « en fonction des plantes locales qui poussent dans la région », et pour donner une idée du climat qui caractérise la région.

Ci-dessous, nous étudierons les changements climatiques dans la région de l'Adrar en analysant les différents facteurs climatiques (p, T, V...), qui revêtent une grande importance dans l'étude hydrogéologique.

I.2. Situation géographique d'Adrar

Wilaya d'Adrar est située au sud-ouest du pays à plus de 1200 km d'Alger. Elle est située entre les méridiens : 2°E et 6° W, et le parallèle 20° et 32° Nord. Sa superficie totale est de 427 368 Km², soit environ 18 % de la superficie globale de l'Algérie, elle est limitée de:

- Nord, par les wilayas d'El Bayadh et Ghardaïa.
- l'Ouest, par la wilaya de Bechar et Tindouf.
- à l'Est, par la wilaya de Tamanrasset.
- au Sud, par la Mauritanie et le Mali (8).

Elle est limitée géo-morphologiquement au Nord par le Grand erg occidental, au sud par le plateau de Tanezrouft, à l'Est par le plateau de Tademaït et à l'Ouest par l'Erg Chech.

Elle est répartie entre quatre régions sahariennes naturelles représentées par :

- ✓ **Gourara:** Son centre administratif est la daïra de Timimoune, cette région regroupe tout les palmerais et les "ksars" de cette daïra et s'étend de Tabelkouza à Aougrouit.
- ✓ **Touat:** Elle se prolonge du Brinkane jusqu'à Reggane; c'est la plus vaste des régions.
- ✓ **Tidikelt:** Cette région se prolonge d'Aoulef à Ain Saleh qui est le centre de la région.
- ✓ **Tanezrouft:** région de Bordj Badji Mokhtar (9).

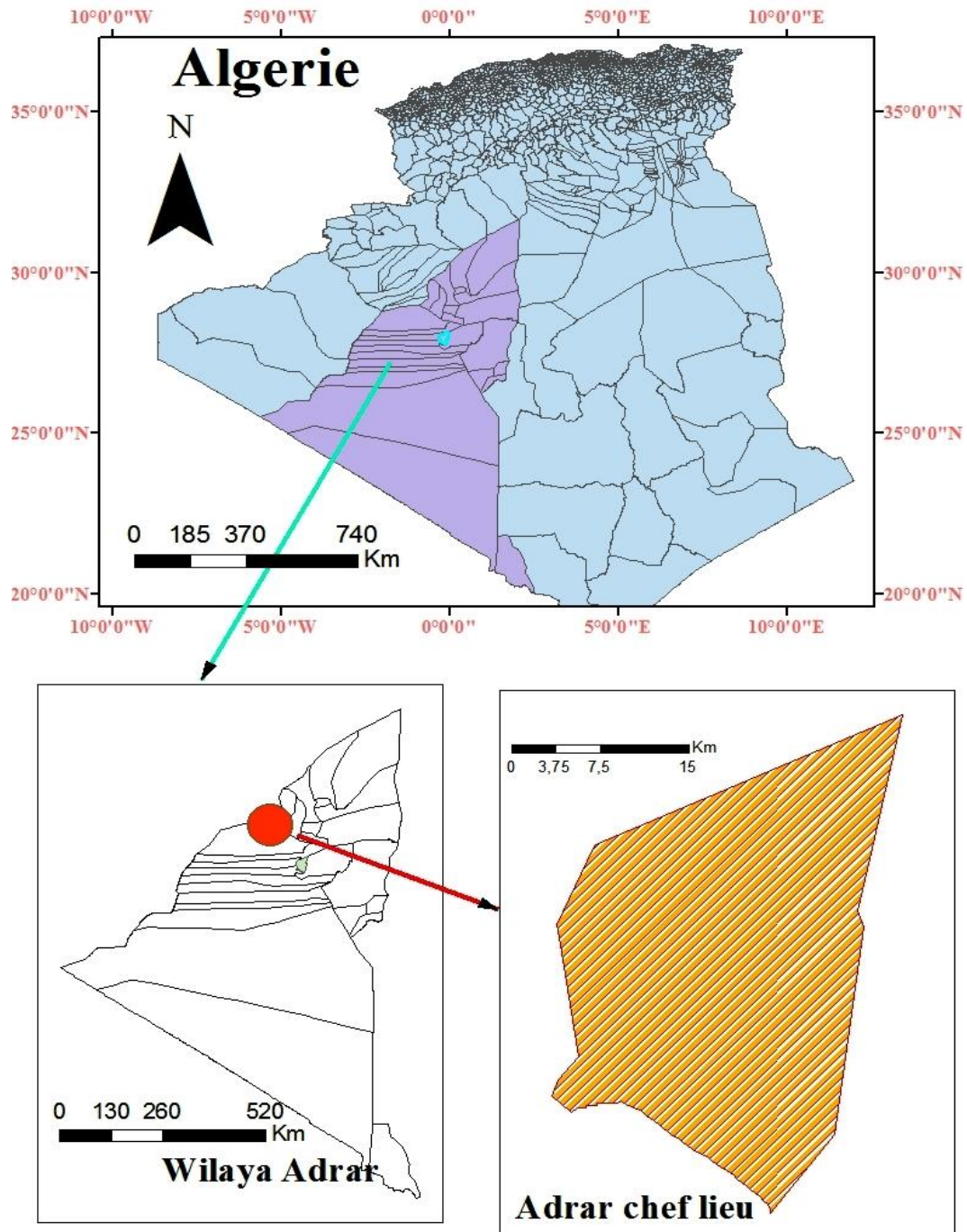


Figure 1 Situation géographique de la zone d'étude.

1.3. Aspect géomorphologique

La zone d'étude fait partie d'une grande zone allongée d'Est en Ouest et présente certains traits morphologiques à savoir :

1.3.1. Le plateau

C'est une vaste plaine (plateau), limitée vers l'Est par le plateau de Tademaït et vers l'Ouest par la dépression de Touat et se caractérise par une altitude maximale de l'ordre de 300m au

piéd du plateau de Tademaït, une pente faible de l'ordre de 0.1% à 0.2% et un pendage vers le Sud-ouest et l'Ouest (8) .

1.3.2. La dépression

La dépression se trouve le long de l'extrémité ouest de la plaine et se caractérise par une largeur moyenne de l'ordre de 5 Km à 10 km, par exemple la dépression de Touat (10).

1.3.3. Les sebkhas

Les sebkhas sont une succession de petites sebkhas situées entre un désert et un océan. Il empêche l'infiltration de l'eau de surface dans le sol, ce qui conduit à sa collecte après la pluie, et cette eau s'évapore après un certain temps, laissant une couche saline blanche brillante (sebkha).

1.3.4. Erg

La sédimentation et l'accumulation des couches sableuses constituent l'erg. Cette accumulation est peut se faire soit artificiellement qui justifiait la présence des petits ergs dispersés tout le long de notre région d'étude, ou naturellement par la formation de l'erg "*Echeche*" au Nord et le grand erg occidental à l'Ouest (11).

1.3.5. Reg

Le reg peut se considérer comme le type morphologique le plus fréquent dans la région. C'est grandes superficies plates.

Il est représenté par une surface sensiblement horizontale, recouverte de débris généralement graveleux ou caillouteux d'âge quaternaire qui protègent un substrat en général sableux ou alluvial de texture plus fine et d'âge crétacé inférieur (11).

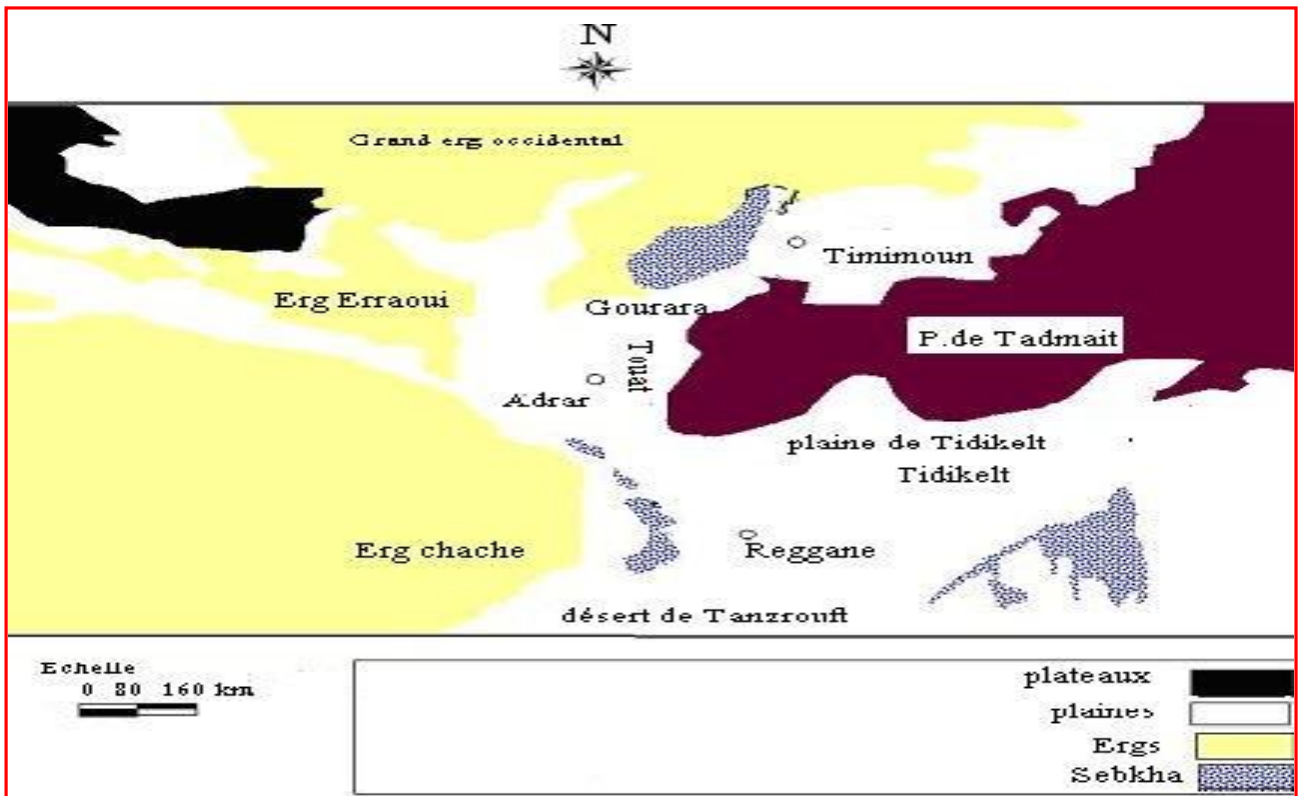


Figure 2 Carte géomorphologique de la région d'Adrar (22).

I.4. Aspect climatique de région d'étude

I.4.1. La Température

La température est un élément fondamental du climat à plusieurs points de vue, le plus important pour contrôler la répartition de la vie sur la terre (12).

- **Température maximale:** C'est la température la plus élevée atteinte par l'atmosphère en variation diurne.
- **Température minimale:** C'est la température la plus basse atteinte par l'atmosphère en variation diurne.
- **Température moyenne:** Il représente l'état moyen de la température de l'atmosphère pendant 24 heures par jour (12).

a) Températures moyennes mensuelles

Les valeurs de la variation de la température moyennes mensuelles enregistrées pendant une durée de vingtaine sont présentées dans le (tableau 1).

Tableau 1 Températures moyennes mensuelles (2000-2020) source ONM d'Adrar.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc	Tmoy
T° C	13,7	17,1	22,43	27,52	32,50	37,81	40,69	39,35	35,35	28,63	20,49	14,92	27,54

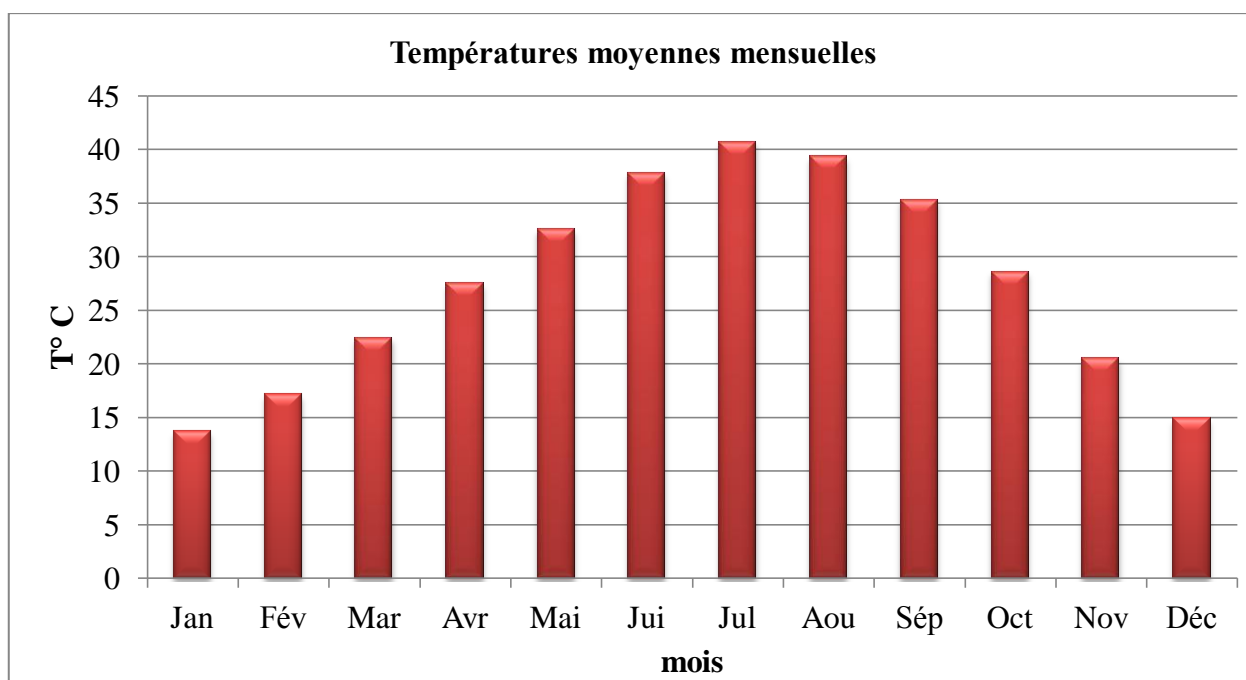


Figure 3 Histogramme des températures moyennes mensuelles.

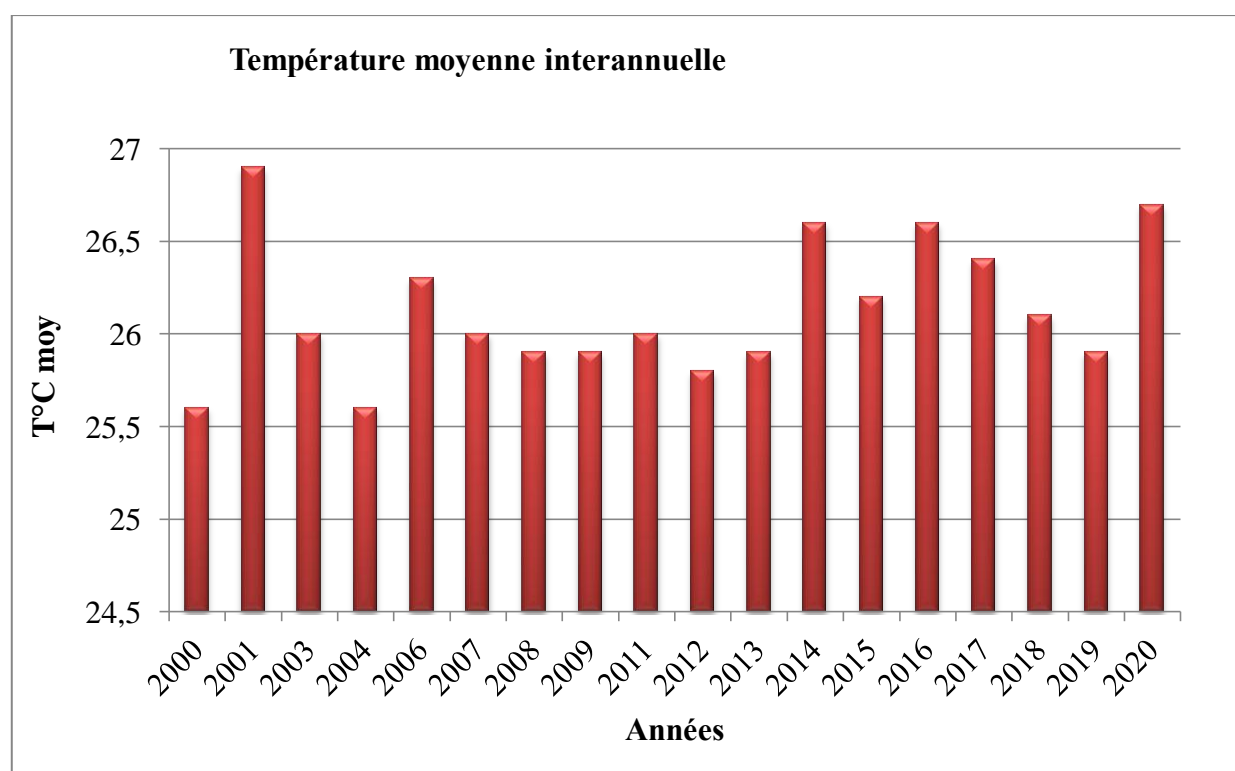
L'analyse de (figure 3) montre une variation remarquable de la température moyenne mensuelle au cours de l'année. Le mois le plus chaud est le mois de juillet avec une température moyenne de l'ordre de (40,69°C), tandis que le mois le plus froid est le mois de janvier avec une température moyenne mois de (13,7°C). La température moyenne mensuelle est de l'ordre de (27,54°C).

b) Températures moyennes intra-annuelles

Le (tableau 2) ci-dessous présente la répartition des températures moyennes interannuelles pour une série de 20 ans d'observation.

Tableau 2 Températures moyennes interannuelles (2000-2020) source ONM d'Adrar.

Année	T°C moy	Année	T°C moy
2000	25,6	2012	25,8
2001	26,9	2013	25,9
2003	26	2014	26,6
2004	25,6	2015	26,2
2006	26,3	2016	26,6
2007	26	2017	26,4
2008	25,9	2018	26,1
2009	25,9	2019	25,9
2011	26	2020	26,7

**Figure 4** La température moyenne interannuelle.

L'analyse des données de la température moyenne annuelle (figure 4) montre que l'année la plus chaude est l'année 2001 avec une température moyenne annuelle de (26,9°C), et que l'année la plus froide est l'année (2000 et 2004) avec une température moyenne annuelle de (25,6°C). La température moyenne interannuelle est de (26,13°C).

I.4.2. Le vent

Notre zone d'étude est l'une des régions les plus exposées au vent dans le Sahara algérien. La fréquence des vents est très importante durant toute l'année. A partir du (tableau 3) on remarque que la valeur de vitesse du vent dans cette région est généralement supérieure à 4 m/s durant toute l'année avec une plus forte amplitude en mars (6.52 m/s), avril (6.65 m/s) et mai (6.85 m/s) où ces vents sont en général caractérisés par des tempêtes des sables (13).

Tableau 3 Valeur de vent pour la station d'Adrar (ONM).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc	V moy
V (m/s)	5,79	6,46	6,52	6,65	6,85	6,24	6,51	6,35	5,87	5,77	5,29	5,79	6,17

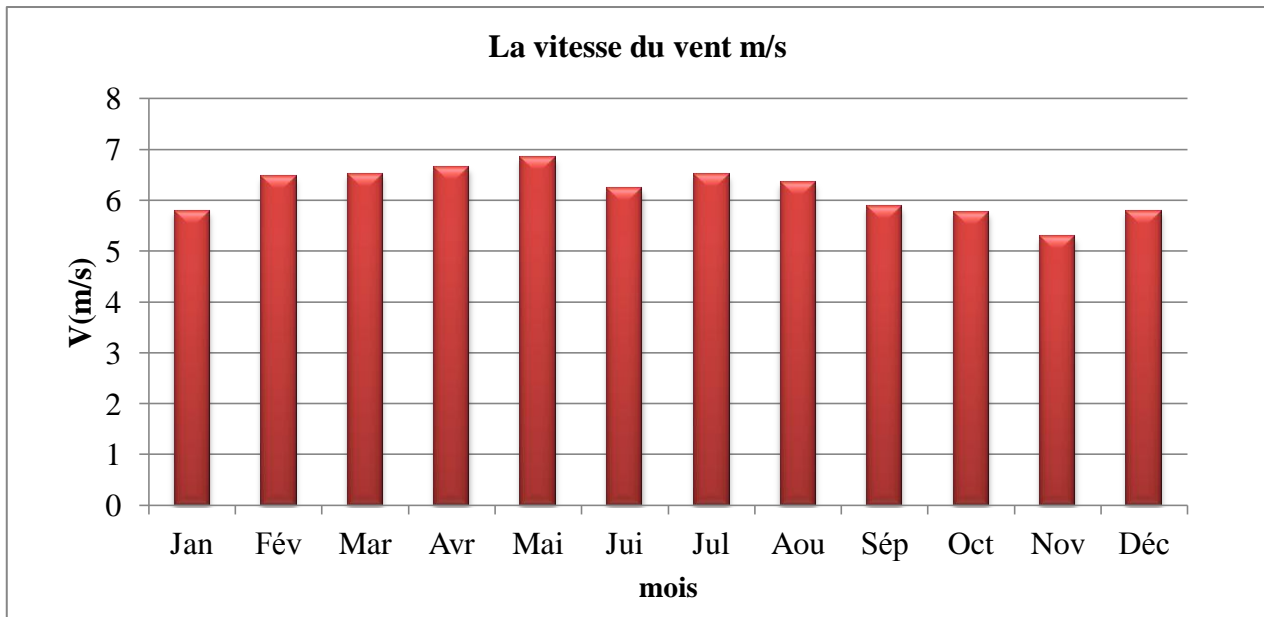


Figure 5 Les valeurs mensuelles de la vitesse du vent.

I.4.3. Humidité relative de l'air

Par définition, humidité relative est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation, elle est exprimée en pourcentage. Elle croit à partir du sol pour atteindre son maximum ($h_r = 100\%$) au niveau des couches nuageuses, et elle nous renseigne sur l'état de saturation de l'atmosphère (3).

Le (tableau 4) représente les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air en pourcentage ($h_r\%$) pendant une série allée de 2000 à 2020.

Tableau 4 Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité en % des différentes périodes (2000-2020).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc	Moy
h _r %	35,08	27,18	21,59	18,7	16	13,09	11,36	14,58	20,70	28,17	32,72	37,84	23,08

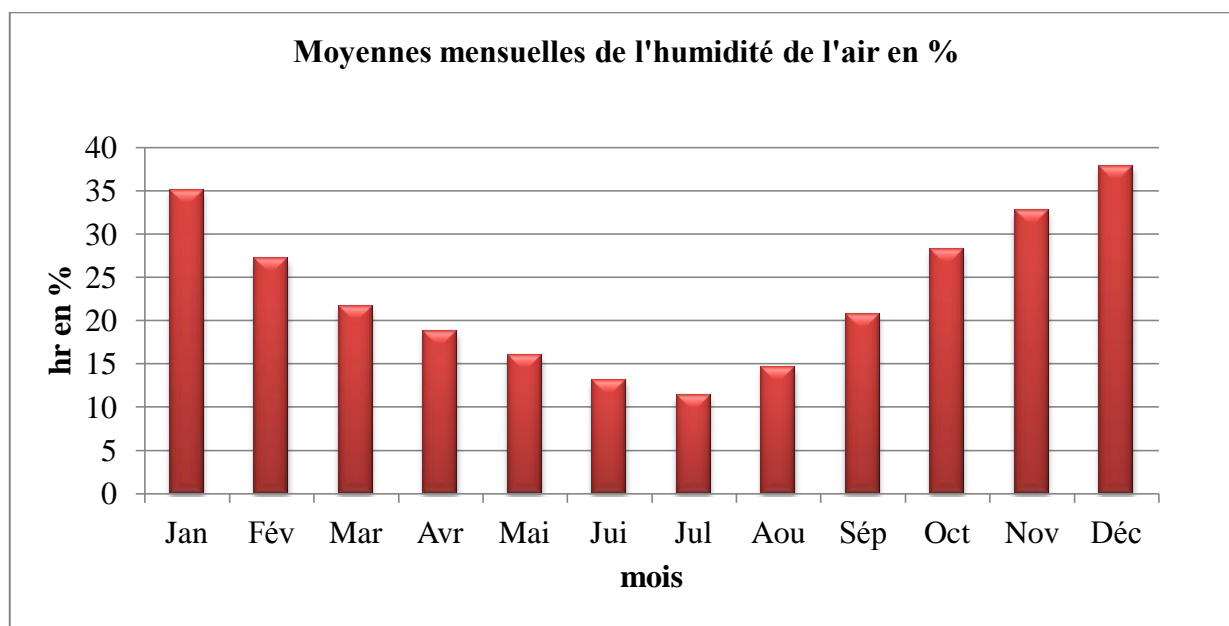


Figure 6 Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air (hr %).

La moyenne mensuelle de l'humidité dans la région de Touat ne dépasse pas 23,08%. Les moyennes mensuelles de l'humidité relative sont au-dessous de la médiane (50 %). Les fortes valeurs de l'humidité sont enregistrées durant la saison d'hiver et la valeur maximale moyenne enregistrée est celle du mois de décembre qui est de l'ordre de 37,8%. Les faibles valeurs de l'humidité relative sont de la saison chaude ou sa valeur minimale moyenne est enregistrée dans le mois de juillet (11,36 %).

I.4.4. La Précipitation

Les précipitations sont l'une des étapes fondamentales du cycle naturel de l'eau et sont définies comme toutes les formes d'eau qui tombent des nuages vers la terre, que ce soit sous forme de pluie liquide, de pluie gelée, de glace, de grêle ou de neige, et les précipitations sont le principal moyen de transmission de l'eau entre les couches terrestres au cours du cycle de l'eau. Les précipitations sont l'un des éléments les plus importants qui contrôlent le temps d'une région pendant une période de temps spécifique, car les taux de précipitation varient d'une région à l'autre (14).

a. Variations moyennes des précipitations mensuelles

Tableau 5 Les moyennes des précipitations mensuelles (mm) source ONM d'Adrar.

P	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc	P moy
P mm	1,11	1,39	1,93	2,60	0,73	0,50	0,60	0,43	3,09	2,45	2,46	2,75	1,67

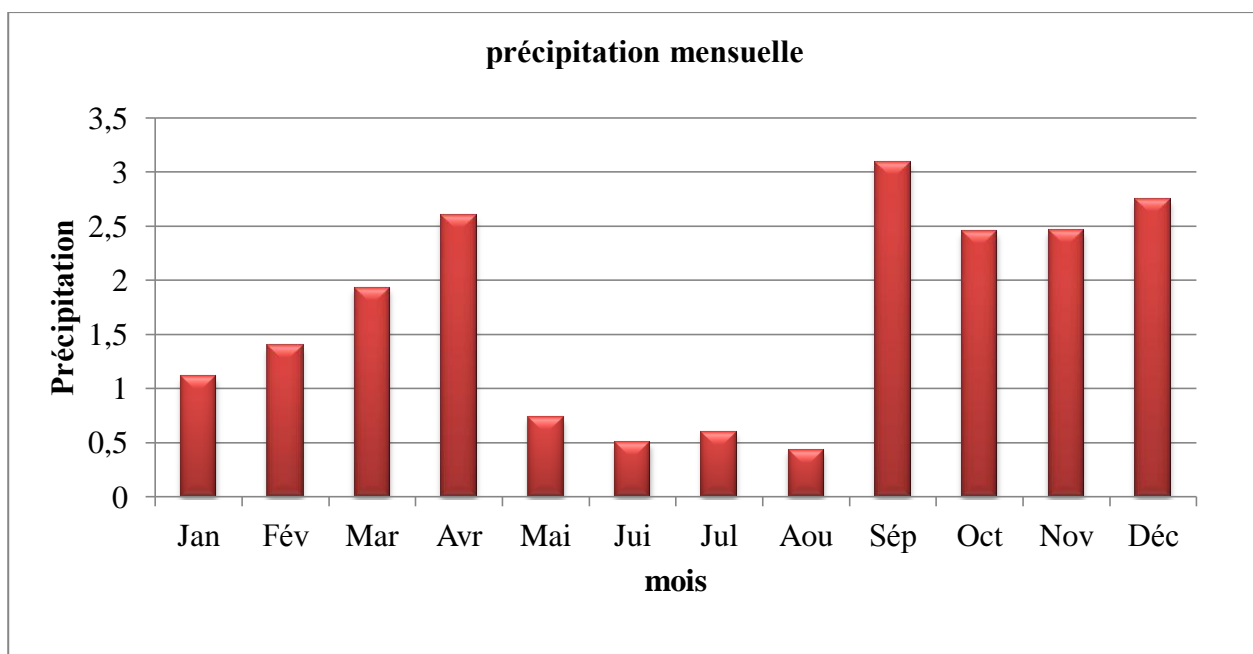


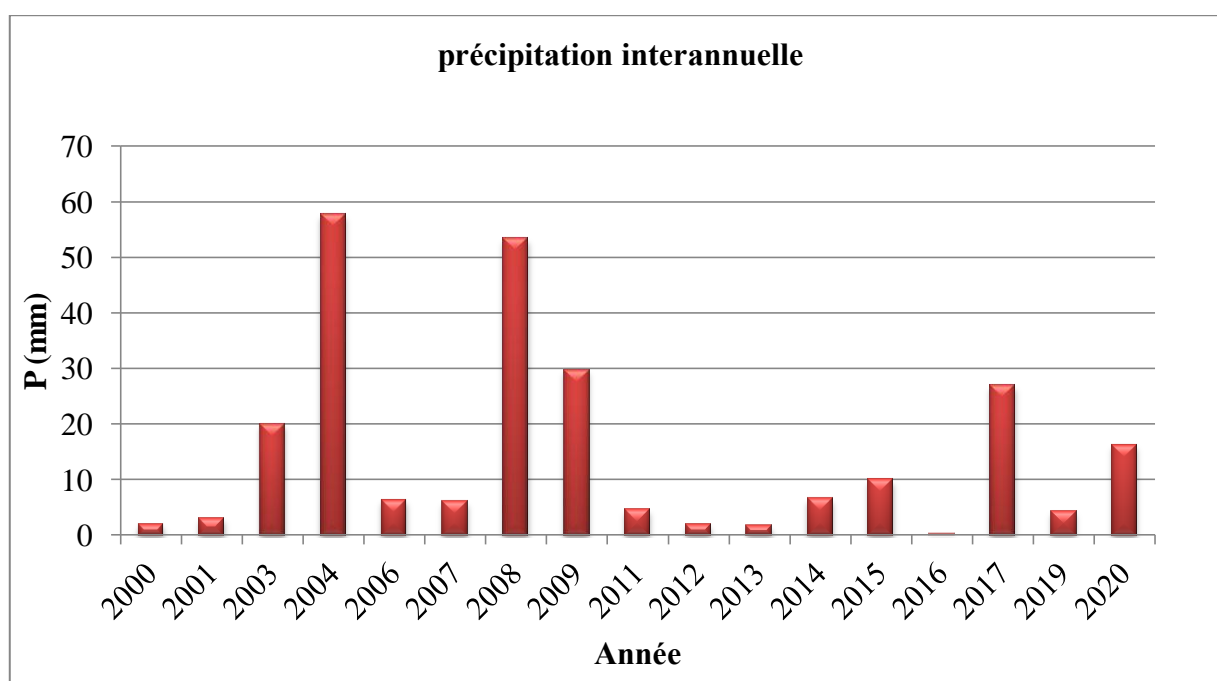
Figure 7 Les variations des précipitations moyennes mensuelles.

D'après la (figure 7) on remarque que les précipitations dans la zone d'étude sont très rares. Nous avons enregistré (3,09 mm) comme valeur la plus élevée en septembre, et la valeur la plus basse au mois d'aout (0,49mm). La précipitation moyenne mensuelle (1,67 mm).

b. Valeurs moyennes de précipitations interannuelles

Tableau 6 Les valeurs moyennes des précipitations interannuelles (mm) source ONM d'Adrar.

Année	Précipitation moyenne	Année	Précipitation moyenne
2000	2,03	2012	2,04
2001	3,05	2013	1,78
2003	20,07	2014	6,61
2004	57,65	2015	9,90
2006	6,36	2016	0,25
2007	6,09	2017	26,94
2008	53,33	2019	4,32
2009	29,72	2020	16,26
2011	4,58	Précipitation moyenne =14,76	

**Figure 8** Les variations moyennes interannuelles des précipitations.

L'analyse des valeurs moyennes interannuelles des précipitations, sur une période de 20 ans (2000-2020), montre que l'année 2004 est la plus arrosée avec des précipitations moyennes de l'ordre de 57,65 mm/an et que l'année 2016 est la plus sèche avec des précipitations moyennes de l'ordre de 0,25 mm/an. Les précipitations moyennes interannuelles sont de 14,76 mm/an (figure 8).

I.4.5. Diagramme Ombrothermique de Gausсен et Bagnouls :

Un mois sec est défini, selon Bagnouls et Gausсен (1953, 1957) comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T$). Ainsi, on constate que la saison sèche s'étale sur plusieurs mois consécutifs. Le diagramme de Gausсен (figure 9) permet de mettre en évidence une saison sèche qui s'étale sur tous les mois de l'année. Donc le bilan hydrique dans notre région d'étude est déficitaire durant toute l'année (8).

Tableau 7 Les valeurs des précipitations et températures annuelles (2000-2020).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc
T°C	13,7	17,1	22,43	27,52	32,50	37,81	40,69	39,35	35,35	28,63	20,49	14,92
P (mm)	1,11	1,39	1,93	2,60	0,73	0,50	0,60	0,43	3,09	2,45	2,46	2,75

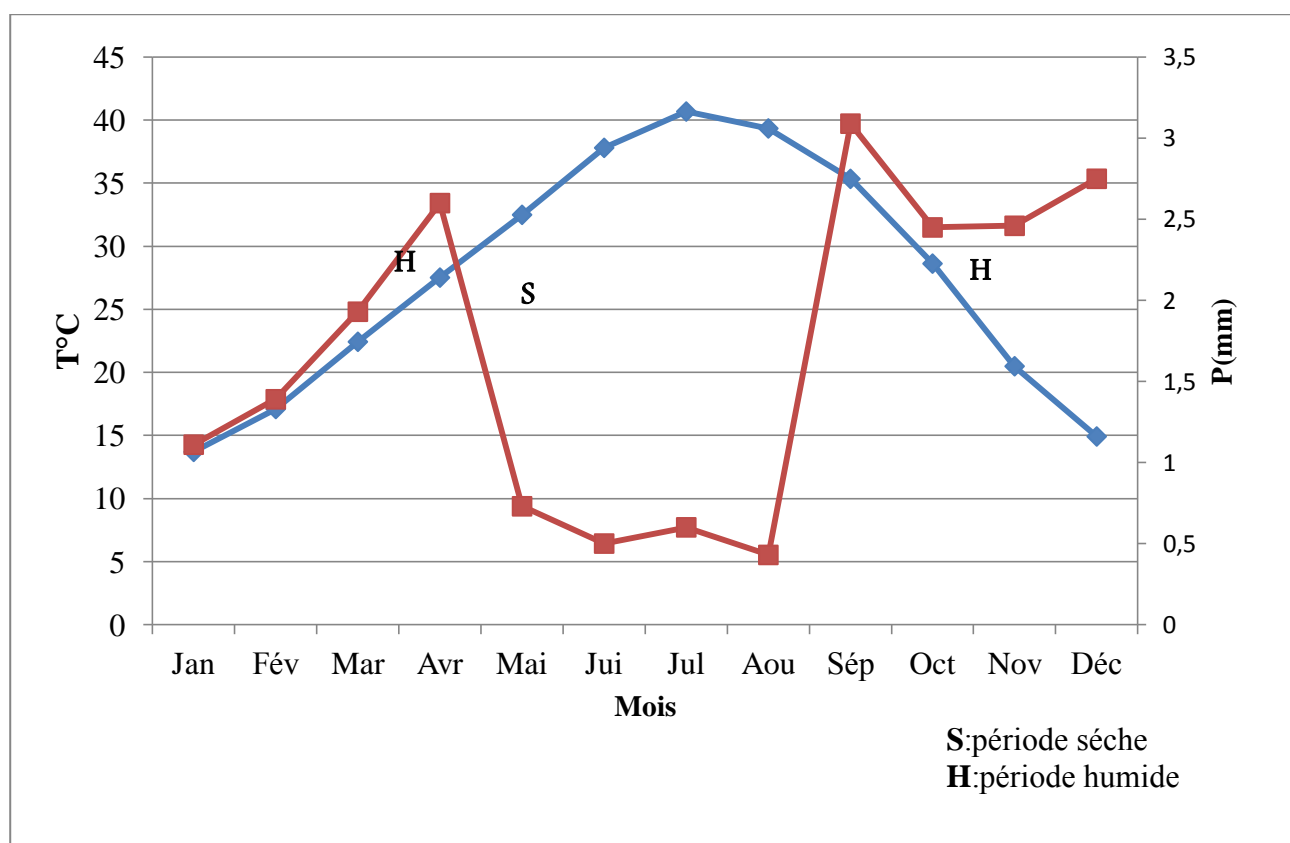


Figure 9 Diagramme Ombrothermique de Gausсен pour la région d'Adrar.

I.4.6. l'Evapotranspiration

I.4.6.1. Estimation de l'ETP (l'évapotranspiration potentielle)

C'est le terme le plus important du bilan hydrique après les précipitations, ce paramètre

climatique peut être mesuré directement sur le terrain par des appareils (évaporomètre, bacs d'évaporation) (15).

Son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant et on distingue :

- Une évapotranspiration potentielle qui correspond à la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant (15).
- Une évapotranspiration réelle qui est une réponse, en termes de vapeur d'eau, d'un milieu donné à la demande exercée par l'évapotranspiration potentielle, compte tenu de la quantité d'eau disponible (15).

Pour estimer l'évapotranspiration potentielle, on a appliqué les formules de Thorntwaite. que basée essentiellement sur les températures de l'air est la suivante :

$$ETP = 16 * K \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm).

T : température moyenne du mois en (°C).

$I = \sum I_i$ et $i = (T/5)^{1.514}$ i: Indices thermique.

$a = (1.6 * I / 100) + 0.5$

K: coefficient de correction en fonction de la latitude.

Tableau 8 Résultats de l'ETP issus de l'application de la formule de Thorntwaite.

Mois	T (°C)	P (mm)	I	K	ETP
Jan	13,7	1,11	4,59	1.02	8,91
Fév	17,1	1,39	6,43	0.99	17,38
Mar	22,43	1,93	9,70	0.9	37,15
Avr	27,52	2,60	13,22	0.9	70,76
Mai	32,50	0,73	17,01	0.92	122,15
Jui	37,81	0,50	21,39	0.88	188,20
Jul	40,69	0,60	23,90	1.03	277,60
Aou	39,35	0,43	22,72	1.07	259,51
Sép	35,35	3,09	19,32	1.16	200,71
Oct	28,63	2,45	14,04	1.15	102,41
Nov	20,49	2,46	8,46	1.18	36,63
Déc	14,92	2,75	5,23	1.13	12,91
Année	330,49	20,04	166,01	-	1334,32

I.5. Bilan hydrique (méthode de Thorntwaite)

La méthode de Thorntwaite permet de calculer l'évapotranspiration potentielle ou réelle, et cela on se basant sur les températures, les précipitations et les variations du stock en eau dans le sol.

Dans notre cas, la quantité d'eau stockée dans la RFU est maximale lorsqu'elle atteint 100 mm (15).

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée par la suite RFU) (8).

Le principe de cette méthode est basé sur 2 cas :

- 1^{er} cas : Si $P > ETP$ \longrightarrow $ETR = ETP$

Et l'excédent des précipitations sur l'ETP est stocké dans le sol, il forme l'humidité pour Thorntwaite, la saturation est atteinte lorsque les réserves superficielles cumulées atteignent la valeur de la réserve utile.

- 2^{ème} cas : Si $P < ETP$ \longrightarrow dans ce cas il puisera des réserves du sol

Jusqu'à ce que l'ETR soit égale à la pluviométrie $ETR = P + RFU$

Tableau 9 Bilan hydrologique selon la méthode de Thorntwaite.

Mois	P	T °C	ETP c	P-ETP	RFU	ETR	Da	EX
Jan	1,11	13,7	8,91	-7,8	0	1,11	7,8	0
Fév	1,39	17,1	17,38	-15,99	0	1,39	15,99	0
Mar	1,93	22,43	37,15	-35,22	0	1,93	35,22	0
Avr	2,60	27,52	70,76	-68,16	0	2,60	68,16	0
Mai	0,73	32,50	122,15	-121,42	0	0,73	121,42	0
Jui	0,50	37,81	188,20	-187,7	0	0,50	187,7	0
Jul	0,60	40,69	277,60	-277	0	0,60	277	0
Aou	0,43	39,35	259,51	-259,08	0	0,43	259,08	0
Sép	3,09	35,35	200,71	-197,62	0	3,09	197,62	0
Oct	2,45	28,63	102,41	-99,96	0	2,45	99,96	0
Nov	2,46	20,49	36,63	-34,17	0	2,46	34,17	0
Déc	2,75	14,92	12,91	-10,16	0	2,75	10,16	0
Année	20,04	27,54	1334,32	-	0	20,04	1314,28	0

Pour vérifier le bilan

$$P = ETR + EX$$

$$P = ETR$$

$$ETP = ETR + Da$$

D'après le bilan, on remarque que la zone est déficitaire, l'ETP est de 1334,32 mm, la réserve facilement utilisable est épuisée, un déficit agricole de 1314,28 mm et un excédant nul.

I.5.1. Détermination des indices climatiques

I.5.1.1. Indice d'aridité de De-Martonne :

En 1925 de De-Martonne proposé une formule climatologique permettant le calcul d'un indice dit indice d'aridité. Cet indice est fonction de la température (T en °C) et des précipitations (P en mm) et permet de déterminer le type de climat qui caractérise la zone d'étude. Ce paramètre se calcule selon la formule suivante (16):

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

P: Précipitation annuelle moyenne (mm).

T : Température annuelle moyenne (°C).

Les valeurs de l'indice permettent déterminer le climat selon le classement suivant:

Tableau 10 Classement en fonction de l'indice d'aridité (selon De-Martonne).

Classement de l'indice d'aridité	Type de climat
$I < 5$	Climat est hyperaride
$5 < I < 7,5$	Climat désertique
$7,5 < I < 10$	Climat steppique
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$20 < I < 30$	Climat est tempéré
$I > 30$	Climat humide

• **Application numérique :**

$I=0,533 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$

$P=20,04\text{mm}$, $T=27,54^{\circ}\text{C}$ Donc :

Après l'indice d'aridité de De-Martonne, on peut dire que notre région d'étude se caractérise par un climat hyper aride ($I < 5$).

Conclusion

A travers de ce chapitre, Le secteur d'étude fait partie d'une grande zone allongée sensiblement orientée Est-Ouest, elle renferme quelques traits morphologiques à savoir « l'erg, reg, sebka...etc ». Les valeurs de la température moyennes sont très élevée en été (40.69°C en mois de juillet), tan dis que la précipitation est faible durant toutes la saison de l'année avec une valeur moyenne estimée a $14,76\text{mm}$.

L'indice de De-Martonne ($I= 0,533 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$) est inférieur à 5, cela qui signifie que notre région d'étude est caractérisé par un climat hyper aride.

Le bilan hydrique calculé pour la région d'Adrar selon la méthode de Thorntwaite est déficitaire durant toute l'année et c'est du à la valeur élevée de l'évapotranspiration potentielle ($1334,32$), et l'excédent est nul sur cette base on peut considérer que la recharge des nappes dans cette zone est pratiquement très faible.

***Chapitre II Etude hydrogéologique de
La zone d'étude***

II.1.Introduction

La région d'Adrar se situe dans la partie sud de l'Algérie, elle représente la limite Sud-ouest de système aquifère de Sahara septentrional (17), ce système d'aquifère formé par deux nappes superposés soit le continental intercalaire(CI), et le complexe terminal (CT).

Notre région d'étude fait partie du bassin du Grand l'erg occidental, qui englobe dans sa majeure partie la nappe du continental intercalaire (CI), cette dernière désigne dans l'histoire stratigraphique, un épisode continental intercalé entre deux cycles sédimentaires marins :

- à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne.
- au sommet, le cycle du crétacé supérieur, résultat de la transgression cénomaniennne (8).

Le but de ce chapitre est de montrer les sources en eau disponible afin de présenter la relation entre les conditions topographiques, géologiques et hydrogéologiques.

II.2. Système aquifère

II.2.1. Définition d'aquifère

Le terme aquifère et aquitard s'appliquent au milieu géologique contenant l'eau souterraine. Un autre terme désigne l'eau elle-même : une nappe d'eau souterraine est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère. Une nappe phréatique est une nappe d'eau souterraine suffisamment importante pour être captée de façon utile par un puits. On distingue deux zones selon le degré de saturation en eau, soit la zone non saturée et la zone saturée. Dans la zone non saturée, les pores sont remplis à la fois d'air et d'eau ; on l'appelle aussi zone "vadose" parce que cette zone se situe souvent dans la partie superficielle des terrains et l'écoulement est triphasique. Dans la zone saturée, l'eau seule est présente dans les pores et l'écoulement est monophasique.

Deux propriétés essentielles caractérisent, du point de vue hydrogéologique, les roches et sols constituant les systèmes aquifères : la porosité et la perméabilité (18).

II.2.2. Types des aquifères

II.2.2.1. Nappes libres (aquifère souterrain)

C'est une formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau et des roches perméables capables de restituer l'eau naturellement et/ou par exploitation; cette nappe est donc la plus exposée aux pollutions de la surface.

Aquifère à nappe libre : aquifère surmonté de terrains perméables et disposant d'une surface

piézométrique libre et d'une zone non saturée (12).

II.2.2.2. Nappes captives

Elles sont comprises entre deux couches géologiques imperméables qui confinent l'eau sous pression. Celle-ci peut jaillir dans des forages dits artésiens. Les nappes captives sont souvent profondes de quelques centaines de mètres voire plus. Elles se renouvellent plus lentement.

Leur alimentation provient pour partie de la zone affleurant de l'aquifère et elles bénéficient d'une protection naturelle, représentée par la formation géologique imperméable sus-jacente. Elles sont de ce fait peu vulnérables aux pollutions de surface (19).

II.2.2.3. Nappe semi-captif :

Aquifère surmontée d'une couche semi-perméable relativement mince et/ou surmontant une telle couche à travers laquelle l'eau peut pénétrer dans la formation aquifère ou en sortir (12).

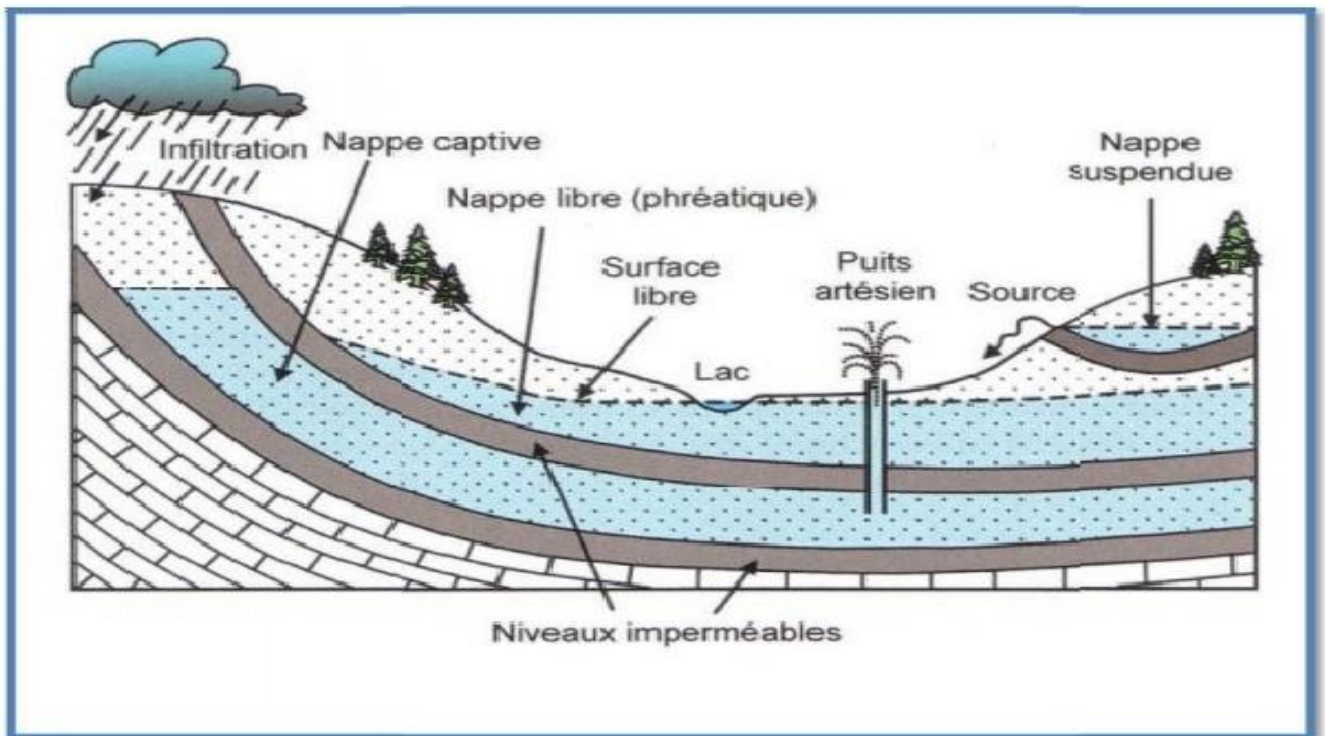


Figure 10 Les différents types de nappes (20).

II.3. Système Aquifère du Sahara Septentrional

Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS), est partagé entre l'Algérie, la Libye et la Tunisie (figure11) , il couvre une superficie d'environ 1 000.000 km² dont 60 % se trouve en Algérie, 30 % en Libye et 10% en Tunisie et s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'à l'affleurement du Tidikelt et du rebord méridional du Tinrhert, et d'Ouest en Est depuis la vallée du

Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye (21).

Les eaux souterraines s'accumulent dans un aquifère, qui se compose de deux réservoirs appelés CT et CI, que reconnu et exploité par près de 8800 points d'eau, forages et sources : 3500 au continental intercalaire et 5300 au complexe terminal. Par pays, ces points se répartissent ainsi : 6500 en Algérie, 1200 en Tunisie et 1100 en Libye.

Le bassin SASS se subdivise en trois sous bassins : le bassin du grand erg occidental à l'ouest, le bassin du grand erg oriental au centre et le plateau de la Hamada El Hamra à l'est (21).

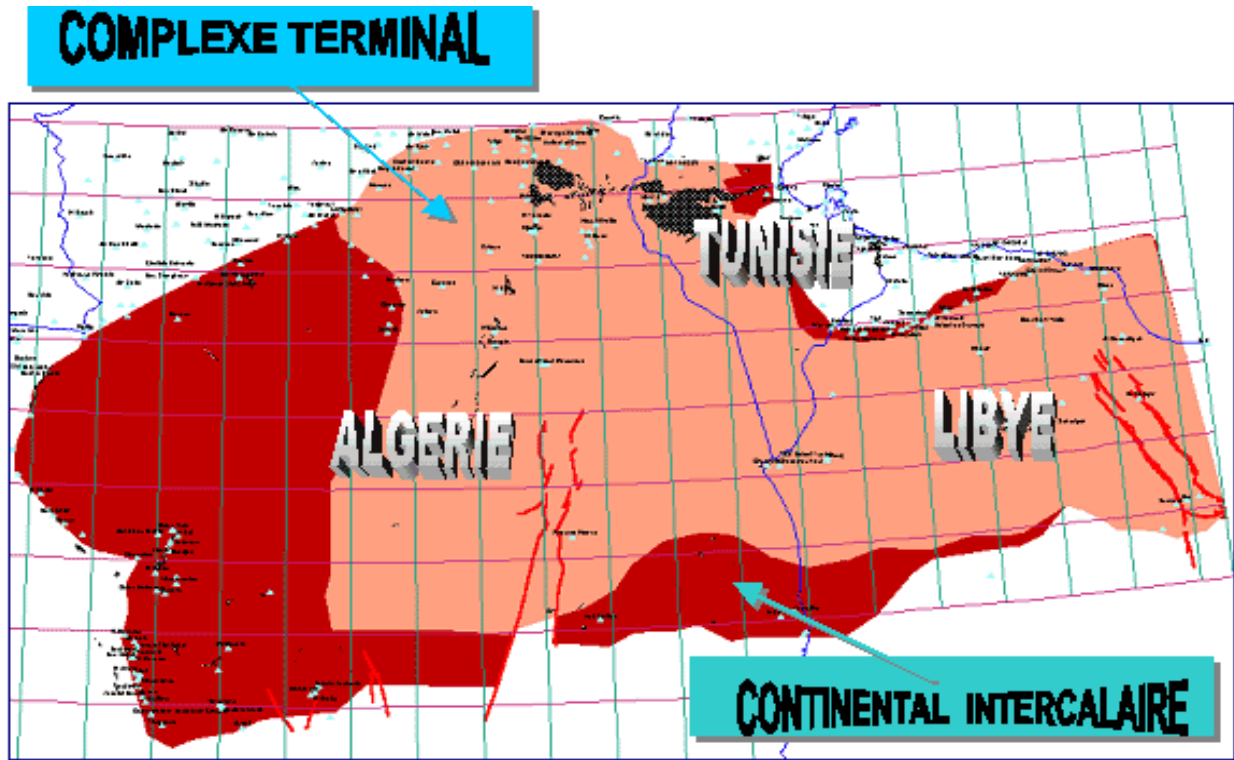


Figure 11 Délimitation de l'extension de l'aquifère source Rapport SASS (3).

II.3.1. L'aquifère du complexe terminal (CT) :

La nappe du complexe terminal (CT) se localise dans le Sahara occidental et s'étend sur une superficie de 350.000 Km² avec une profondeur oscillant entre 100 et 500 m. Cette nappe regroupe deux systèmes aquifères, qui sont appelés nappes des sables et nappes des calcaires (22).

Le complexe terminal est constitué, par des formations d'âge et de lithologie différents : à la base il y a le Sénon - Eocène carbonaté et au sommet on trouve le Mio- Pliocène sablo argileux. La nappe du complexe terminal est en charge sous les formations argileuses du Moi -Pliocène dans la partie Nord et libre dans la partie sud. Les calcaires et les dolomies du Turonien sont reliés hydrauliquement aux formations carbonatées précédentes par l'aquifère des sables du Moi - Pliocène (22).

L'écoulement général se fait vers les Chotts et vers le golfe de Gabès (Tunisie). Les eaux de cet aquifère se caractérisent par une température peu élevée ; l'eau est moins chargée en sels sur les bordures et relativement plus chargée au centre (plus de 5g/l).

La réalité d'une alimentation du réservoir a été établie :

Sur les bordures relativement arrosées du bassin, par infiltration directe sur les affleurements calcaires ou au travers des écoulements d'inféro- flux des oueds.

Sur le Grand erg occidental et le Grand erg oriental, par infiltration des pluies exceptionnelles. Enfin d'une manière indirecte par drainage de l'aquifère des dolomies turoniennes, et des fuites du CI par l'intermédiaire des failles d'Amguid el biod (22).

Au total, ces apports représentent une alimentation équivalente à 750 millions dm^3/an . A l'est de la dorsale du M'Zab, autant que dans le Sud tunisien et en Libye, l'essentiel de l'écoulement converge vers la zone des Chotts (22).

Bénéficiant de cette structure, les eaux souterraines constituent plusieurs ensembles superposés: la puissante nappe artésienne du(CI) gréseux, la nappe artésienne des calcaires marins du Sénonien et de l'Eocène, enfin des nappes phréatiques largement étalées dans les formations continentales superficielles (22).

II.3.2. Le continental intercalaire (CI):

Le continental intercalaire occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du trias et le sommet de l'albien. Ce réservoir a un volume considérable du à la fois à son extension sur tout le Sahara septentrional (600.000 Km^2) et à son épaisseur, qui peut atteindre 1000 mètres au Nord Ouest du Sahara (22).

La nappe du continental intercalaire est un réservoir à eau douce ; la plus grande partie de l'eau de cette ressource a été remplie pendant les périodes pluvieuses du quaternaire. Les eaux du continental intercalaire sont caractérisées par:

- Une température qui dépasse les 60°C sauf aux endroits où l'aquifère est proche de la surface du sol.
- Une charge en H_2S et CO_2 qui lui donne un caractère corrosif.
- La minéralisation de l'eau oscille entre (1 et 2) g/l de résidu sec et peut atteindre les 5g/.

L'alimentation de la nappe, relativement faible, se fait par ruissellement à la périphérie du réservoir, tout au long et à l'extrémité des Oueds, qui descendent des monts de l'Atlas saharien, Dahar Tunisien, du plateau de Tademaït et Tinhert et par les pluies exceptionnelles sur les grands ergs (22).

- L'écoulement des eaux de cette nappe se fait dans la partie occidentale du Nord vers le Sud

et dans sa partie orientale de l'Ouest vers l'Est(Tunisie) et du Sud vers le Nord.

C'est une nappe qui est partagée entre trois pays maghrébins : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. La partie algérienne du continental intercalaire couvre 600 000 Km². Elle stocke un volume d'eau considérable, estimé à 50 000 milliards m³ environ (22).

Située à plus de 1400 m de profondeur dans la zone de Touggourt, cette nappe est plus connue sous la dénomination d' « Albien », nom de l'étage géologique qui renferme la couche aquifère supérieure du (continental intercalaire), qui est la plus exploitée. Le terme de continental intercalaire, par contre, désigne l'ensemble des couches détritiques qui se sont déposées au Mésozoïque inférieur au Sahara, entre deux cycles marin (22).

II.3.2.1. Le continental intercalaire dans la région d'étude

Le continental intercalaire est la seule et unique nappe d'eau dans la région d'étude, elle affleure tout le long de l'axe reliant Timimoune à In Salah, elle représente la partie à surface libre du système aquifère du Sahara septentrional dans sa partie Sud Ouest.

La nappe d'eau est contenue dans des formations d'âge crétacé inférieur, composée d'une lithologie meuble, argile, grès, sable et gravier, elle est sollicitée par 271 foggaras, 219 forages et plus de 2161 puits traditionnels dans l'axe reliant Adrar à Reggane, le niveau statique est de l'ordre de 10 à 30 m par rapport au sol et qui dépasse les 100 m sous le recouvrement du plateau de Tademaït, avec des débits des forages de l'ordre de 20 à 50 l/s qui engendrent des rabattements de 10 à 25 m (23).

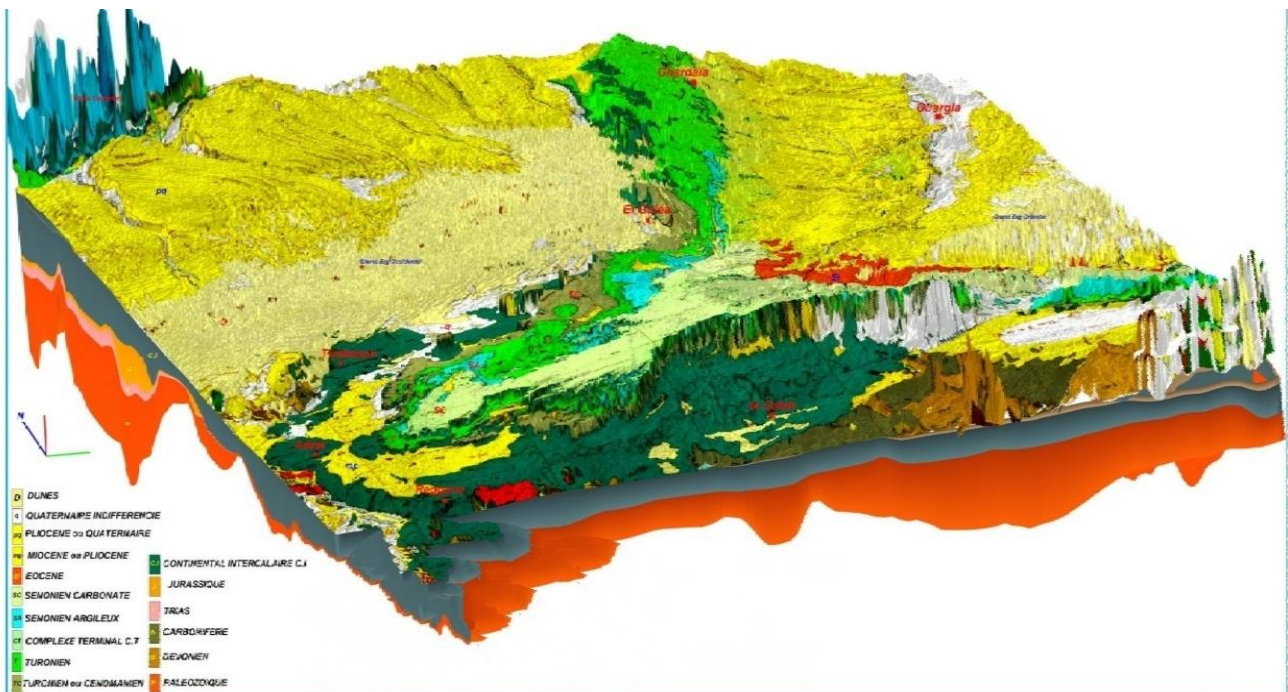


Figure 12 Carte géologique drapée sur diagramme hydrogéologique du bassin occidental (23).

II.3.2.2. Caractéristiques principales du CI.

Dans le centre du bassin oriental la nappe est fortement artésienne, profonde et l'eau jaillit à une température élevée, le même cas d'artésianisme se présente dans le synclinal de In Salah et Tit sur la bordure de M'Zab, piémont de l'atlas saharien. Au Touat, Gourara et Tidikelt occidentale, elle n'est qu'ascendante, à une surface libre peu profonde et à des températures normales (6).

a) Puissance utile du réservoir du CI.

L'épaisseur de la formation du continental intercalaire varie du nord vers le sud et déborde de même vers la Tunisie et la Libye, l'est vers l'ouest. Selon les données des forages semi-profonds, son épaisseur oscille entre 150 m et 400 m.

b) Niveau statique de la nappe aquifère du continental intercalaire (CI).

Le niveau statique de la nappe aquifère du continental intercalaire (CI) oscille entre 50 à 2000 m par rapport à la côte du sol et peut atteindre 10 m au niveau du plateau de Tademaït (forage Ain Bel bel) (6).

c) Paramètres hydrodynamiques.

Vu la grande superficie du continental intercalaire (CI), les paramètres hydrodynamiques varient d'une zone à l'autre suivant les types de formations géologiques qui prédominent.

- La porosité efficace $n_e = 20 \%$.
- La porosité totale (n) varie entre 22 % et 28 %.
- La transmissivités varie entre 0,1 à 0,001 m²/s.

d) Le sens d'écoulements des eaux de la nappe aquifère.

Les axes d'écoulements des eaux de la nappe aquifère du continental intercalaire (CI) sont généralement :

- Nord vers Sud et Nord-est vers Sud-ouest, c'est à dire vers le Gourara, le Touat et le Tidikelt.

L'autre partie s'écoule vers l'exutoire Tunisien et Libyen (6).

II.3.2.3. Lithologie de la nappe du continental intercalaire.

L'analyse des coupes lithologiques des forages réalisés dans la région d'étude montre qu'il n'y a pas un grand changement latéral de faciès dans les forages, la majorité des forages ont presque la même lithologie, on trouve de haut en bas :

- Une dalle très dure de calcaire ou de calcaire dolomitique, ou de grès quartzitique.
- Une couche gréseuse et argileuse et argile multicolore.
- Une couche de sable et de gravier.
- Une couche d'argile sableuse avec gypse ou anhydrite.
- Une couche d'argile rouge ou marron plastique.

Cette lithologie est typique pour la majorité des forages de la région d'étude (23)

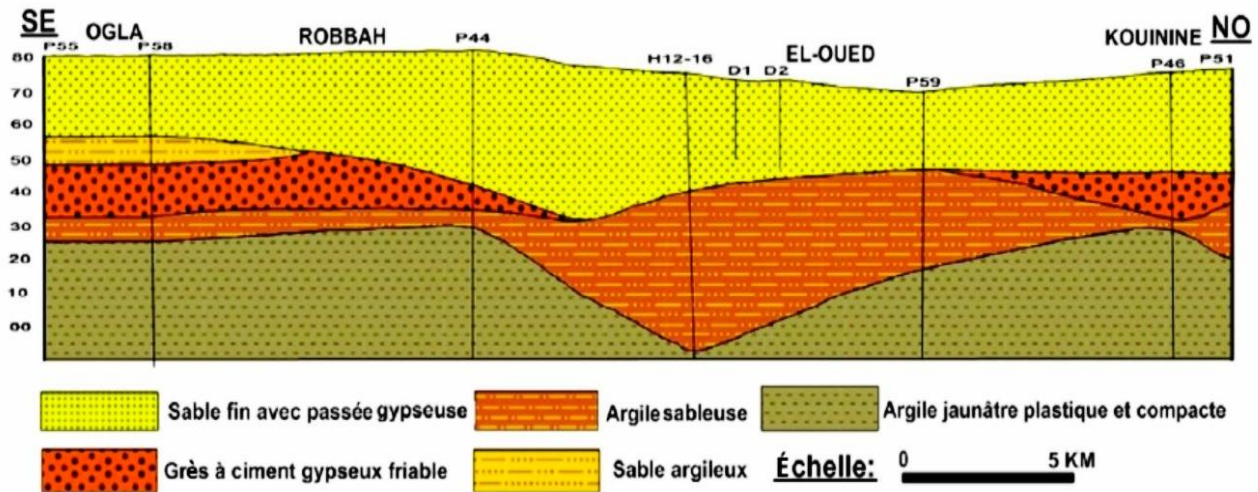


Figure 13 Coupe lithologique dans l'aquifère libre d'El-oued (1).

II.4. Alimentation du continental intercalaire (CI)

Cette nappe est chargée au cours des périodes pluviales du quaternaire. Actuellement, elle reçoit une faible recharge, surtout à partir du piémont de l'Atlas saharien.

Que la quantité d'eau tombe annuellement du crétacé inférieur continental est estimée à 2,5 milliards m^3 /an, et le volume d'eau emmagasiné dans le (CI) évalué à 50000 milliard m^3 correspondant, en théorie à un débit fictif continu de 1000 m^3 /s pendant 2000 ans (9).

II.5. La piézométrie de la nappe du continental intercalaire

La carte piézométrique est la synthèse essentielle de l'étude hydrogéologique. Elle schématise la morphologie de la surface piézométrique de la nappe et permet d'obtenir des informations importantes sur le sens d'écoulement des eaux souterraines et le comportement hydrodynamique de l'aquifère. L'établissement de cette carte repose sur des mesures piézométriques à une période donnée. Et dans la région de Touat les eaux du continental intercalaire sont destinées essentiellement à l'AEP et l'irrigation, les profondeurs des forages varient entre (80 et 150 m) (4).

Pour la réalisation de la cartographie piézométrique, nous avons utilisé les données du réseau piézométrique de l'ANRH d'Adrar installé en 2007 (figure 14) pour les années 2007 et 2010, et les données de l'Étude des ressources en eau du Sahara septentrional (ERESS) réalisée durant la période 1969-1971 par l'UNESCO pour l'année de 1971, ce qui nous a permis de suivre sur presque 40 ans d'observation l'évolution piézométrique de la nappe du continental intercalaire (C.I) dans le temps et dans l'espace dans sa partie Sud-ouest d'une part et d'autre part de connaître la direction générale de l'écoulement et d'identifier les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (23).

Le gradient hydraulique est faible (2007), il est de l'ordre de 0.003 dans la région de Tasfaout, pour les autres régions le gradient hydraulique est de l'ordre de 0.0001 au centre et de 0.0002 à l'Est de la zone d'étude (23).

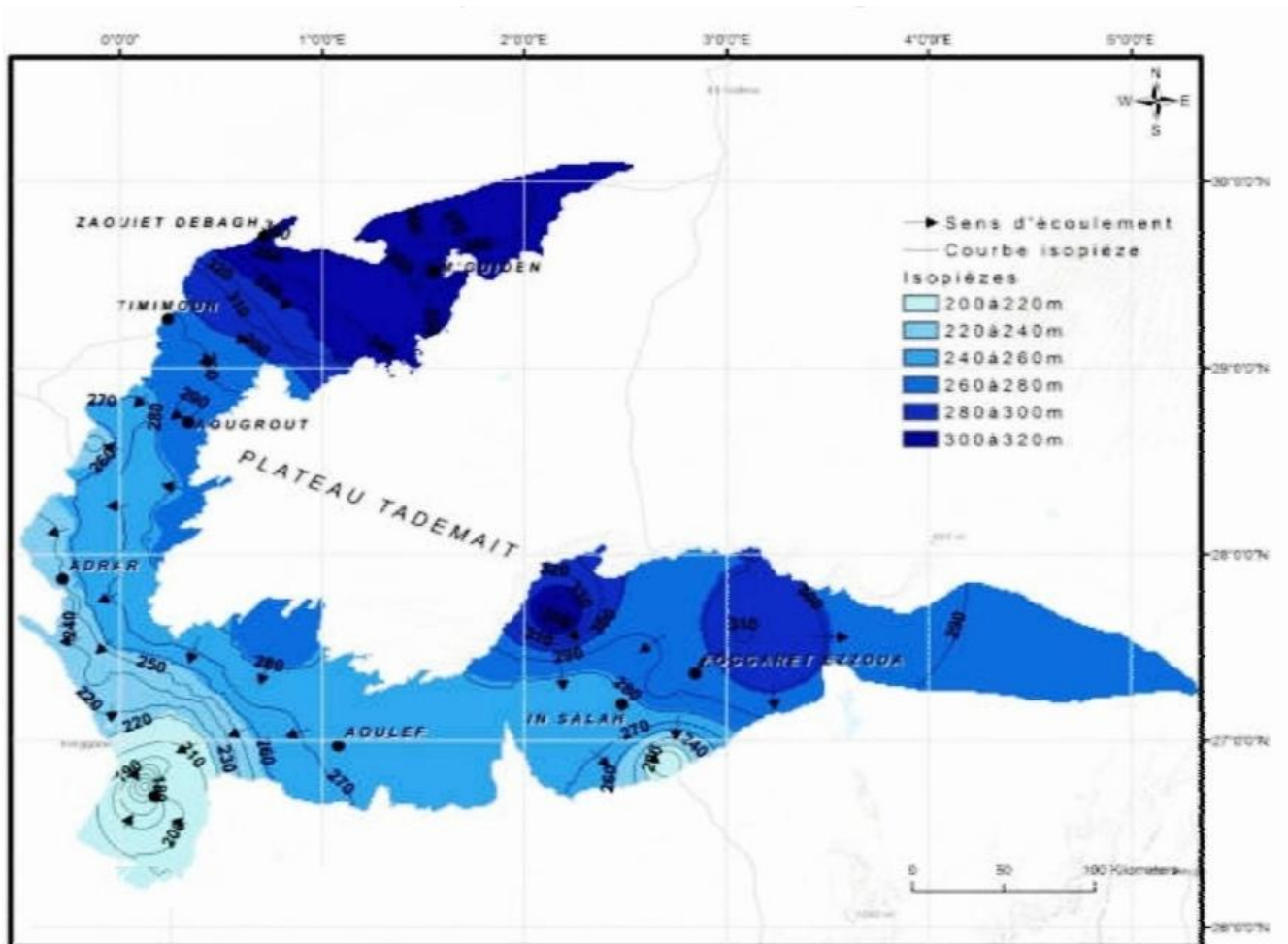


Figure 14 Carte piézométrique du CI 2007 (24).

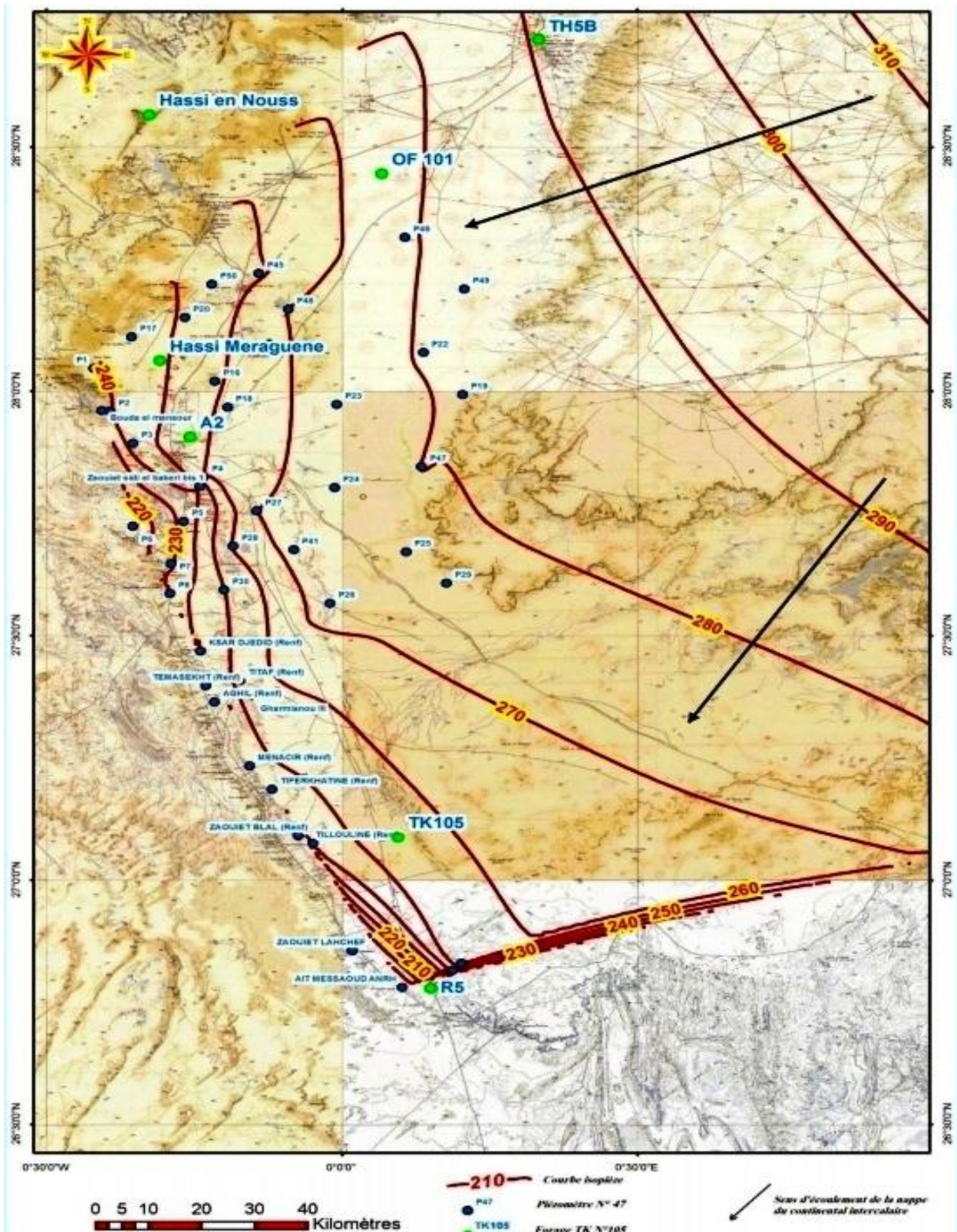


Figure 15 Carte piézométrique du continental intercalaire dans la région d'Adrar décembre 2007 (4).

Conclusion

L'étude hydrogéologique a permis de percevoir la superposition des deux nappes constituant le SASS, à savoir le complexe terminal (CT) et le continental intercalaire (CI), le dernier est composé des formations meubles et représente l'unique ressource en eau fossile dans la région d'étude.

Le système aquifère dans la région d'Adrar est représenté par une seule nappe à savoir le continental intercalaire (CI), cette dernière est contenue dans des formations d'âge crétacé inférieur, elle est composée de (sable, grès, argile et graviers), elle est sollicitée par 271 foggaras, 219 forages et plus de 2161 puits traditionnels dans l'axe reliant Adrar à Reggane. La profondeur des forages qui captent cette nappe est de l'ordre de 100 à 200 m, le niveau statique de la nappe varie du Nord au Sud et de l'Est à l'Ouest, il est de 10 à 30 m par rapport au niveau du sol, avec des débits d'exploitation de 20 à 50 l/s.

*Chapitre III Généralité sur les
Eaux de foggara*

III.1. Introduction

Les peuples Sahariens pour assurer leur vie, ils ont basé sur la seule et unique source de l'eau qui est le continental intercalaire. L'exploitation de cette nappe est faite par plusieurs méthodes notamment les forages, les puits traditionnels et le système d'irrigation foggara, ce dernier qui fait l'objet de ce chapitre.

La description du système foggara nécessite des connaissances sur son origine, son diffusion dans le monde et son principe de fonctionnement y compris ses types, ses composantes, et la méthode de la distribution liée au système.

III.2. Historique de la foggara

Les zones arides et semi-arides ont une caractéristique particulière pour économiser l'eau, c'est ce qui a conduit à la présence du système de foggara. Pour couvrir les besoins en eau et lutter contre l'aridité importante de la terre sans laisser prise à l'évaporation (25).

La foggara est conçue sur le modèle des « *qanat* » de Mésopotamie et Perse, dont Hérodote a fait mention dès le Ve siècle avant Jésus-Christ (11).

L'ingénieur français Henri Goblot, qui travaillait en Iran est basé sur l'hypothèse de l'historien grec Polybe qui contient des renseignements détaillés sur les foggaras de la Perse du III^e et du II^e siècle av. J.-C. >.

Les Perses au temps de leurs règnes en Asie, accordèrent le droit à ceux qui amenaient de l'eau de source (hydro peigne) à certaines zones, qui auparavant n'étaient pas irrigués. Ils construisent ainsi des canaux souterrains, qui amènent l'eau de loin (11).

D'autres ont mentionné que l'invention du qanat est portée au crédit du royaume d'Urartu, qui englobait aux 8^e et 7^e siècles avant J.-C. la Turquie orientale, l'Arménie et le nord-ouest de l'Iran (26).

Le Polybe a défini le qanat comme étant un canal souterrain conduisant des eaux de pluie à travers des galeries drainantes (11).

III.3. Définition de foggara

La foggara est une galerie souterraine légèrement inclinée qui draine l'eau de l'aquifère amont vers les terrains les plus secs situés en aval. Ce procédé utilise un système de galeries en pente douce d'une longueur pouvant atteindre les 20 km et de 1 m à 1,20 m de diamètre, équipées d'une série de puits d'aération espacés de 5 à 22 m (figure 16) la distance entre les puits n'est pas forcément respectée, et l'intervalle qui sépare deux puits s'appelle « *N'fad* » ou galerie drainante (5).

Ce système porte d'autres appellations "Chagga" à Bou-Saada, "Ngoula" ou "Kriga" dans le Sud tunisien, "Khattara" au Sud marocain, qanat en Iran, "Khiras" en Afghanistan, "Sahridj" au Yémen. Et "Medjrit" d'origine arabe, en Espagne (canal) (8).

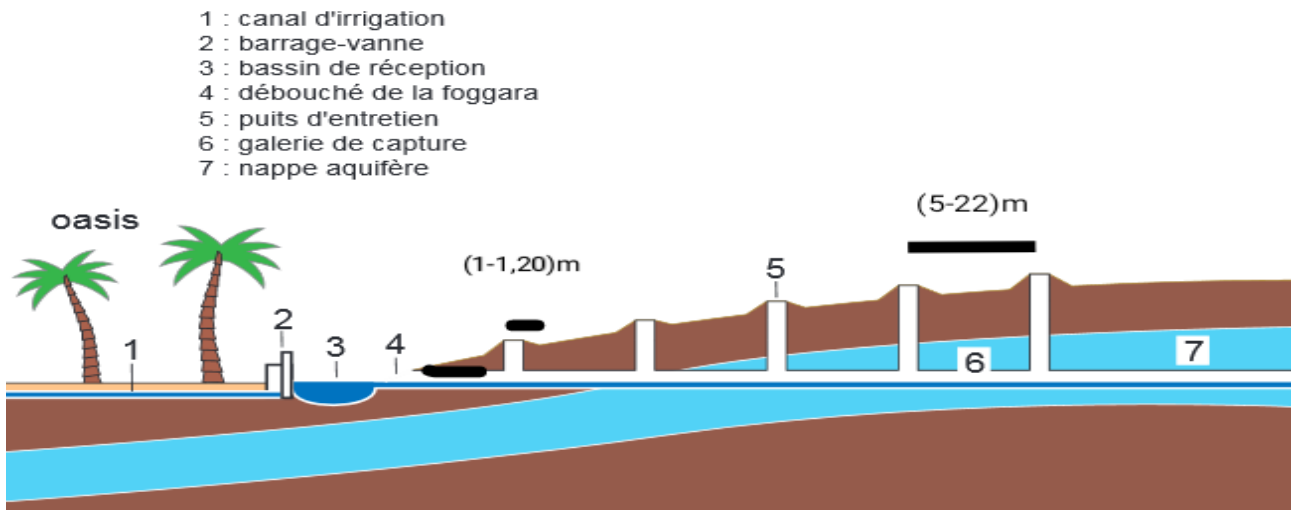


Figure 16 Schéma simplifié d'une foggara et d'un puits (5).

III.4. Origine et diffusion de système de foggara dans le monde

III.4.1. Naissance de système de qanat en Europe

III.4.1.1. Système d'aqueduc en Luxembourg

En Europe et exactement dans le site des "Raschpëtzer", à proximité de "Walferdange", le Luxembourg dispose de l'un des aqueducs souterrains d'origine romaine les plus imposants et les mieux conservés parmi ceux situés au nord des Alpes. Il s'agit en fait d'une conduite d'alimentation en eau potable, construite d'après le principe du qanât (figure17) (27).

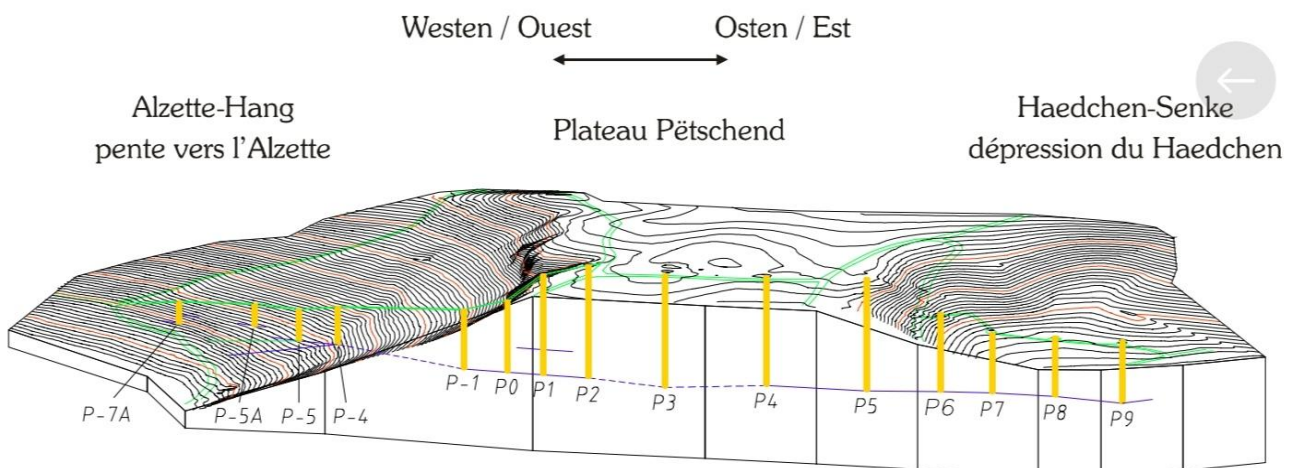


Figure 17 L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer utilisé par les Romains (27).

Les connaissances et l'expérience des constructeurs romains dans des domaines techniques tels que la géologie, l'hydrogéologie, la construction de tunnels, la mécanique des sols et la géodésie s'avéraient être absolument remarquables à partir de ce captage de l'eau et d'alimentation de la galerie qui se trouve à 20 mètres sous la surface de la dépression du Haedchen et fonctionne toujours de façon à ce que l'eau coule jusqu'à nos jours encore et ce au moins dans les parties supérieures et moyennes de l'installation (27).



Photo 1 Vue aérienne d'un puits appartenant à l'aqueduc souterrain des Raschpötzer (27).

III.4.2. Naissance de système de qanat en Asie

III.4.2.1. Système du qanat en Iran

Dans l'ensemble des régions arides de l'Iran, l'agriculture et des établissements permanents sont soutenus par l'ancien système de qanat puisant l'eau des aquifères alluviaux en amont des vallées et la faisant circuler par gravité le long de tunnels souterrains, souvent sur de nombreux kilomètres. (28)

Le qanat est un canal horizontal souterrain qui se nourrit dans un aquifère et dans lequel l'eau circule par gravité jusqu'à la surface. La pente du canal doit être calculée de manière à ne pas engendrer des phénomènes d'érosion (pente forte) tout en ayant un gradient suffisant pour ne pas favoriser l'infiltration. En général, le qanat se nourrit dans des zones alluviales à environ 50 mètres de profondeur, parfois jusqu'à 300 mètres. La longueur du canal varie en fonction de la profondeur de la source et de la pente du canal, de quelques mètres à plus de 50 Km (le plus long en Iran mesurant 120 Km de longueur), Les qanats sont construits par des muqannis (les constructeurs des *qanat*), dont le savoir se transmet de père en fils (11).



Photo 2 Vue aérienne d'une série de puits de plusieurs qanât en Iran (11).

III.4.2.2. Système du qanat en Chine

Les écrivains chinois supposent que la technique a été développée indépendamment en Chine continentale et a été amenée à "Turpan" pendant la première période de contrôle chinois sur la région pendant la dynastie Han (220 av.J.-C. – 206 après JC). Le "Karez" de "Turpan" a une origine perse datée au début du XIXe siècle. "Karez" sont construits manuellement, et la construction peut prendre jusqu'à huit ans. Les techniques et les outils sont demeurés presque inchangés sur 2.000 ans (11).

Les systèmes de "Karez" sont des systèmes d'irrigation très sensibles composés des axes verticaux, canaux souterrains, canaux de surface et petits réservoirs. La neige qui tombe au sommet des montagnes voisines est leur source d'eau principale. L'eau est recueillie près des puits verticaux et conduit par les canaux souterrains à l'oasis, où l'eau est recueillie pour l'irrigation.

Un "Karez" transporte l'eau principalement sous terre afin de réduire la perte d'eau par évaporation et éviter la pollution d'un part, et d'autre part le "Karez" n'exige aucune pompe, donc l'eau se déplace de la haute à la basse terre par l'effet de la pesanteur (11).

Un "puits mère" est situé en haut de gamme du "Karez" qui se coupe au niveau de la nappe phréatique. Le bassin de stockage qui est généralement utilisé pour réguler l'eau du "Karez" peut ne pas être inclus dans tous les systèmes de "Karez". Dans certains cas, le bassin de stockage peut ne pas être inclus. (Photo 3) montre des puits verticaux, le tunnel principal et un étang de stockage du système typique de "Karez" dans la région de "Turpan" respectivement (29).



(a)- vertical shafts

(b)- main tunnel

(c)- storage pond

Photo 3 Le système “Karez” dans la région de “Turpan” (chine) (29).

III.4.3. Le système de foggara en Afrique

III.4.3.1. Système de Khettara en Maroc

Au Maroc, à Marrakech, les premières “*Khettara*” sont mises en place au XII^e siècle) et que des “*Khettara*” ont été encore creusées jusqu’en 1950. Mais, dans la deuxième moitié du XX^e siècle, la modernisation de l’hydraulique publique et l’essor de forages privés ont fragilisé les “*Khettara*” et un grand nombre de galeries sont aujourd’hui hors service. Or, c’est précisément dans le Tafilalet que les oasisiens ont le mieux conservé ces ouvrages. La “*Khettara Lahloua*” est l’une des 250 “*Khettara*” encore en activité à ce jour, sur les 450 qui ont été recensées dans la Province du “*Tafilalet*” (région de Meknès, Maroc) (6).

Le principe de construction consiste à intercepter la nappe phréatique qui affleure au piémont d’un relief, en creusant une galerie presque horizontale de l’aval vers l’amont – jusqu’au « puits mère » – avec une pente inférieure à celle de la topographie afin d’amener par gravité l’eau des nappes souterraines à la surface pour irriguer les vergers et les jardins maraîchers (figure18).

Les puits successifs d’évacuation des déblais sont les seuls signes visibles de ces ouvrages ayant exigé des travaux considérables impliquant toute une collectivité. Ces puits servent ensuite d’accès pour l’entretien des galeries. Dans la zone oasisienne de Tafilalet, les galeries font 5 à 10 kilomètres de long et les puits, distants de 30 m environ, et ont des profondeurs allant de 2 à 18 mètres, la galerie en elle même fait 2 à 4 m de profondeur et moins de 50 cm de largeur. Le dernier puits creusé, dit puits de la source, est appelé le “*Jbaa*”. Chaque “*Khettara*” a un chef, responsable du partage de l’eau (6).

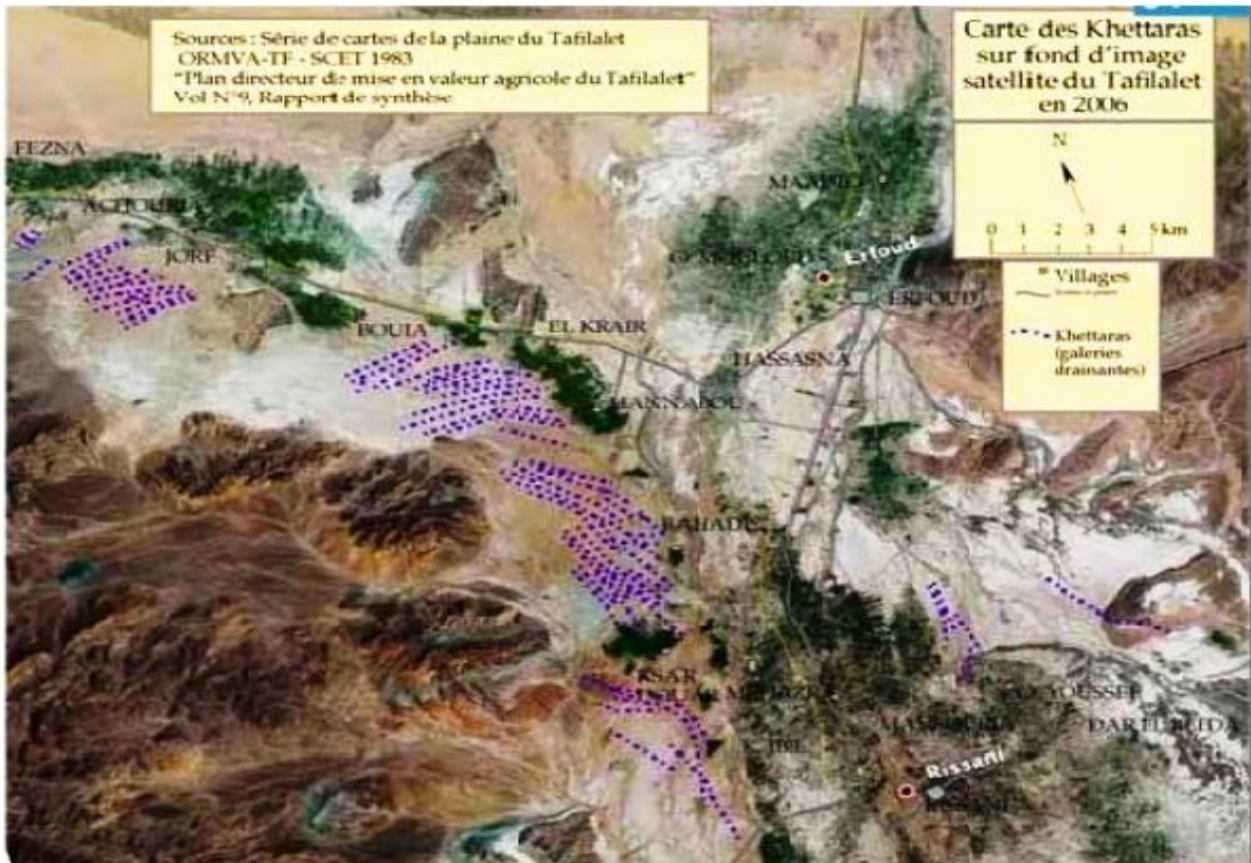


Figure 18 Carte des *Khetara* du Tafilalet sur fond d'image satellite (2006) (6).



Photo 4 Alignement des cônes d'éjection de plus d'une dizaine de galeries drainantes dans la région du Tafilalet – *Khetara* Lahlou ha (Maroc) (11).

III.4.3.2. Système de foggara en Algérie

Il semble difficile de déterminer avec précision la période d'apparition de la foggara. oasiens ont usé de leur savoir faire pour réaliser des techniques de captages des eaux souterraines.

En creusant des puits traditionnels par des moyens rudimentaires de 2 à 40 mètres de profondeurs selon les lieux. Grâce à une corde et un seau, les oasiens continuent à satisfaire les besoins en eau des “*ksours*” (cités des oasiens) et les besoins d’irrigation (30).

Cependant avec le temps, l’oasien a amélioré le rendement du puits en utilisant la roue (poulie), le contre poids (puits à balancier) et l’attraction animale jusqu’à la découverte des galeries drainantes dans le nord Iranien depuis 30 siècles (30).

La foggara aurait été introduite dans le Sahara algérien aux XI^{ème} XII^{ème} siècles par le roi El Mansour qui aurait creusé la première foggara à Tamantit (*Hennou*).

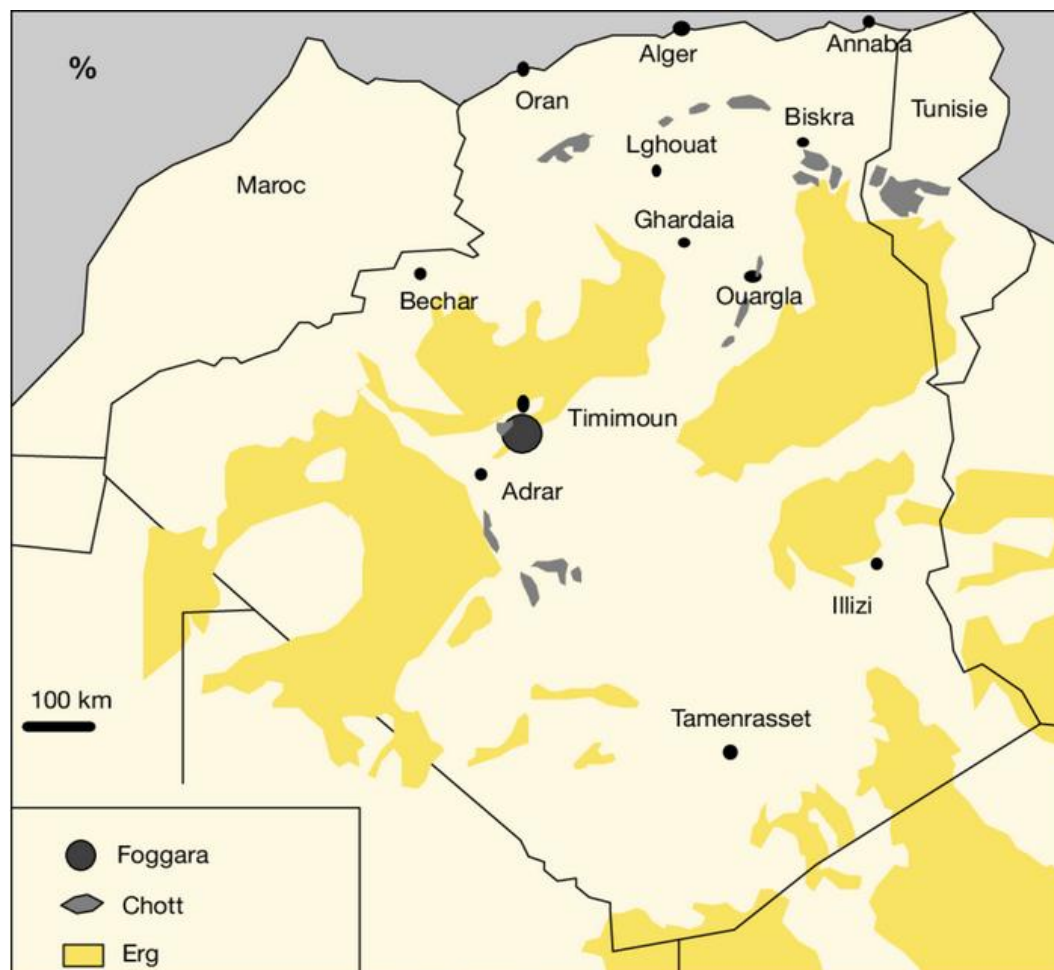


Figure 19 Localisation des foggaras algériennes (31).

Ensuite, les foggaras ont été développées dans le Touat et le Gourara par des tribus arabo-berbères du sud marocain (Mrabtine, Chorfa) (12).

Au Touat, la plupart des foggaras sont orientées dans le sens est-ouest : issues du plateau de Tademaït, ce véritable « *château d'eau* », elle suivant une ligne perpendiculaire, vers les palmeraies (12).

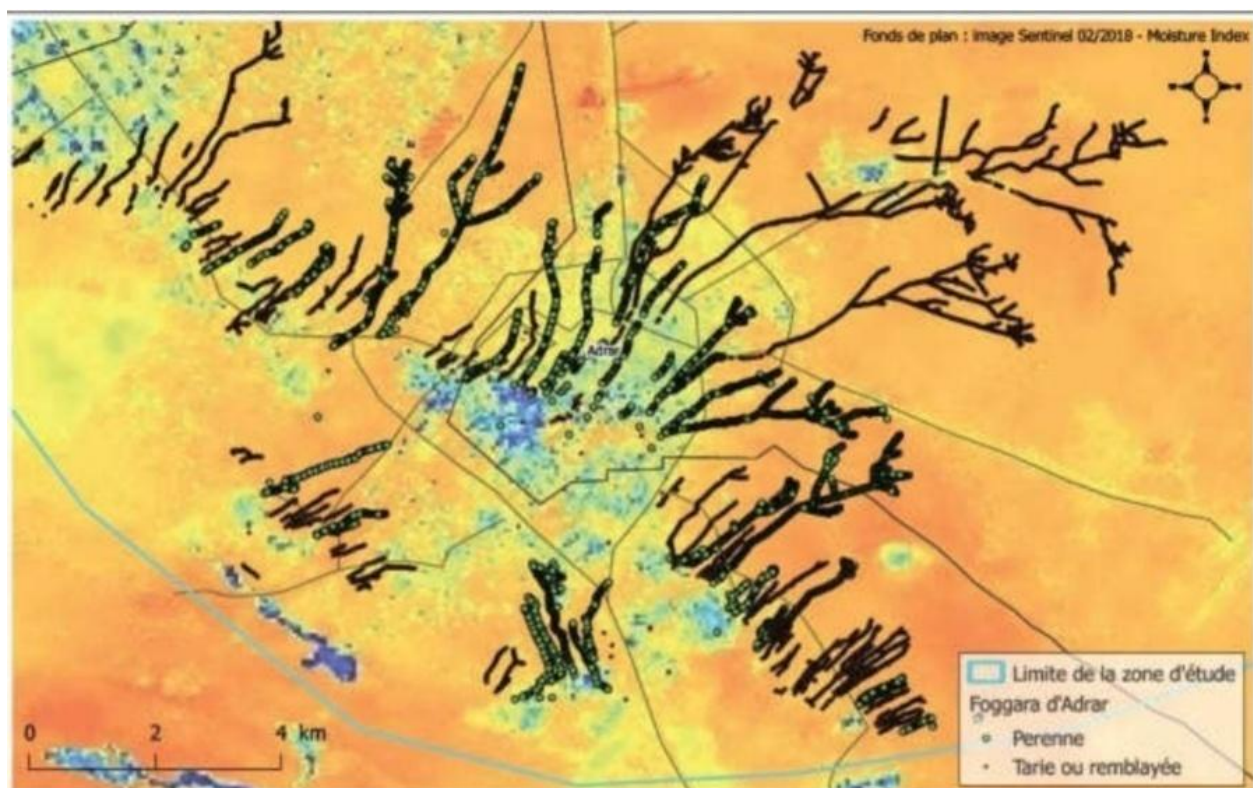


Figure 20 Carte de situation de système de foggara ville d'Adrar –CDN Adrar (11).

III.4.4. Les types de foggara

Les foggaras ne diffèrent que par leurs longueurs, ramifications et par région d'existence, dans le langage local on désigne une grande foggara par le vocable « *Kébira* » et une petite foggara par la foggara « *Séghira* », il n'existe aucune classification de construction ou de creusement (23).

a) La foggara de l'albien:

La foggara de l'albien, appelée « foggara classique », est la plus connue et la plus décrite par les auteurs. Ce type de foggara se localise dans le sud-ouest du Grand erg occidental, dans les régions du Touat, de Gourara et de Tidikelt, où le plateau de Tademaït constitue un véritable château d'eau. En effet, la nappe albienne profonde est rapprochée de la surface dans la périphérie du plateau grâce au creusement des galeries souterraines de la foggara; ces galeries pénètrent dans

la partie supérieure de la nappe de grès du continental intercalaire à la périphérie du plateau de Tademaït (31).

Ces galeries assurent un écoulement par gravité vers les dépressions basses où se localisent les palmeraies et les jardins. On dénombre dans les régions du Touat, de Gourara et du Tidikelt, environ 820 foggaras en service actuellement, dont le débit avoisine $2,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et une longueur totale de 2 000 km. Les oasis du Touat comptent 531 foggaras, dont 358 en activité. Les superficies irriguées par cette technique varient entre 7 000 ha et 3 000 ha, dont la production agricole est très variée: dattes, céréales, légumineuses, cultures maraîchers et fruitiers. Pour ce type de foggara, l'écoulement est continu toute l'année. Il y a interruption de l'écoulement dans le cas d'un effondrement d'une partie de la galerie ou d'un rabattement rapide, provoqué par l'installation d'un forage près de la foggara (31).

b) La foggara de l'erg :

C'est une foggara creusée près de l'erg, avec l'avancement des dunes de sables durant les siècles de l'existence de la foggara, il est très difficile de trouver le puits amont de la foggara recouvert de sable (23)

Le débit de la foggara de l'Erg demeure stationnaire durant toute l'année; son eau est moins salée et de bonne qualité. Ce type de foggara se localise dans les oasis d'Ouled-Saïd (Timimoune). Actuellement, il existe une centaine de foggaras de ce type, dont moins de 80 sont fonctionnelles. Il est très difficile de connaître la longueur exacte de ce type de foggara; les galeries et les puits sont perdus sous les dunes du Grand erg occidental. Même les vieux oasiens n'arrivent pas à localiser le puits mère et même une partie de la galerie. À titre d'exemple, nous avons suivi la seguia principale des foggaras "*d'IfliNbara*" et "*Outakou*" (de débit respectivement égaux à $0,8 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ et $0,3 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$) en partant de la "*kasria*" principale jusqu'à l'erg et nous n'avons pas pu trouver l'origine de ces foggaras. Ce type est fortement menacé par le phénomène d'ensablement (12).

La foggara de l'erg a ses caractéristiques propres, à savoir :

- ✓ La longueur ainsi que le nombre de puits sont difficiles à identifier.
- ✓ Il est difficile de trouver le puits mère de la foggara, vue l'impossibilité d'accéder à l'erg.
- ✓ Son eau est de bonne qualité.
- ✓ Son débit est stationnaire dans le temps.
- ✓ Les "*kasriates*", les seguias et les puits sont couverts par des dalles rocheuses pour les protéger de l'ensablement.

La galerie est en zigzag dans l'Erg afin de diminuer les pertes de vitesse de l'écoulement à l'arrivée de la "kasria" principale (12).

c) La foggara de jardin:

C'est une foggara localisée dans la palmeraie, elle est de petite longueur et qui capte les eaux d'infiltration et de drainage des autres foggaras situées en amont (23).

On a recensé sept foggaras de ce type dans la région de Timimoune, dont la longueur ne dépasse pas 1 km et les puits n'excèdent pas le nombre de 20. Il s'agit des foggaras d'Agalou (20 puits), Zahzaa (15 puits), Akraf, "Ksar el Kadim1", "Ksar el kadim2", Oukala (abandonnée) et Bouchouk (abandonnée). C'est une petite foggara dont la longueur de la galerie ne dépasse pas les 1,5 km. Elle appartient à une seule famille localisée en aval d'une ou de plusieurs grandes foggaras albiennes (ou classiques) pour capter les eaux de drainage, d'infiltration et d'irrigation en provenance des eaux d'irrigation de la palmeraie et des jardins. Même les eaux d'infiltration en provenance des seguias et des "madjens" de la foggara classique sont récupérées par cette foggara (12).

Ceci montre qu'il n'y a pas de pertes d'eau, toute la ressource est utilisée. Quant à la distribution et au partage de l'eau issue de ce type de foggara, il est simple et ne demande aucune mesure ou calcul. La foggara n'est même pas équipée d'une "kasria" (peigne), l'eau en provenance de la galerie passant directement dans le réservoir "le madjen". Une telle foggara est équipée d'une petite (12).

"Kasria" un orifice qui se bouche avec un caillou recouvert d'un tissu et d'argile pour minimiser les fuites (une sorte de vanne). Pour réussir une bonne opération d'irrigation, on obture l'orifice par le caillou jusqu'au remplissage "de madjen" dans un délai acceptable (12).

d) Foggara de source (El Ain):

À la différence de la foggara classique, la foggara d'El Ain capte les eaux de source naturelle. On a recensé 15 foggaras appelées les Aayounes (pluriel d'Ain), qui sont réparties entre les oasis de Moghrar (Naama), Béni Abbes (Bechar), Adrar, Béni Ounif (Bechar) et Bousseghoune. Les oasis d'Adrar sont connues par leurs foggaras de type albien, à l'exception de la foggara de Hennou, qui est une foggara de source qui n'est pas alimentée par la nappe du continental intercalaire comme les autres foggaras de l'oasis d'Adrar, mais par une source d'eau naturelle et pérenne. La foggara de "Hennou" demeure une particularité de la région. La découverte

de la grande source d'eau naturelle dans l'oasis de Béni-Abbes a été un événement pour les oasiens, qui l'ont reliée à leurs jardins par une galerie (31).

Malheureusement, cette foggara, qui a participé au développement des palmeraies de Béni Abbes, se trouve aujourd'hui abandonnée. Les palmeraies et les jardins de l'oasis de Boussemghoune dans la wilaya d'El Bayadh sont irrigués par neuf foggaras de source dont les eaux coulent toujours, mais les débits ont fortement diminué par rapport aux années quatre-vingt-dix. La source d'eau est desservie par une galerie souterraine qui permet à l'eau d'atteindre le jardin ou le "ksar" par gravité. Aujourd'hui, pour ce type de foggara, il existe un seul "madjen" collectif, contrairement aux foggaras classiques de type albien où chaque propriétaire possède son petit "madjen" (31).

e) **Foggara de La montagne :**

Ce type de foggara n'est plus en service dans le Sahara algérien. Les quelques foggaras qu'on a recensées se localisent dans la région de Bechar. La foggara de Djebel capte son eau à partir d'une nappe phréatique qui se recharge à partir des eaux de ruissellement en provenance des montagnes périphériques. Ce type de foggara a beaucoup de similitude avec la "Khettara" marocaine, la qanat iranienne et le "kariz" d'Afghanistan (12).

La caractéristique principale de la foggara d'Al Ain est la variation de son débit durant l'année. En effet, c'est durant la période des pluies que le débit enregistre les valeurs les plus élevées, à cause de la recharge de la nappe phréatique. L'assèchement des foggaras s'effectue en périodes chaudes. Qu'elles soient de type albien où chaque propriétaire possède son petit "madjen". Suite aux différentes périodes de sécheresses depuis plusieurs années et faute d'entretien, les trois foggaras de montagne qu'on a recensées dans l'oasis de Taghit se trouvent actuellement abandonnées. Ce type de foggara se localise au pied de Djebel Marhoma à Béni-Abbes. Elle est caractérisée par une longueur de la galerie qui ne dépasse pas les 1 000 m. Elle est large par rapport aux foggaras de l'Albien (12).

f) **La foggara des oueds :**

Ce type de foggara capte les eaux des oueds, comme le "falj" du sultanat d'Oman. La longueur de cette foggara, creusée dans les sables grossiers des alluvions de l'oued, peut atteindre 1 500 m. C'est une foggara temporaire qui fonctionne en période humide en captant les eaux de la nappe d'inferoflux. Pour ce type de foggaras, les puits mère ainsi que les puits d'aération se trouvent dans le lit de l'oued, où les types de sols rencontrés sont généralement argilo-limoneux et

parfois caillouteux. Elles sont vulnérables aux crues et à l'ensablement, les puits d'aération étant recouverts par les alluvions de l'oued lors des crues.

Aucune foggara de ce type ne fonctionne actuellement, elles sont abandonnées suite à leur effondrement et à l'assèchement des oueds. Ce type de foggara se localise dans les régions de Becher et Tamanrasset, dans les oasis de "Lahmar" (12).

III.4.5. Composants constituant le système de foggara

III.4.5.1. Système de Captage

Le captage de l'eau souterraine est assuré par une galerie de plusieurs kilomètres et de faible pente qui draine l'eau de la nappe à la surface libre. Cette galerie est équipée de plusieurs puits qui servent à l'entretien, et l'aération de la foggara (32).

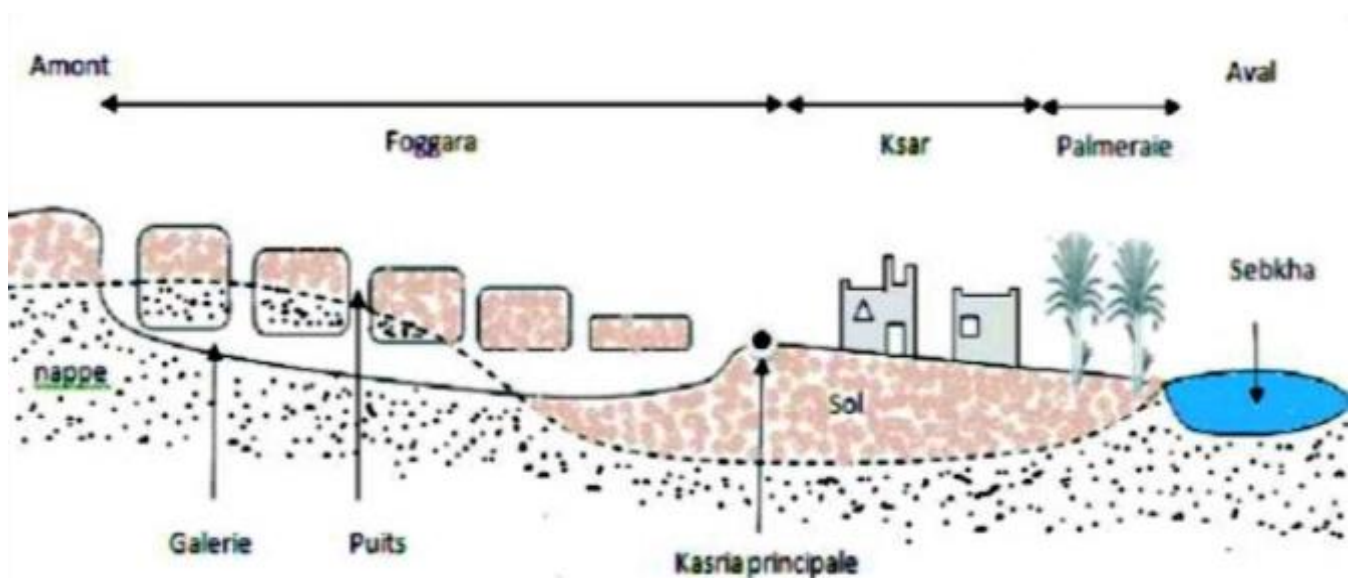


Figure 21 Principe de captage de l'eau (32).

a) Galerie : C'est l'élément moteur de la foggara. Elle est composée de deux parties :

La première partie (drainant) ou l'écoulement est à surface libre.

b) Puits : Chaque galerie est munie d'une succession de puits espacés de 10 à 20 mètres. Au début de la réalisation de la foggara, les puits jouaient le rôle d'évacuation des déblais et des remblais. Une fois en exploitation, ces puits sont utilisés comme accès pour le nettoyage et pour l'aération de la galerie (32).



Photo 5 Photos représentatives des puits de foggara.

III.4.5.2. Système de Distribution

La distribution de l'eau s'effectue juste à la sortie de la galerie la distribution est composée des éléments: "*Kasria*", "*segua*", "*madjen*" et "*Gammon*". Une fois l'eau arrive à la sortie de la galerie, elle sera répartie entre la "*Kasria*". Le cheminement de l'eau jusqu'au "*madjen*" s'effectue par l'intermédiaire des "*seguias*" (32).

a) *Kasria* :

Le "*Kasria*" présente un bassin triangulaire pour stocker l'eau avant d'être reporté entre les copropriétaires. Ce dernière est munie d'un tranquillisateur qui amortit et calme l'écoulement. On trouve plusieurs types de "*kasriates*" répartis dans palmeraie. En partant de le "*Kasria lekbira*" puis secondaire jusqu' à la multiple (32).



Photo 6 peigne "*kasria*" de répartition (6).

a) Madjen :

C'est un bassin de récupération et de régularisation qui reçoit l'eau directement des "kasriates" multiples. Il joue le rôle d'un château d'eau .il se trouve a la coute la plus élevée du jardin permettre a l'eau de s'écouler par gravite dans des seguias et d'irriguer l'ensemble du jardin. Il y'a le "madjen" en terre dont le fond est couvert d'une couche en agrile pour éviter l'infiltration, actuellement le "madjen" est réaménagé en ciment. La multiplication et la répartition des "madjen" dans les palmeraies crée une fraicheur pendant l'été grâce à l'humidité qu'ils dégagent durant la journée (32).



Photo 7 photos de "madjen" (32).

b) Seguias :

La seguia qui désigne un canal à ciel ouvert de section rectangulaire ou circulaire est construite généralement en terre. Les canaux drainent l'eau de la "kasria lekbira" jusqu'au "Gammon", les seguias se multiplient et prennent des directions de tout sens. Sans qu'elles se recourent entre elle. Les seguias qui travers le "ksar" sont équipées d'un trou de même forme qu'un seau d'eau afin de permettre a la population de "ksar" de s'alimenter en de la foggara (32).

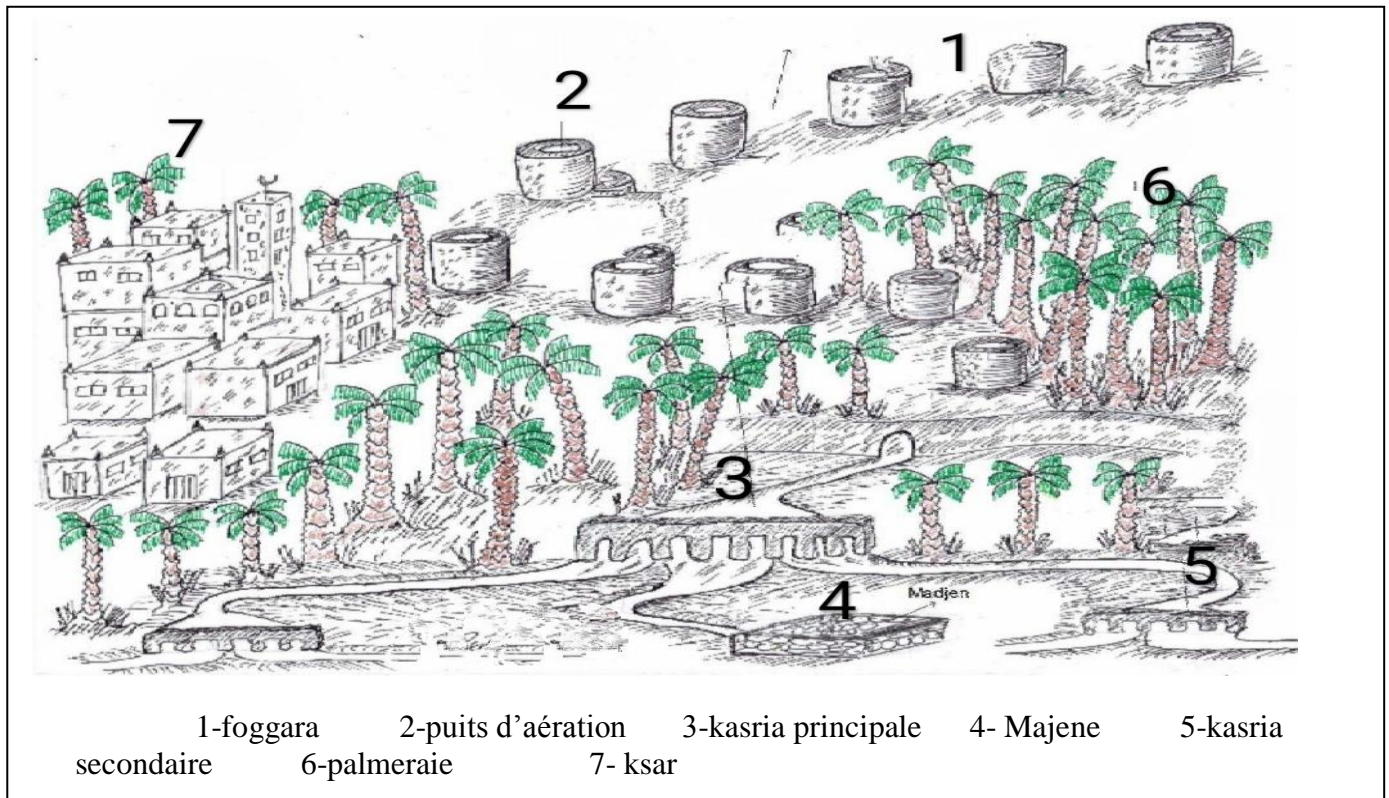


Figure 22 Schéma synoptique d'une foggara dans une oasis (30). Modifié par Babahadj et Boudihadj.

Ce système ingénieux et simple fait appel à une grande maîtrise des techniques effectuées par des spécialistes qualifiés et une force de travail colossale (main de l'homme) pour la conception et le suivi des travaux et encore une force plus grande pour entretenir la foggara afin de garder un débit constant et éviter sa dégradation qui est due à l'ensablement, le dessèchement, l'effondrement des galeries et de puits et la pollution des eaux (33).

III.4.6. Principe de fonctionnement de système foggara :

Le principe de la foggara consiste à capter l'eau d'une nappe souterraine située à une certaine distance de l'endroit à irriguer et la conduire par des canaux souterrains, en réalisant entre les deux points extrêmes une pente suffisante pour la circulation de l'eau. Comme la différence de niveau entre ces deux points est généralement peu importante, et que la distance à parcourir peut varier de 3 à 15 km (34).

Le niveau statique de la nappe se trouve au-dessus de la partie (D-F) dans la (figure23), l'eau pénètre dans la galerie et se déplace sous l'effet de la pression atmosphérique et du gradient hydraulique vers la partie (C-D), une stabilisation se fait dans cette partie au point d'intersection du niveau de la nappe et la pente de la galerie, l'eau à partir de ce point s'écoule par gravité vers la partie (B-C).

Au cours du temps le niveau de la nappe baisse, le point d'intersection se déplace en amont, de la zone (C-D) vers la zone (D-F), la charge hydraulique diminue et le débit de la foggara chute. Le tarissement de la foggara est atteint lorsque le débit dans le point B est nul, c'est-à-dire que le débit provenant de la partie (C-F) égal au débit perdu par infiltration et par évaporation dans la partie (B-C), ces pertes sont estimées de 10 à 20 % et de presque 50 % du débit de la foggara. Lorsque le point d'intersection du niveau de la nappe et de la galerie atteint le point F, à ce point la foggara est « mort » (23).

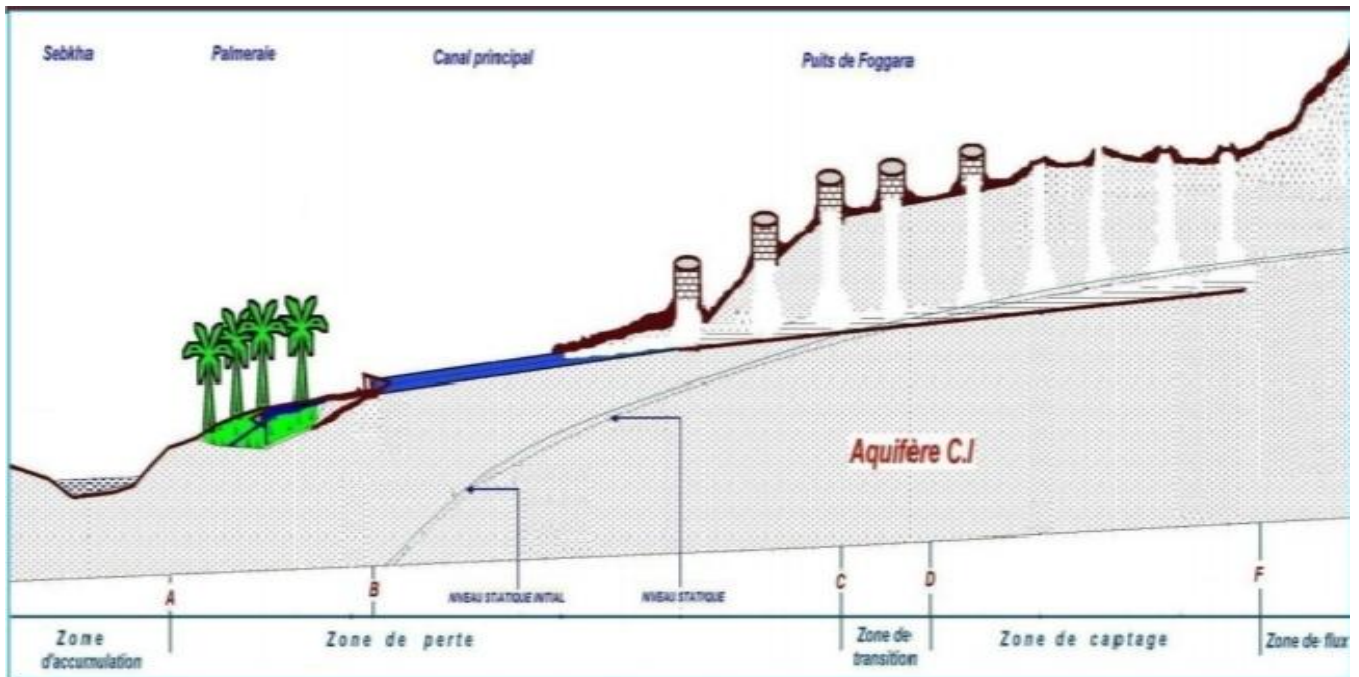


Figure 23 Schéma de fonctionnement d'une foggara (23).

III.4.7. Méthodes de la répartition des eaux de foggara

Une fois que l'eau arrive dans la "seguia". Elle doit être partagée entre les participants des foggaras. Et Il existe deux méthodes pour distribuer l'eau:

a) Par kasria :

L'eau d'une foggara est répartie par de nombreuses "kasria". La première qui reçoit la totalité du débit de la foggara est la "kasria lekbira" (le partiteur principal). Cette "kasria" principale répartit le débit de la foggara généralement en trois, quatre ou cinq grandes rigoles qui sont des "majras" au singulier "majra". A partir d'el-"kasria lekbira", les "majras" vont en éventail dans toutes les directions de la palmeraie (8).

Au bout de ces "mjaras" des "kasrias" secondaires répartissent les eaux dans d'autres "mjaras" plus petits ou des "seguias" (petites rigoles). Les "souagui" rejoignent les "madjens"

(bassins de récupération) qui se trouvent à l'endroit le plus haut du jardin et où l'eau s'accumule pendant vingt-quatre heures. Les vannes d'irrigation s'ouvrent en général, le matin de bonne heure en été, et dans la matinée en hiver. D'autres "kasrias" minimales se trouvent tout le long des différents parcours suivant la nécessité (8).

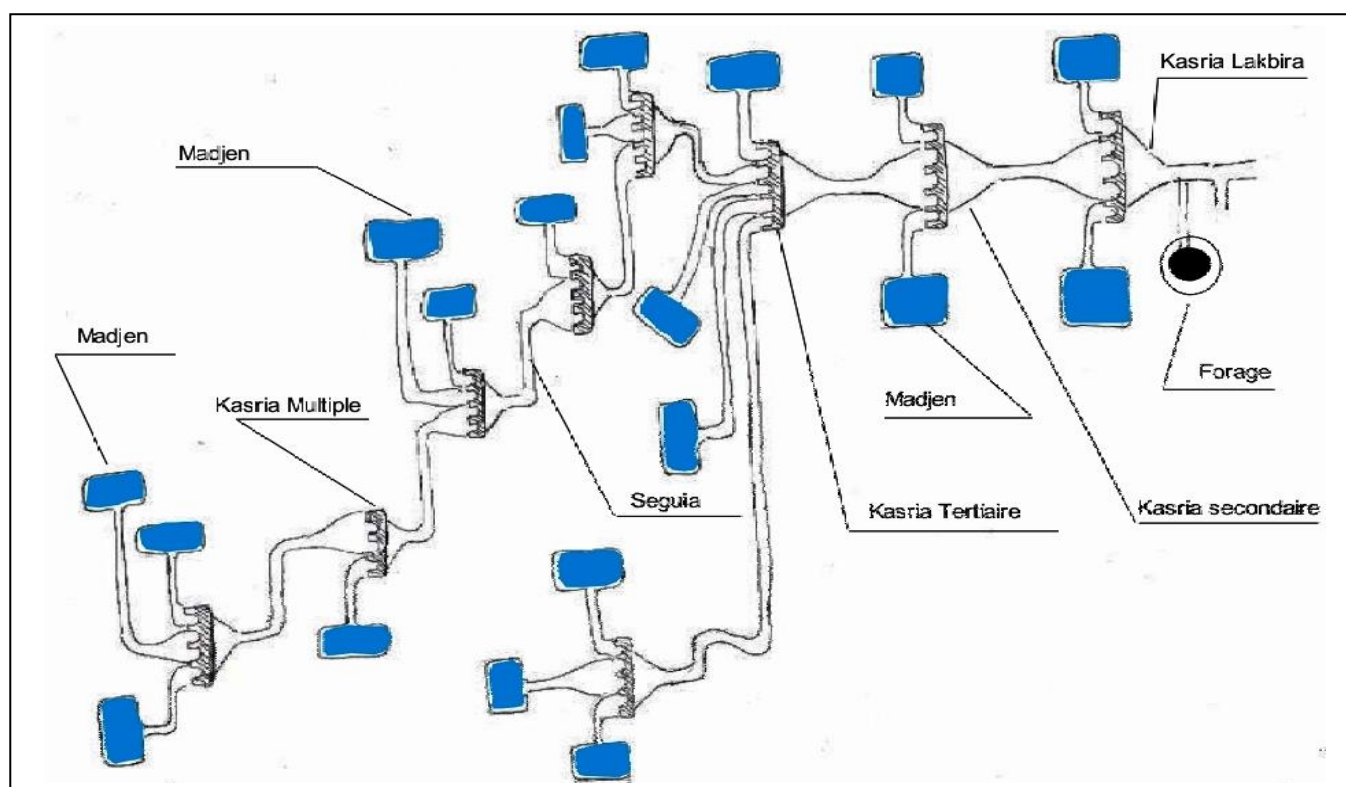


Figure 24 Système de la répartition par la *Kasria* (8).

Le dimensionnement des ouvertures des "kasriates" est fonction des parts d'eau de chaque propriétaire de la foggara. La quantité d'eau attribuée à chaque abonné dépend de sa contribution dans le creusement et l'entretien de la foggara. Cependant pour quantifier les parts d'eau, la population "ksourienne" a inventé un outil ancestral de mesure des débits appelé "Chekfa" (Photo9). C'est une plaque de cuivre à faible épaisseur qui varie entre 1 à 2 mm, il existe deux formes dans la région d'Adrar, recourbées en cylindre au Tidikelt, rectangulaires et planes au Touat et au Gourara. L'homme qui confectionne la "Chekfa" utilise une méthode particulière et précise. En premier lieu, il perce la plaque qui constituera la "Chekfa" à l'aide d'un outil en acier appelé elmatkoube. Il réalise ainsi une rangée de trous de différents diamètres. Ils correspondent à l'unité de débit ainsi qu'à des multiples et sous multiples de cette unité (6).

C'est ainsi que la "Habba" est l'unité principale du débit. Le technicien qui effectue les mesures de débits s'appelle le "Kial El Ma" (photo 8), il est considéré comme le génie de l'oasis (30).

Le principe de mesure des débits est basé sur la théorie des écoulements par les orifices. Il suffit de compter le nombre de trous ouverts une fois que le niveau est stabilisé. Pour obtenir un niveau stationnaire du plan d'eau, le "Kial el Ma", doit jouer sur la fermeture et l'ouverture des trous à l'aide de l'argile jusqu'à l'obtention d'un écoulement uniforme.

A partir de cet instant, le "Kial El Ma" compte le nombre de trous ouverts. L'inscription s'effectue directement dans le registre appelé le "Zemmam" qui doit rester uniquement chez lui. C'est un document confidentiel (30).



Photo 8 Emplacement de "Chekfa" pour la répartition d'eau des foggaras "Kiel al ma" (35).



Photo 9 Différentes formes de Chekfa (la mesure) (8).

b) La méthode par temps horaire (*nouba*)

Cette méthode de partage de l'eau, caractéristique des foggaras des sources, des montagnes et des oueds, est basée sur l'unité de temps. Le partage de l'eau s'effectue par le procédé horaire appelé *nouba*, c'est-à-dire tour à tour. Il est défini comme la durée de temps suffisante pour irriguer complètement le jardin (35).

Dans la région d'Adrar, le partage des eaux de la foggara de "*Hanou*", qui est une foggara horaire, s'effectue au tour à tour. Il n'y a pas de "*kasriates*" comme dans les autres foggaras avoisinantes. Des *seguias* relativement importantes partent directement d'un grand "*madjen*" (réservoir). La foggara est obstruée une à deux fois par jour pour permettre de reconstituer le niveau requis, puis l'eau est libérée pour un temps donné, proportionnel à la contribution financière versée par le bénéficiaire (35).

Conclusion

Le système de foggara se trouve dans plusieurs pays du monde en différents noms à savoir l'Iran, l'Égypte, la Chine, le Maroc, l'Algérie, et qui représente une série de puits reliés les uns aux autres par une galerie, ce système de captage et de drainage gravitaire permet de l'exploitation rationnelle des eaux de la nappe du CI.

Il existe deux méthodes de fonctionnement de système foggara soit par un partage en fonction du temps son nom local est "*nouba*" ou bien par la réalisation d'un ouvrage dit "*kasria*" en utilisant l'instrument principale qui est la *Chekfa*

*Chapitre IV Matériels et
Méthodes*

IV.1. Introduction

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la vulnérabilité à la pollution des eaux de foggara. Dans ce chapitre nous abordons la méthode DRASTIC adoptée à notre région d'étude, ainsi le logiciel utilisé Arc Gis.

IV.2. La pollution des eaux souterraines

IV.2.1. L'origine et source de pollution

L'activité humains engendre des rejets gazeux, liquides et solides dans le milieu (atmosphère, eaux de surface, sol, nappes) qui, directement (rejet) ou indirectement, vont affecter les eaux souterraines. Cette pollution provient de plusieurs sources d'origine anthropique, les principales sont :

- Urbaines (activités domestiques ; eaux d'égout, eaux de cuisine...etc.).
- Agricoles (engrais, pesticides...etc.).
- Industrielles (agroalimentaire, chimie-pharmacie, pétrochimie, raffinage...) (11).

La pollution de l'eau souterraine est provoquée par les rejets des activités domestiques et urbaines, agricoles ou industrielles. Les pollutions anthropiques peuvent être de diverses natures accidentelles, saisonnière ou chroniques, ponctuelles ou diffuses ou disperses toutes ces pollutions sont susceptibles de dégrader les ressources en eau (20).

IV.2.2. Type de pollution

Les polluants peuvent être classés en trois grandes catégories selon leur nature :

Tableau 11 Les types de pollution

Type des pollutions	Définition
Pollution physique	c'est une pollution qui se traduit par la présence des particules de taille et de matière très variés dans le milieu (sol, air et l'eau).
Pollution chimique	La pollution chimique résulte de la libération de certaines substances minérales toxiques dans l'environnement, que rejetées par l'activité humaine, ce type de pollution regroupe les solvants, les métaux (Zn, Pb, Cd,...etc.), les hydrocarbures aromatiques etc.
Pollution microbiologique (micro-organismes)	Elle provient de l'agriculture (lisiers), des hôpitaux et même de la vie domestique (ordures ménagères). Elle peut introduire dans l'eau comme les bactéries, les virus, les parasites et les champignons, on parle ainsi de la pollution bactérienne, viral où parasitaire.

IV.3. La vulnérabilité des eaux souterraines

Le terme « vulnérabilité des eaux souterraines introduit en hydrogéologie par Margat en 1968. La vulnérabilité est une propriété intrinsèque des aquifères qui dépend de la sensibilité aux différents facteurs physiques déterminant la mesure où elles sont, dans les conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. De plus, elle décrit la vitesse de propagation d'un polluant vers et dans la nappe d'eau souterraine et caractérise la capacité de «protection» d'une nappe vis-à-vis d'une pollution. Celle-ci est, en premier lieu, liée à l'autoépuration naturelle du sol. En second lieu, elle est favorisée par la circulation de l'eau (20).

La mobilité et la persistance des substances dans le sous-sol sont très variées selon leur solubilité, leur facilité à être biodégradées, etc. Il est possible d'évaluer la vulnérabilité des aquifères à l'échelle régionale aussi bien que vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination à l'échelle locale. Alors, La vulnérabilité dépend du type de nappe, libre ou captive, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libres sont les plus vulnérables. Les nappes captives en revanche sont mieux protégées par les couches imperméables qui les couvrent. Leur alimentation en eau superficielle est plus circonscrite, donc plus aisée à protéger (20).

Cette vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis à la pollution demande la prise en compte de trois milieux bien définis: le sol, la zone non saturée et la zone saturée. A ces trois milieux peut se rajouter l'infiltration qui rentre en compte dans la migration des polluants (20).

IV.3.1. Types de vulnérabilité

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique :

a) La vulnérabilité intrinsèque

est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines, Cette définition considère que la substance est appliquée directement en surface et voyage au même rythme que l'eau, Le type de contaminant, la vitesse de migration et la dégradation des contaminants ne sont alors pas considérés (36).

b) La vulnérabilité spécifique

Utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

La vulnérabilité intrinsèque peut-être considérée comme invariante dans le temps alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux sources de pollution) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. Pour tenir compte des objectifs de planification à long terme de la gestion de l'eau dans la nappe alluviale de Tebessa-Morsot, nous nous sommes prioritairement intéressés à la vulnérabilité intrinsèque (36).

IV.4. Les Méthodes des vulnérabilités

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimique et biologique dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité et Desargues.

Dans cette étude est basée sur la méthode DRASTIC.

IV.4.1. Description la méthode DRASTIC :

La méthode DRASTIC, développée par les services de l'Agence américaine de protection de l'environnement USEPA, c'est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque verticale à la pollution des aquifères par systèmes paramétriques. Le principe commun de ces systèmes

consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité (37).

En général, l'une des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines les plus utilisées est la technique de cartographie de vulnérabilité DRASTIC. Elle peut être utilisée à la description composite de tous les principaux facteurs géologiques et hydrogéologiques qui influencent et contrôlent le mouvement des eaux souterraines, dans, à travers et hors de la zone (11).

La méthode DRASTIC est basée sur l'estimation de sept paramètres importants relatifs à la recharge, au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée de l'aquifère :

- **[D]** Profondeur de la surface de la nappe.
- **[R]** La Recharge nette.
- **[A]** Nature lithologique de l'Aquifère.
- **[S]** Sol (granulométrie et faciès).
- **[T]** Topographie des terrains.
- **[I]** Impact de la zone non saturée (lithologie et épaisseur).
- **[C]** Conductivité hydraulique (perméabilité) (38).

La figure ci-dessous illustre la méthode DRASTIC, ses paramètres et leur poids.

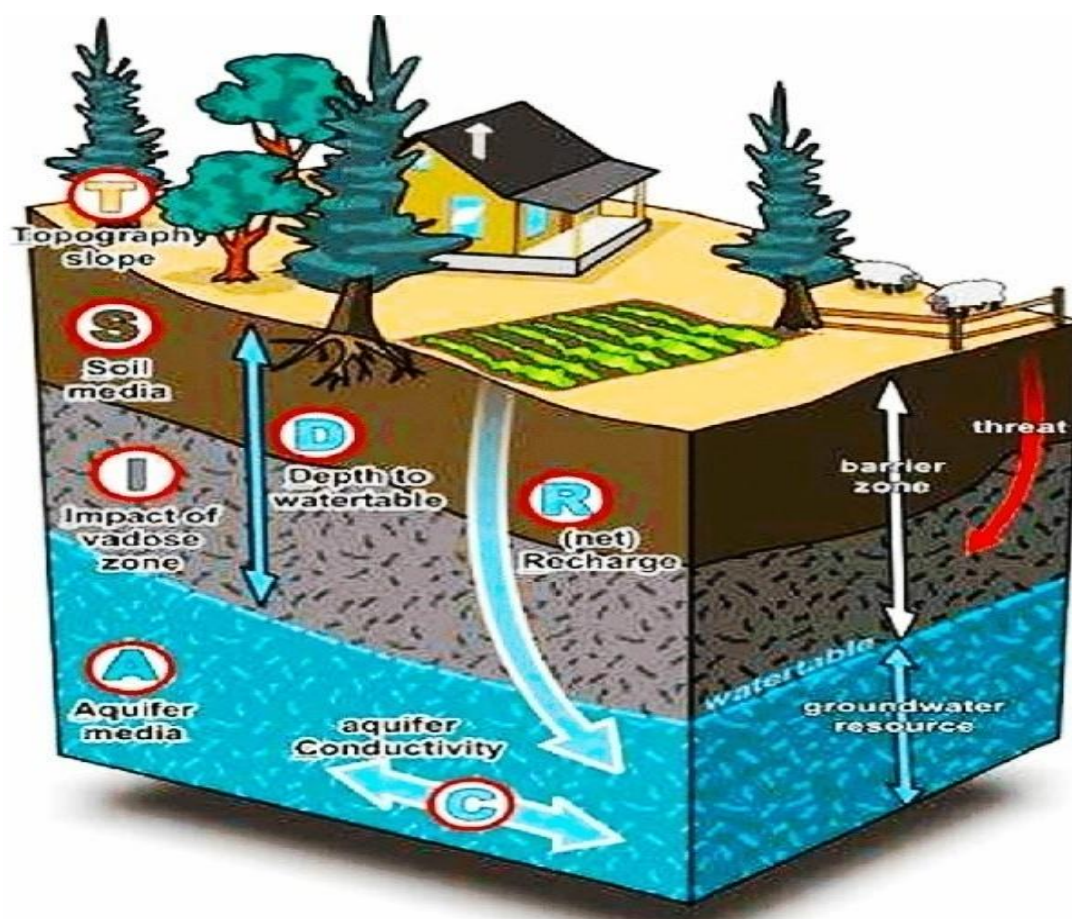


Figure 25 Illustration des paramètres DRASTIC (1).

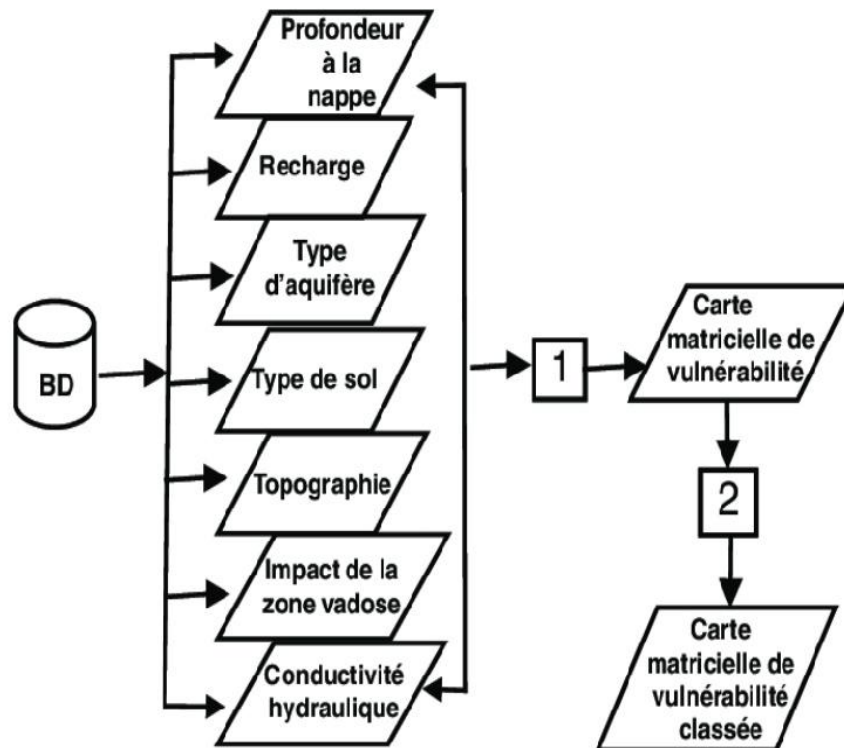
Une valeur numérique appelée poids paramétrique, comprise entre 1 et 5, est attribuée à chaque paramètre, reflétant son degré d'influence. Chaque paramètre est classé en classes associées à des cotes variant de 1 à 10. La plus petite cote représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination (37).

Tableau 12 Paramètre et poids de la méthode DRASTIC (39).

Symbole	Paramètre	Poids
D	Profondeur de la surface de la nappe	5
R	La Recharge nette	4
A	Nature lithologique de l'Aquifère	3
S	Sol (granulométrie et faciès)	2
T	Topographie des terrains	1
I	Impact de la zone non saturée (lithologie et épaisseur)	5
C	Conductivité hydraulique	3

Pour chacun des sept paramètres considérés par la méthode DRASTIC, on réalise une carte thématique sur laquelle, sont délimitées des zones en fonction des intervalles établis par le système de cotation DRASTIC.

La superposition des sept cartes thématiques ainsi obtenues, donnera la carte finale, celle de la vulnérabilité, le tracé des cartes peut se faire manuellement ou, par ordinateur en utilisant les systèmes d'information géographique (SIG).



[1]-Calcul des valeurs de vulnérabilité pixel par pixel selon la formule de l'indice DRASTIC.

[2]-Classification des pixels en fonction des classes DRASTIC.

Figure 26 Organigramme présentant l'intégration des sept paramètres retenus de la méthode DRASTIC (40).

IV.4.2. Principe de la méthode DRASTIC

L'évaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC repose sur trois hypothèses fondamentales :

- 1) Les contaminants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère par l'infiltration efficace, soit verticalement.
- 2) La source de contamination potentielle est localisée en surface du sol.
- 3) Le type de contaminant n'intervient pas dans la définition de la vulnérabilité, c'est-à-dire que le contaminant est considéré comme possédant la même mobilité que l'eau.

La défauts de cette méthode résident dans le fait qu'elle ne prend pas en considération la présence des facteurs, des cours d'eau permanents ou temporaires, de la karstification et le type de végétation développée en surface (38).

IV.4.3. Description des Paramètres DRASTIC et vulnérabilité de l'aquifère :

IV.4.3.1. Profondeur de la nappe (D) :

La profondeur du niveau d'eau dans la nappe est un paramètre important, il détermine l'épaisseur des matériaux de la zone d'aération à travers laquelle un contaminant percole avant d'atteindre le niveau piézométrique. Généralement, la capacité d'atténuation augmente avec la profondeur du plan d'eau, le poids attribué est de l'ordre de cinq (5) et le système de cotation, affecté à cette profondeur, est représenté au (tableau 13) (41).

Dans le cas d'une nappe libre, la profondeur de l'eau représente la tranche de sol entre la couche végétale et la surface piézométrique libre de la nappe.

Dans le cas d'une nappe captive, la profondeur de l'eau représente la tranche de sol entre la couche végétale et le toit de l'aquifère (15).

Tableau 13 Cote et poids de profondeur de la nappe phréatique(D) (3).

Profondeur (m)	Cote	Poids
Entre 0 et 1.5	10	5
1.5 –4.5	9	
4.5–9	7	
9-15	5	
15-23	3	
23-30	2	
Plus de 30	1	

IV.4.3.2. Recharge efficace (R)

La recharge de la nappe provient principalement de l'infiltration directe des eaux de précipitation à travers les sédiments grossiers des bordures et des eaux de ruissellements, où des crues dans les lits des affluents de l'oued principal (36).

La recharge correspond à la quantité d'eau franchissant la surface du sol pour renouveler les stocks d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain dans les formations aquifères. L'observation de la carte de recharge montre que l'infiltration est la même sur toute la plaine de Guelma. Le calcul du bilan hydrique a donné une valeur moyenne de l'infiltration

efficace de 80,33 mm. La méthode DRASTIC attribue un poids de 4 à la recharge efficace pour l'intervalle se situant à plus de 25mm. Ce paramètre est reporté au (tableau 14) (41).

Tableau 14 Paramètre de la recharge nette (RN) (39).

Intervalle (mm/an)	Cote	Poids
0-50	1	4
50-100	3	
100-140	5	
140-180	6	
180-215	7	
180-215	8	
>215	9	

IV.4.3.3. Nature du milieu aquifère

Le milieu aquifère s'identifie par les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, qui sont soit poreux, fracturé ou karstique, elles sont fondamentaux pour déterminer le débit des eaux souterraines et par conséquent la dispersion des contaminants. En général, le milieu grossier (saturé ou insaturé) s'est vu attribuer une valeur de notation élevée par rapport aux types de supports fins et il se réfère aux propriétés du matériau de la zone saturée, qui contrôle les processus d'atténuation des polluants. Une haute perméabilité permet à plus d'eau et à plus de contaminants de se pénétrer dans l'aquifère; et par conséquent à entraîner un taux élevé en matière de vulnérabilité (tableau 15) (11).

Tableau 15 Paramètre du milieu aquifère (A) (39).

Nature du milieu aquifère	Cote	Poids
Schiste massif	1-3	3
Roches métamorphiques/ignées	2-5	
Roches métamorphiques/ignées altérées	3-5	
Lits de grés, calcaire et argile schisteuse	5-9	
Grés massif	4-9	
Calcaire massif	4-9	
Sable et gravier	6-9	
Basalte	2-10	
Calcaire karstique	9-10	

IV.4.3.4. Milieu du sol :

La nature du sol a un impact considérable sur la contamination des nappes phréatiques par les polluants provenant de la surface. Elle peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation de polluant vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.

Les informations recueillies à partir des études et cartes pédologiques ont permis de définir la nature du sol (42). La méthode DRASTIC attribue à ce paramètre un poids de 2. Les valeurs indiciaires ont été déterminées selon les classes signalées dans le (tableau 16).

Tableau 16 Paramètre de nature du sol (s) (39).

Nature du sol	Cote	Poids
Sol mince	10	2
Gravier	10	
Sable	9	
Argile fissurée	7	
Terre grasse sableuse	6	
Terre grasse	5	
Terre limoneuse	4	
Terre argileuse	3	
Argile non fissurée	1	

IV.4.3.5. Topographie :

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode «DRASTIC» par les valeurs de la pente en pourcentage (%), ce paramètre traduit l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe et reflète donc la capacité de ces eaux à introduire des agents polluants vers la nappe. En effet, Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. En revanche, une zone à faible pente a une tendance à retenir l'eau pendant une longue période, cela permet un plus grand potentiel de migration des contaminants (42). La pente du terrain se voit attribuer un poids très faible (1) par rapport à l'autre paramètre. Le système de cotation attribué à la topographie est présent au tableau suivant :

Tableau 17 Paramètre de la Topographie (T) (39).

Intervalle (%)	Cote	Poids
0-2	10	1
2-6	9	
6-12	5	
12-18	3	
Plus de 18	1	

IV.4.3.6. Impact de la zone vadose :

L'impact de la zone non saturée (zone d'aération) est considéré comme étant un paramètre très important par la méthode DRASTIC, avec un poids de 5, car la nature et l'épaisseur de la partie comprise entre la surface du sol et l'aquifère, contrôlent dans une certaine mesure la vulnérabilité à la pollution des réservoirs (41).

Le (tableau18) donne les indices correspondants :

Tableau 18 Paramètre de l'impact de la zone vadose (I) (39).

Nature de la zone vadose	Cote	Poids
Couche imperméable	1	5
Silt/argile	2 à 6	
Shale	2 à 5	
Calcaire	2 à 7	
Grés	4 à 8	
Lits de calcaire grés et sable	4 à 8	
Sable et gravier avec passage silt et argile	4 à 8	
Roche métamorphiques/ignées	2 à 8	
Sable et graviers	6 à 9	
Basalte	2 à 10	
Calcaire karstique	8 à 10	

IV.4.3.7. Conductivité hydraulique :

La conductivité hydraulique de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de migration des polluants et leur dispersion dans la nappe du point d'injection, à la surface, jusqu'à la zone saturée et, par conséquent, leurs concentrations dans la nappe aquifère. Plus ce paramètre est important, plus le transfert des polluants est rapide (42).

La méthode DRASTIC attribue un poids moyen de 3 à la perméabilité. Les valeurs de l'indice pour ce paramètre sont reportées dans le (tableau19).

Tableau 19 Paramètre de conductivité hydraulique (C) (39).

Conductivité hydraulique (m/j)	Cote	Poids
0.04-4	1	3
4-12	2	
12-29	4	
29-41	6	
41-82	8	
Plus de 82	10	

IV.4.4. Indice de vulnérabilité DRASTIC (ID)

L'indice de vulnérabilité DRASTIC est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$ID = Dp * Dc + Rp * Rc + Ap * Ac + Sp * Sc + Tp * Tc + Ip * Ic + Cp * Cc$$

D, R, A, S, T, I, C : les sept paramètres de la méthode DRASTIC.

P: étant le poids du paramètre.

C: la cote associée (15).

Tableau 20 Critère de la vulnérabilité à la pollution de la méthode DRASTIC (39).

Classe de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	<100
Faible	101-125
Moyenne	126-150
Forte	151-200
Très forte	>200

IV.5. Méthode de travail

IV.5.1. Présentation de logiciel Arc Gis :

Arc Gis est un système d'information géographique développé par la société ESRI (Environmental Systems Research Institute). Est un logiciel permettant d'exploiter un Système d'Information Géographique(SIG) (22).

Un logiciel SIG permet l'acquisition, le stockage, la mise jour, la manipulation, et le traitement de données géographique. De plus, il permet de faire de la cartographie et de l'analyse spatiale de façon précise en fonction de l'échelle désirée.

Arc Gis se décline en trois licences aux fonctionnalités croissantes : ArcView, Arc Editor et Arc Info (22).

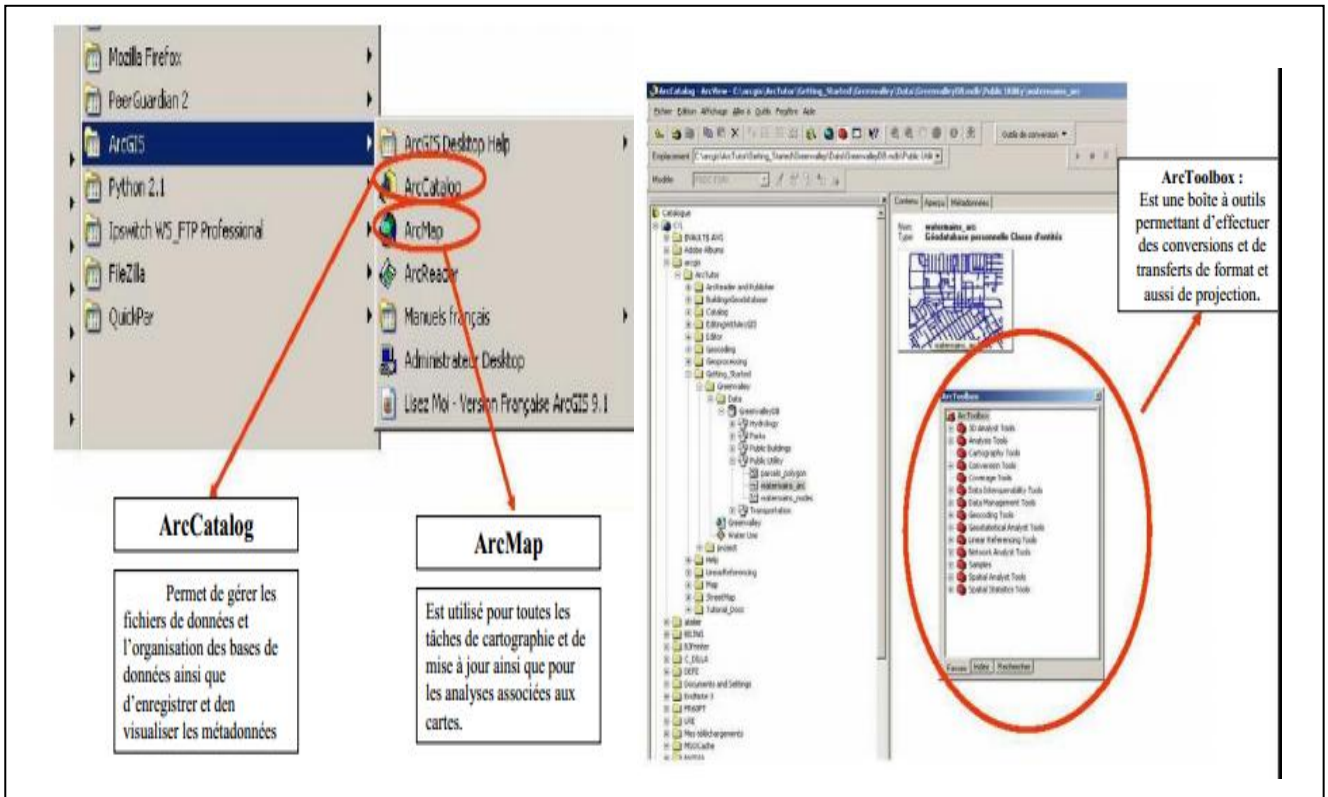


Figure 27 Les applications d'Arc Gis (43).

A l'aide de ces trois applications vous pouvez effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données et le géo- traitement...ect.

IV.5.1.1. Présentation de l'interface : Arc Map

Arc Map montre, questionne, édite, crée ou analyse des données, sous forme de tables ou de cartes. Arc Map facilite la disposition des cartes lors de la mise en page pour l'impression, l'intégration dans d'autres documents et l'édition de documents électroniques. L'interface du logiciel présentée ci-dessous (22).

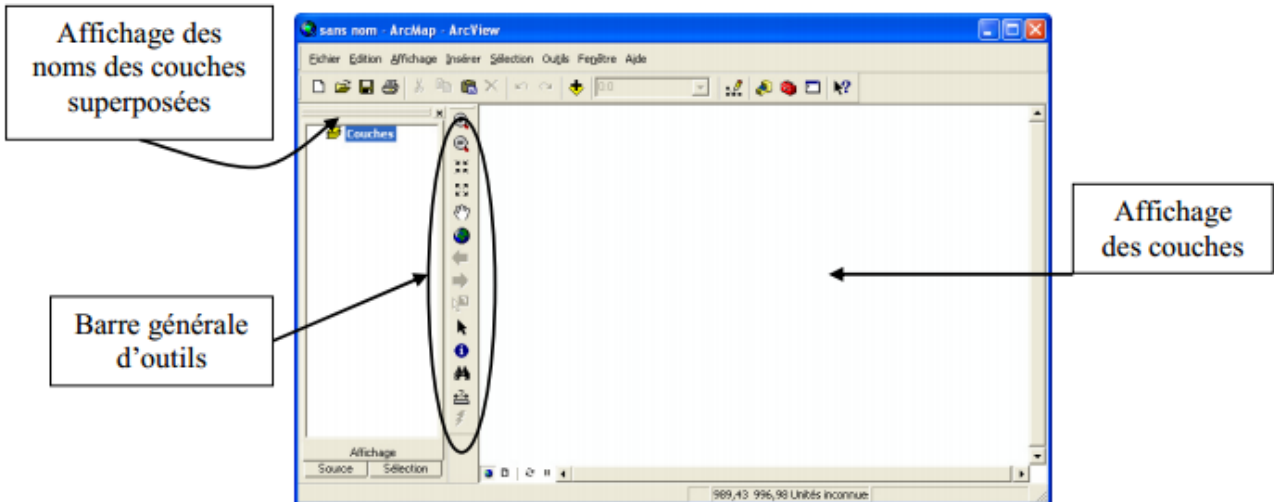


Figure 28 L'interface d'Arc Gis (43).

La barre générale d'outils se décline comme suit :



Figure 29 La barre d'outils d'Arc Gis (43).

La barre d'outils renferme les outils de navigation sur les données graphiques des couches, ainsi que les outils d'affichage rapide de données sémantiques (attributaires) liées aux entités graphiques (22).

IV.5.1.2. Présentation de l'interface : Arc Catalog

Arc Catalog vous permet de passer en revue, organiser, distribuer et modifier les éléments de propriétés des données géographiques. L'interface permet d'employer des méthodes graphiques ou textuelles pour passer en revue, contrôler ou modifier l'ensemble des données (22).

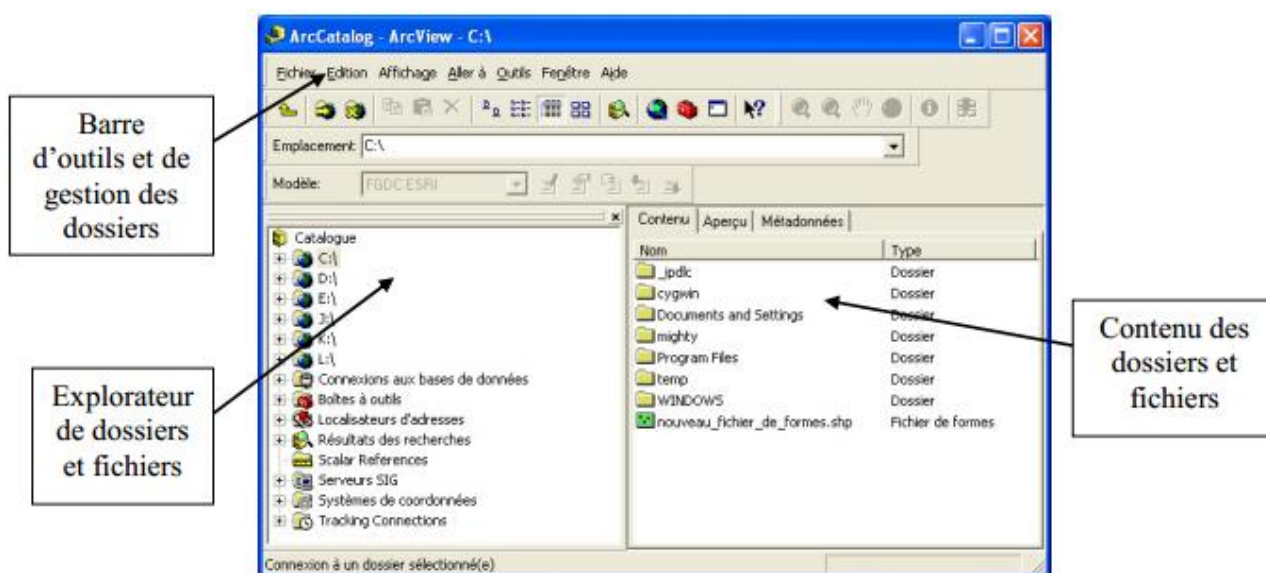


Figure 30 L'interface Arc Catalog (43).

C'est idéalement dans cette interface que l'on exécutera les actions les plus courantes listées ci-dessous:

- Créer des nouvelles données (couche sous shapefiles, géodatabases...).
- Attribuer un système de coordonnées lorsqu'il n'est pas reconnu par le logiciel, ou non attribué.
- Supprimer une couche (soit l'ensemble des fichiers correspondants au shapefile) définitivement de l'ordinateur.

IV.5.1.3. Présentation de l'interface : Arc Toolbox

Arc Toolbox est le module dans Arc Gis 9.x (ou l'application dans Arc Gis 8.x) qui permet d'accéder à toutes les fonctionnalités puissantes de traitement et d'analyse. La boîte à outils fournit un ensemble très riche de fonctions de géotraitement. Il convertit aussi les formats de données pour l'importation ou l'exportation de fichiers, ainsi que les changements de projection (22).

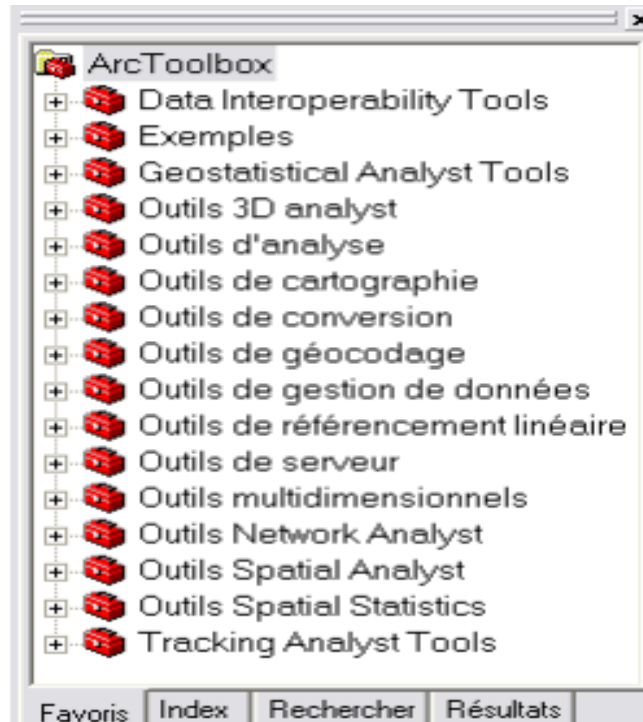


Figure 31 L'interface Arc Toolbox (43).

L'ensemble des outils présents dans chaque boîte à outil n'est pas obligatoirement accessible. Certains nécessitent l'achat d'extensions supplémentaires.

Généralement, en cliquant sur un outil, une fenêtre correspondant à l'outil s'ouvre, permettant de paramétrer ce dernier. Il est possible de créer ses propres scripts, que ce soit au travers de python (livré avec le logiciel) ou en transformant un ModelBuilder.

***Attention:** avant d'utiliser un outil, consultez l'aide, qui est de mieux en mieux faite selon les versions et qui explique clairement le paramétrage des outils (22).

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit la méthode de la vulnérabilité à la pollution des eaux de foggara DRASTIC. Cette méthode est basée sur la détermination des cartes thématiques de sept paramètres à savoir Profondeur, recharge nette, types d'aquifère, type de sol, la topographie, impacte de zone vadose et la conductivité hydraulique. Cette base des données est traitée par un logiciel de simulation s'appelle Arc Gis.

*Chapitre V Résultats et
Discussions*

V.1. Interprétations des paramètres et réalisation des cartes thématiques par la méthode

DRASTIC

V.1.1. Profondeur de la nappe

La profondeur de la nappe est un paramètre important, qui constitue un facteur déterminant de la vulnérabilité. Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met de temps à atteindre la surface piézométrique (1).

La répartition des indices pour ce paramètre dans la région d'Adrar est reportée sur le (tableau 21).

Tableau 21 Classes et pondération du paramètres de profondeur de nappe.

Intervalle (m)	cote	poids	D profondeur
0-1,5	10	5	50
1,5-4,5	9		45
4,5-9	7		35
9-15	5		25
15-23	3		15

La carte thématique du paramètre de profondeur (figure 32) montre que les plus faibles indices sont localisés dans le Sud Ouest de la région d'étude pour une valeur compris entre 15 et 25. En revanche, les indices les plus importants sont situés dans l'Est d'Adrar avec une valeur de 50. Les autres indices (25- 45) sont repartis dans les autres régions.

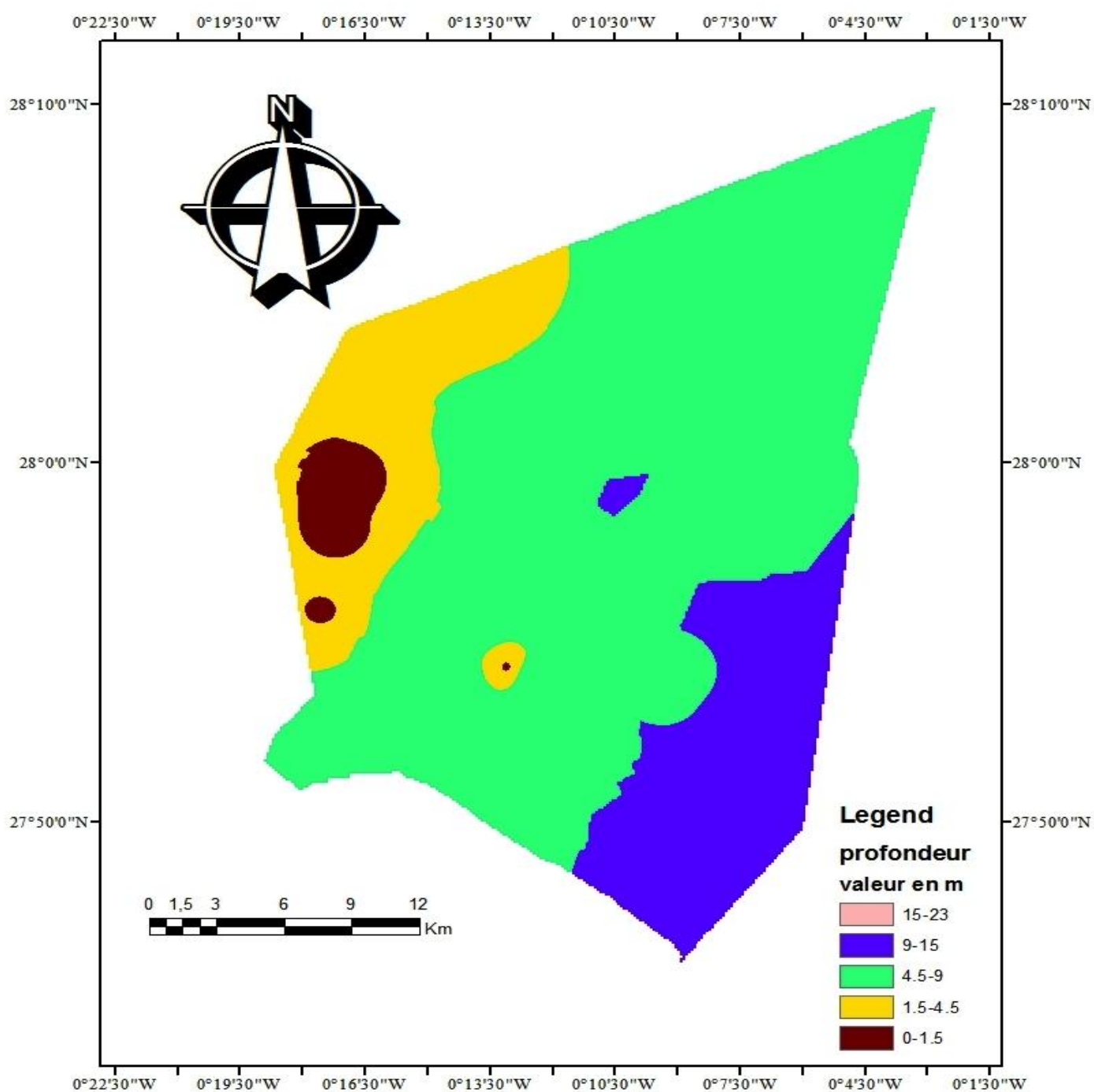


Figure 32 Carte des indices de la profondeur de la nappe CI.

V.1.2 Recharge nette

Ce paramètre Elle concerne la quantité d'eau qui traverse la surface du sol pour renouveler les réserves. Étant donné que Notre région d'étude fait partie des zones arides qui sont caractérisées par l'absence totale de la précipitation durant toute l'année, Les résultats de ce paramètre sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 22 Classes et pondération du paramètre de recharge nette

Intervalle (mm/an)	Cote	Poids	D recharge
0-50	1	4	4

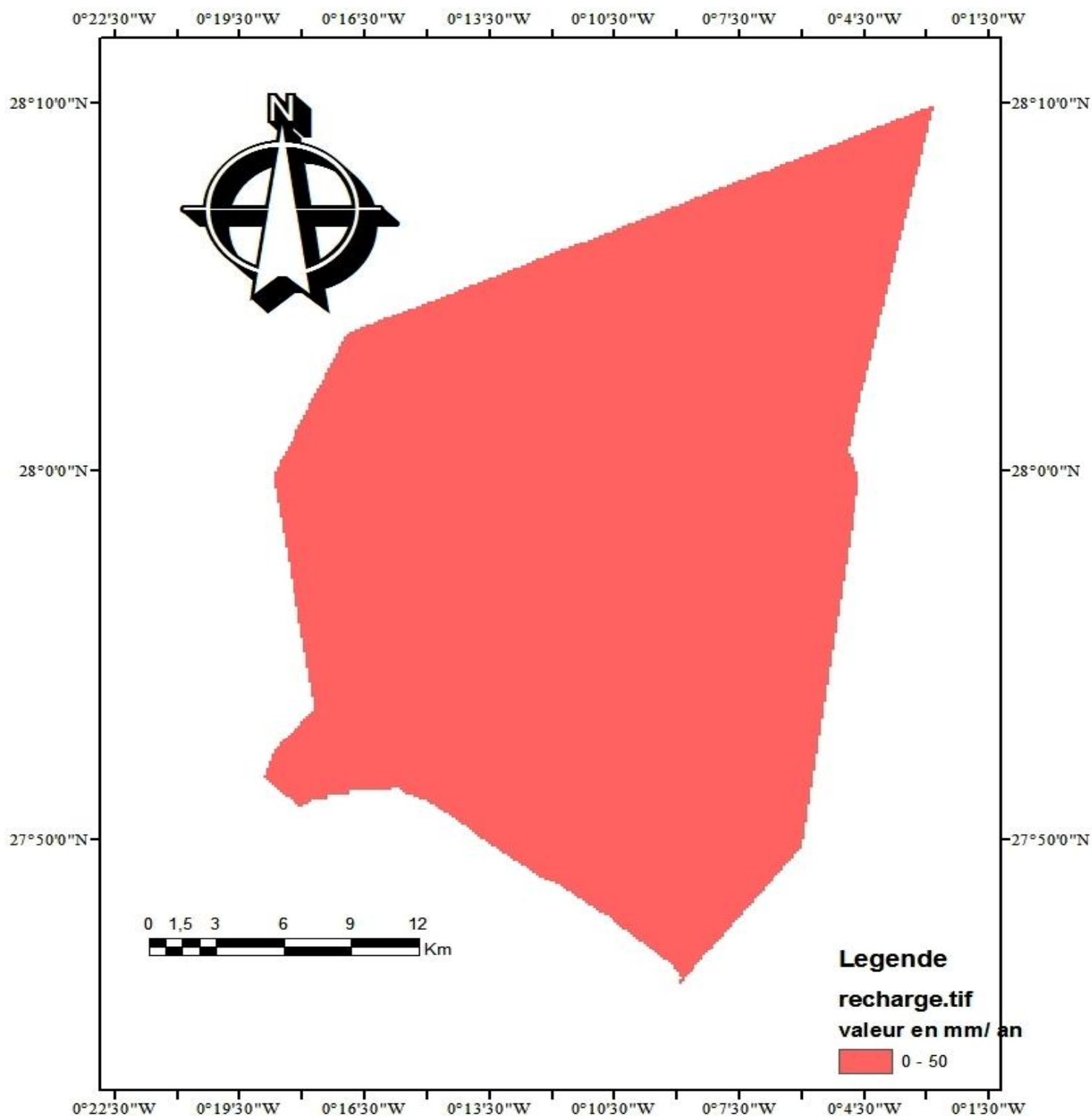


Figure 33 Carte thématique de paramètre de recharge nette CI.

À travers cette carte (figure 33) on peut constater que la valeur de ce paramètre est inférieure à 50 mm/an, dont l'indice de recharge nette est de l'ordre 4.

V.1.3. Nature du milieu aquifère

Ce paramètre désigne la lithologie de l'aquifère. Son identification a été basée sur les logs des forages et des puits creusés pour le captage de la nappe, Ces logs ont montré que ce paramètre peut se classer en 5 classes (tableau 23).

Tableau 23 Classes et pondération du paramètre de milieu aquifère

Classes	Cote	Poids	D aquifère
Argile	5	3	15
Calcaire	6		18
Grés	7		21
Sable	8		24
Gravier	9		27

La carte thématique du paramètre de milieu aquifère (figure 34) montre que la région d'étude est composée de 5 classes, dont la classe du gravier et de sable est la catégorie la plus répandue, avec une cote estimée à 9 et 8 respectivement.

V.1.4. Milieu du sol

Ce paramètre joue un rôle important dans la détermination des zones polluées, pour que la nature de la surface du sol influe sur la pénétration des polluants vers l'aquifère. Le calcul de ce paramètre donne 5 indices voir tableau 24.

Tableau 24 Classes et pondération du paramètre de milieu du sol

Classes	Cote	Poids	D sol
Argile	6	2	12
Calcaire	7		14
Grés	8		16
Sable	9		18
Gravier	10		20

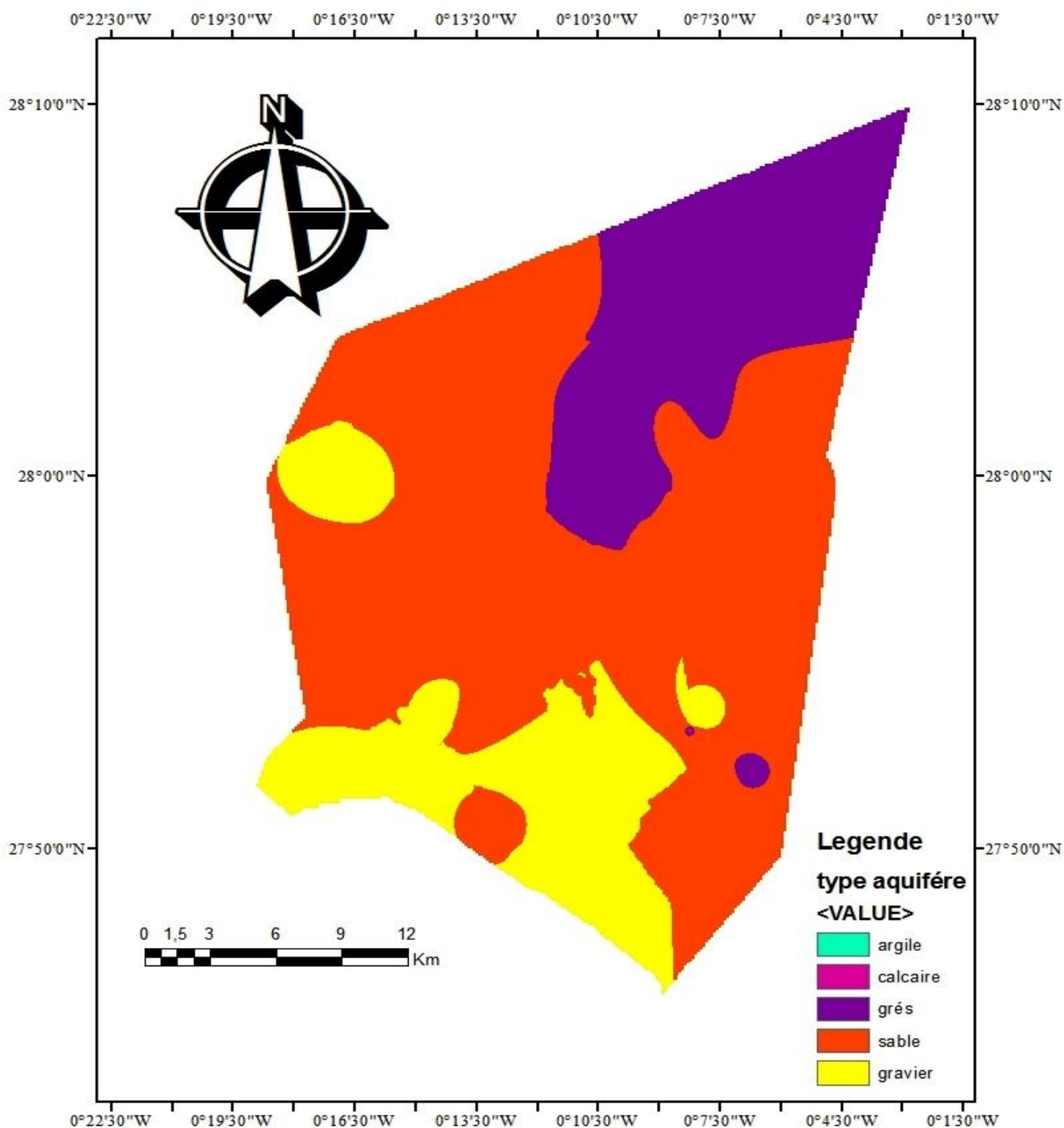


Figure 34 Carte thématique de milieu aquifère de CI.

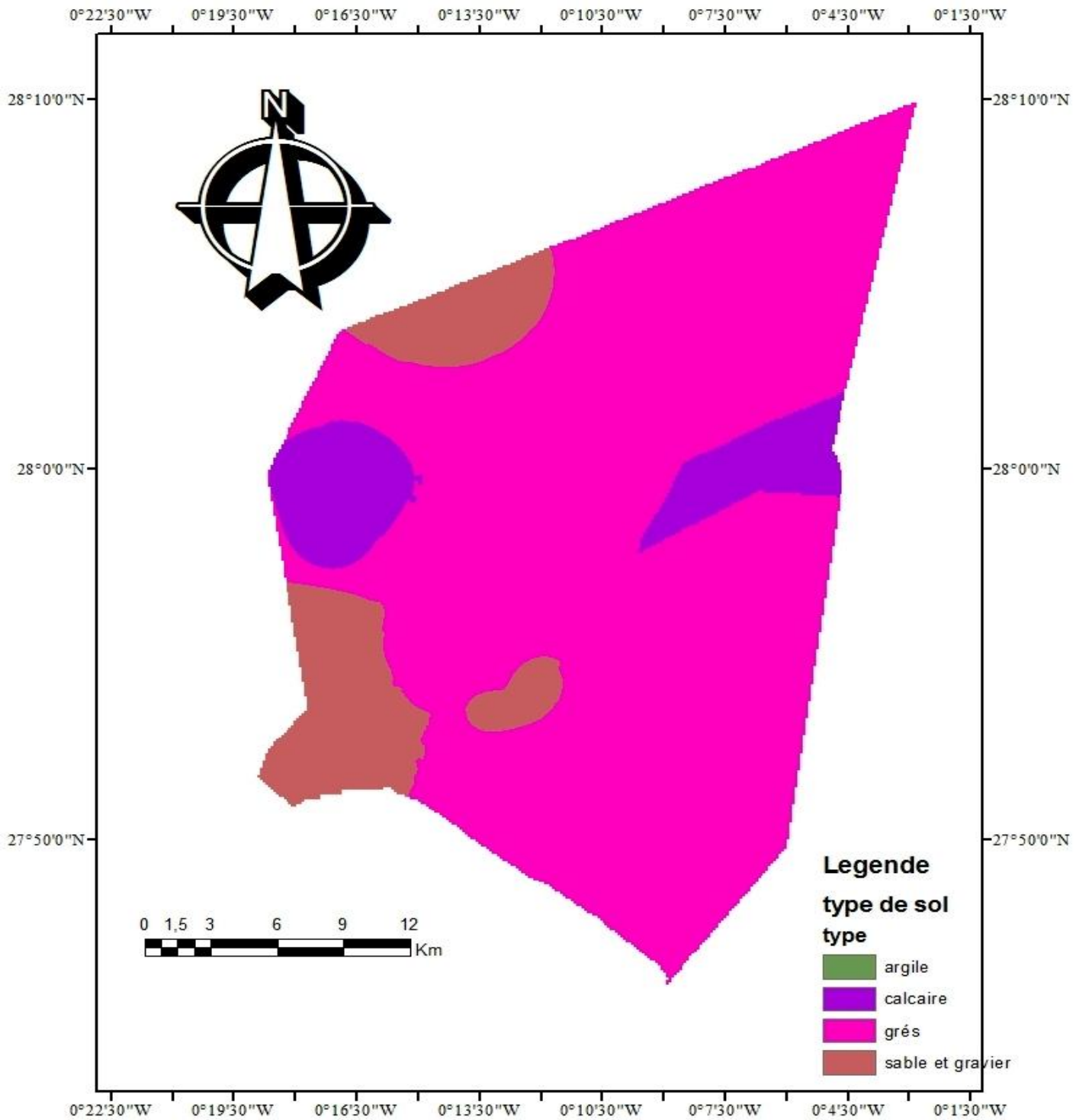


Figure 35 Carte thématique de paramètre types de sol CI.

La carte thématique (figure35) montre que l'indice du paramètre de sol prend les valeurs 10 (gravier), 9 (sable) et 8 (grés). Dans ce cas, les eaux souterraines sont plus vulnérables à la pollution. Et les valeurs 6 et 7 pour l'argile et le calcaire respectivement et dans ce cas La probabilité de l'absorption des polluants est plus importante.

V.1.5. Topographie

La variation de la pente du terrain contrôle la possibilité d'infiltration de polluant, l'augmentation de la pente du terrain entraîne une augmentation du ruissellement des eaux, donc la pollution des eaux souterraines est faible. Le tableau ci-dessous représente les différentes pentes du terrain en pourcentage et cotes correspondant selon la méthode DRASTIC.

Tableau 25 Classes et pondération du paramètre de la topographie

Classes en %	Cote	Poids	D topographie
0-2	10	1	10
2-6	9		9

L'observation de la carte (figure36) montre deux plages de pentes. Le premier varie de 0 à 2% et il s'occupe la majorité de la carte, Tandis que la seconde varie de 2 à 6%, cette pente est faible et favorise la pollution des eaux de foggara.

V.1.6. Impact de la zone vadose

La nature de la zone non saturée constitue un paramètre important dans l'estimation de la vulnérabilité, car elle influe sur la vitesse de propagation des polluants. Son impact est déterminé à partir de la lithologie des terrains qui la constituent. L'application de ce paramètre fait sortir 4 classes différentes (tableau26).

Tableau 26 Classes et pondération de la nature de zone vadose.

Classes	Cote	Poids	D Vadose
Calcaire	6	5	30
Grés	7		35
Sable	8		40
Gravier	9		45

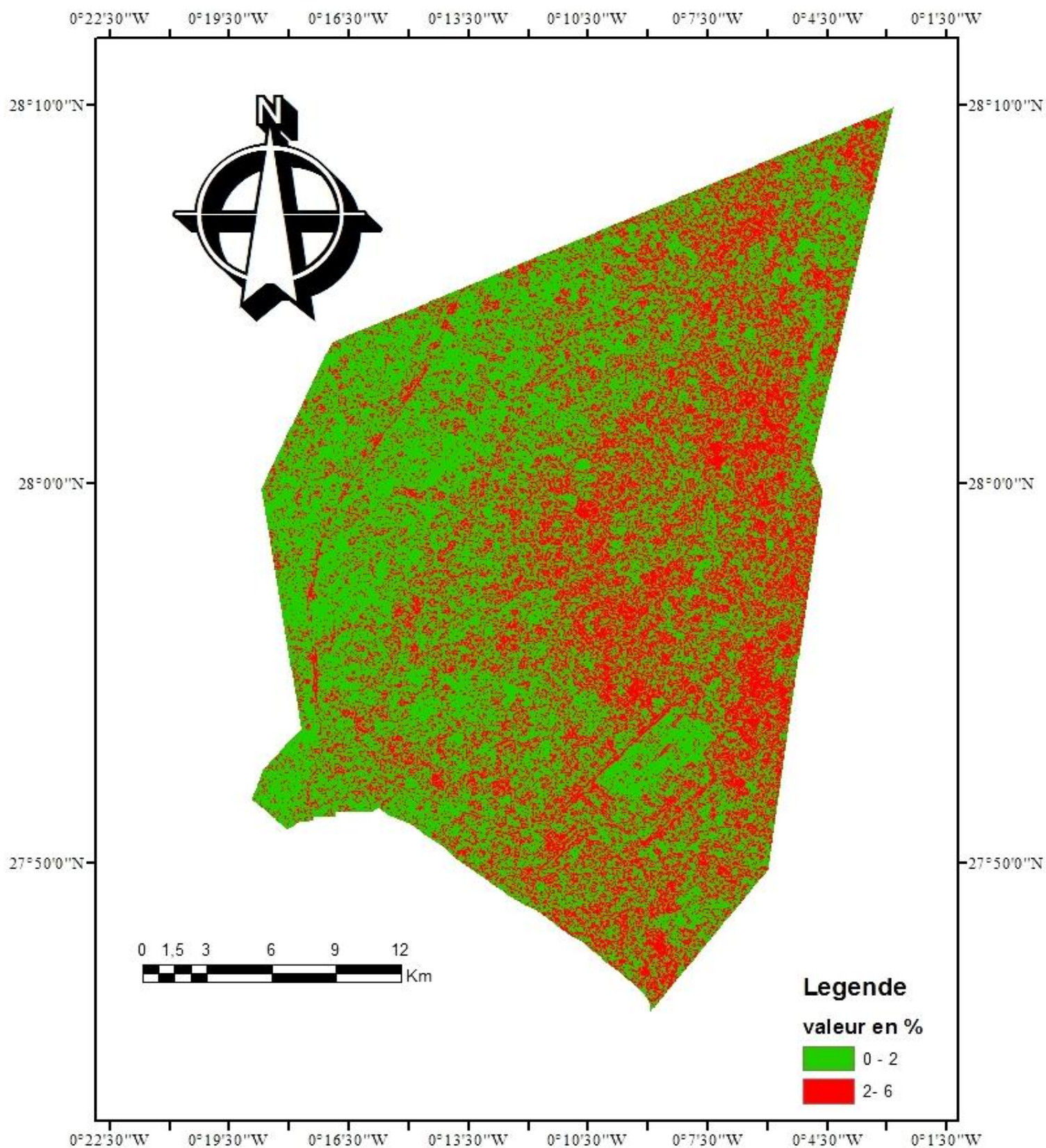


Figure 36 Carte des indices de la topographie de la nappe CI.

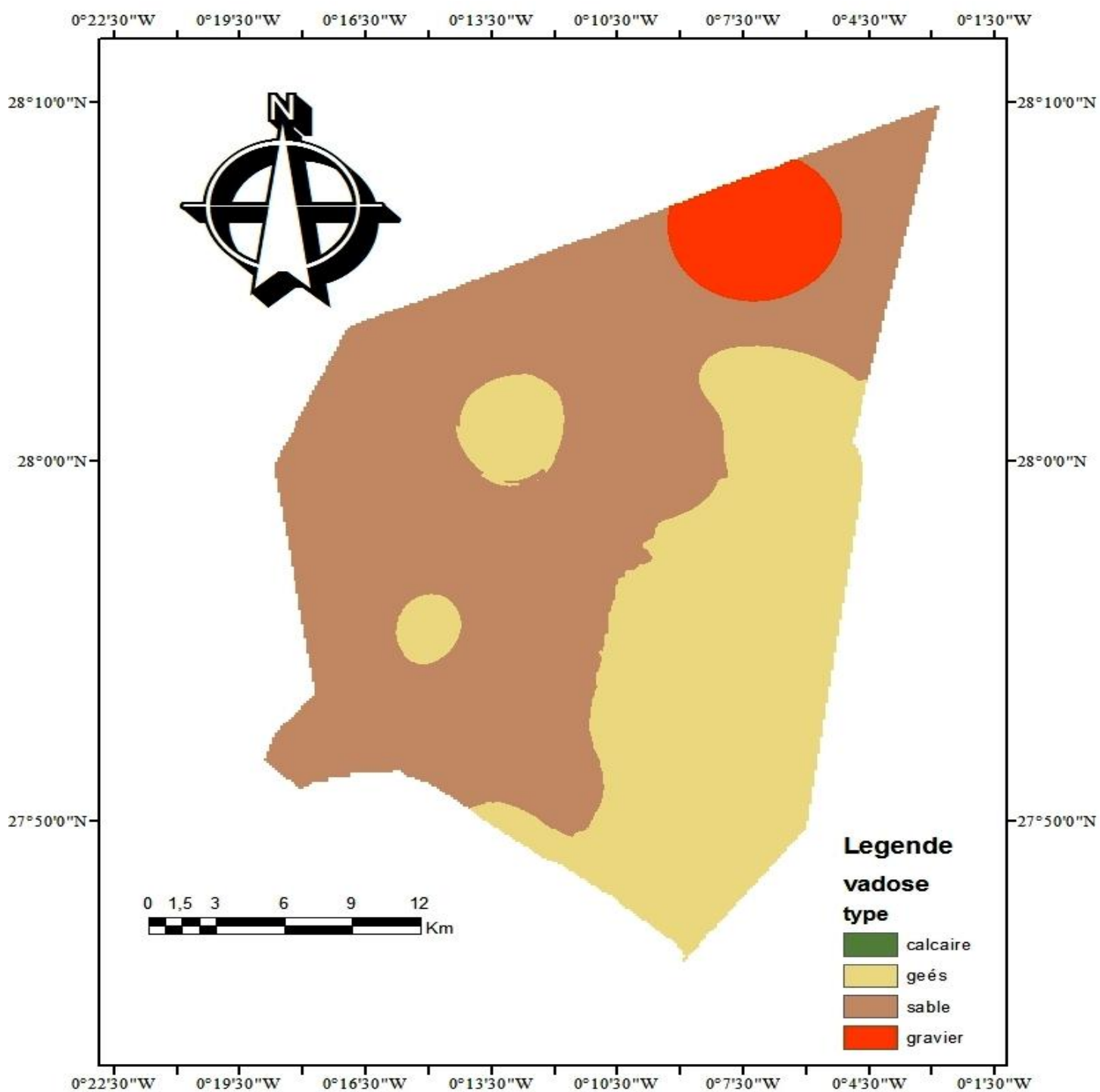


Figure 37 Carte thématique des indices de l'impacte de zone vadose.

D'après la carte thématique représentée dans la figure 37, les indices de l'impacte de la zone vadose sont le calcaire qui occupe une faible superficie de zone considérée, le gravier le plus dominant, le sable et les grés. D'après cette structure on constate que la vulnérabilité à la pollution des eaux de foggara dans la région d'étude est élevée.

V.1.7. Conductivité hydraulique

Les valeurs des conductivités hydrauliques utilisées pour calculer les degrés de la vulnérabilité sont obtenues à partir des essais de pompage, et qui sont disponibles sous forme de transmissivités. Les perméabilités sont calculées en divisant les transmissivités par la puissance utile de la nappe (42).

Tableau 27 Valeurs de la conductivité hydraulique pour la région d'étude

Conductivité (m /j)	Cote	Poids	D conductivité
0.04 – 4	1	3	3

L'analyse de la carte thématique (figure38) indique que toutes les valeurs de la conductivité hydraulique sont inférieures à 4 m/j avec un indice de pondération égale 3. La valeur de cette paramètre est faible qui correspond à une vulnérabilité à la pollution faible.

V.1.8. Carte de l'indice de la vulnérabilité (carte de synthèse)

Pour établir la carte finale de l'indice de la vulnérabilité, on procède à une intégration des cartes thématiques correspondant aux indices recommandés par la méthode DRASTIC en utilisant la commande calculator raster (11) basé sur l'équation suivante:

$$ID = Dp * Dc + Rp * Rc + Ap * Ac + Sp * Sc + Tp * Tc + Ip * Ic + Cp * Cc$$

Les classes de la vulnérabilité à la pollution sont présentées dans le tableau 28

Tableau 28 Classifications des indices de vulnérabilité

Classe de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	<100
Faible	101-125
Moyenne	126-150

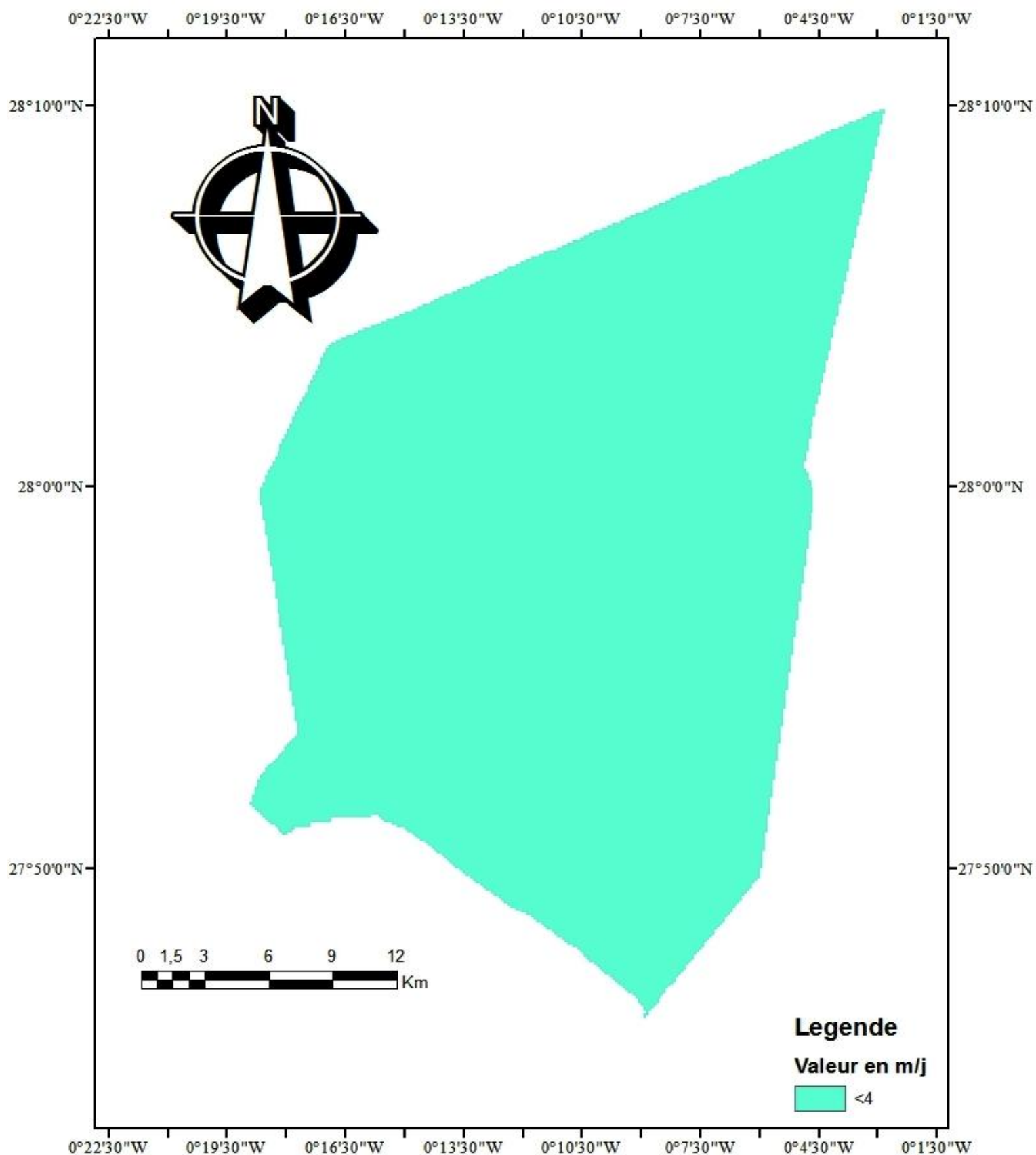


Figure 38 Carte de conductivité hydraulique de la nappe CI.

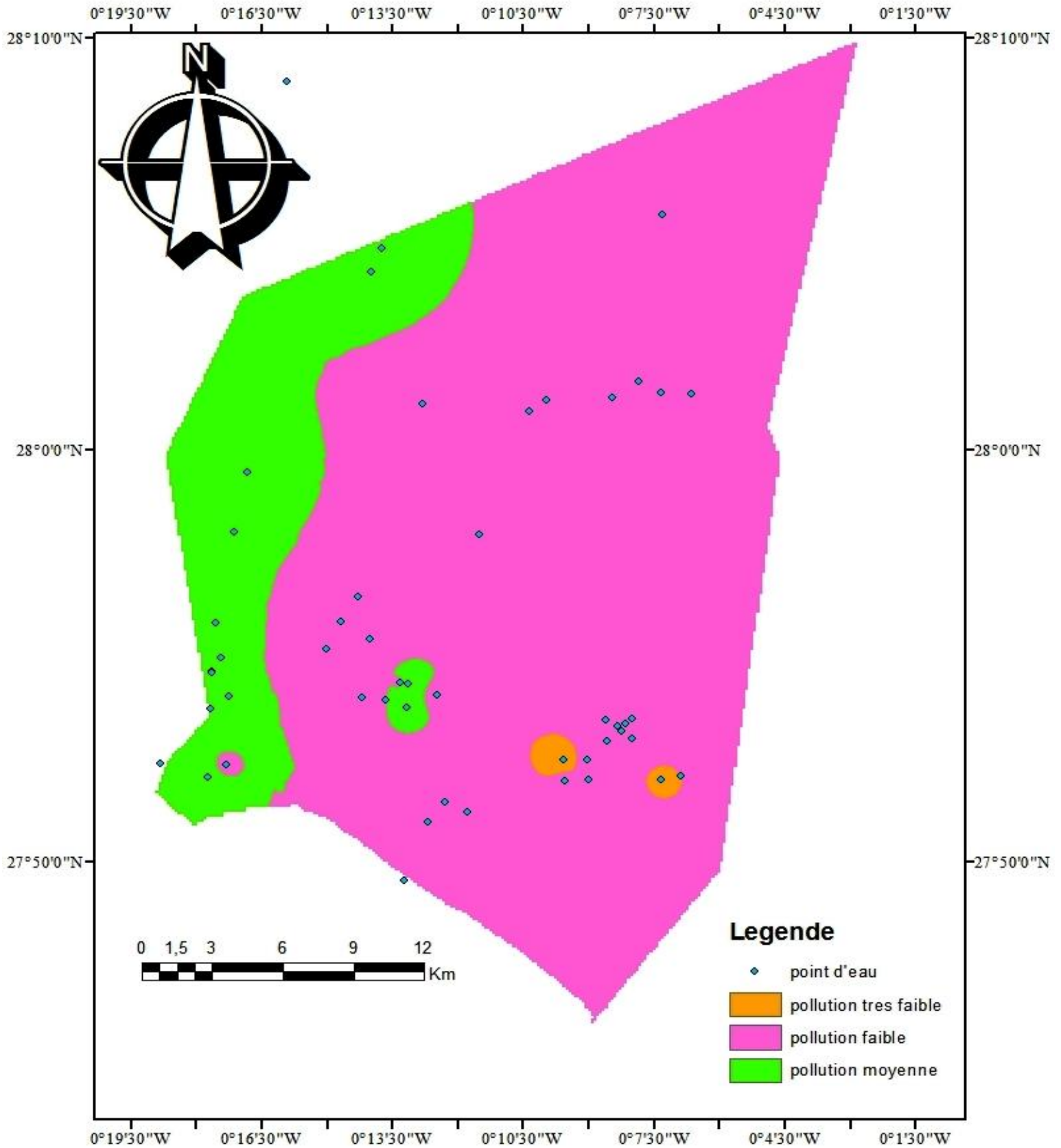


Figure 39 Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraine dans la région d'Adrar par la méthode DRASTIC.

La carte de figure 38 montre une variabilité spatiale de l'indice de vulnérabilité à la pollution pour les différentes régions étudiées. La carte de vulnérabilité révèle trois classes de vulnérabilité:

➤ **Classe de vulnérabilité très faible:** l'indice de cette classe est inférieur à 100, il occupe petite partie de la zone d'étude, en raison de l'imperméabilité des formations lithologiques et la forte profondeur de la nappe dans cette région.

➤ **Classe de vulnérabilité faible:** c'est la classe dominante sur la carte réalisée, l'indice de cette classe varie entre 101 et 125. La nappe phréatique dans cette zone est moins exposée au risque de la pollution, la cause est réfère aux type de formation des couches (l'argile et le calcaire).

➤ **Classe de vulnérabilité moyenne:** elle s'étend sur une superficie limitée, son indice de vulnérabilité varie entre 126 et 150, la profondeur de la nappe dans cette zone est importante.

Conclusion générale

Conclusion générale

En plein du Sahara algérien, la wilaya d'Adrar est située au sud-ouest du pays. Elle est considérée comme l'une des régions les plus arides caractérisées par des températures élevées avec une moyenne annuelle de l'ordre de 27,54°C, et la précipitation est inexistantes estimées à 14,76 mm par ans. En plus elle renferme quelques traits morphologiques, on trouve: (La plaine, la dépression, les sebkhas, Le Reg...).

L'étude hydrogéologique a également montré que cette zone d'étude fait partie du système aquifère du Sahara septentrional. Composé de deux nappes à savoir le complexe terminal (CT) et le continental intercalaire (CI). Ce dernier est composé de formations meubles telles que le sable, le gravier, le grès et l'argile.

Cette nappe (CI) représente la seule source d'alimentation en eau et qui a été exploitée naturellement par le système foggara qu'il s'agit d'un système hydrique conforme à la zone aride. Le mode de partage des eaux dans ce système est spécifique, il se base sur un outil de mesure de l'eau appelé "*Chekfa*" utilisé par une personne s'appelle "*Kiel el ma*".

Le développement des activités industrielles et agricoles entraîne la pollution des eaux souterraines, pour pouvoir déterminer la vulnérabilité à la pollution des eaux de foggara, nous avons utilisé la méthode DRASTIC la plus adoptée à notre région d'étude vue aux ses paramètres recommandées.

La carte de vulnérabilité intrinsèque réalisée à l'aide de logiciel Arc Gis relève trois régions à savoir

➤ **Classe de vulnérabilité très faible:** l'indice de cette classe est inférieur à 100, il occupe une petite partie de la zone d'étude, en raison de l'imperméabilité des formations lithologiques et la forte profondeur de la nappe dans cette région.

➤ **Classe de vulnérabilité faible:** c'est la classe dominante sur la carte réalisée, l'indice de cette classe varie entre 101 et 125. La nappe phréatique dans cette zone est moins exposée au risque de la pollution, la cause est référée aux type de formation des couches (l'argile et le calcaire).

➤ **Classe de vulnérabilité moyenne:** elle s'étend sur une superficie limitée, son indice de vulnérabilité varie entre 126 et 150, la profondeur de la nappe dans cette zone est importante.

Références bibliographique

Bibliographies

1. **Bousalsal Boualem; Kherici Nacer; Hadj-said Samia.** 2019, vulnirabilité et risque de pollution de la nappe libre d'El-oued(s-e Algiria): application de la méthode DRASTIC. article, p. 55.
2. **Benouara Nawel; Laraba Abdelaziz; and Lamia Hachemi Rachedi.** 2016, Assessment of groundwater quality in the Seraidi region (north-east of Algeria) using NSF-WQI," Water Science and Technology: Water Supply, vol. 16, pp. 1132-1137. article.
3. **Djaafri Mohammed.** 2006, Etablisement d'une carte de vulnérabilité des eaux souterraines a la pollution par la méthode DRASTIC Cas de région d'adrar(tout). memoir, p. 66.
4. **Ghoule Mohammed; Oughouzlafi Abdelmadjide.** 2019, Etude de qualité physico-chimique des eaux de foggara dans la région Bouda-Adrar. mémoire, p. 25.
5. **Remini Boualem.** 2017, La foggara de Tadmaït : sans energie de l'eau du sous-sol a la surface du sol . Article, p. 305.
6. **Said Slimani.** 2011, Étalonnage de différents systèmes traditionnels(Chekfa) de mesure de débits en vue d'une restitution du réseau hydraulique de distribution d'une foggara. Mémoire, p. 15.
7. **El kayssi Youssef; Hilali Mohamed; Kouz Taoufiq; Kacimi Ilias.** 2019, evolution de la vulnirabilité à la pollution des eaux souterraines par la méthode DRASTIC: cas de la nappe alluviale de rich (haut Atlas central, Maroc). article.
8. **Louannas Abdelmonaim et Hadaoui Ahlam.** 2015, Etude du système traditionnel d'irrigation au sahara exemple des foggaras de la région d'adrar. mémoire, p. 26.
9. **Hammou Ali brahim et Belkhamza Youcef.** 2013, Evaluation de la pollution azotee des eaux de consommation dans la région d'Adrar. mémoire, p. 3.
10. **Ghoulam Abdelhamid et Ouled brahim Habiba.** 2020, Détermination de l'origine des nitrates dans la nappe du continental intercalaire région Adrar. mémoire, p. 5.
11. **Slimani Said.** 2021, Etude de la méthode de répartition de l'eau de foggara et sa vulnérabilité à la pollution dans la région d'Adrar. These doctorat, p. 4.
- 12 **Bahida Zeyneb; Souddi Mebarka.** 2019, Etude de l'influence de l'urbanisme sur la qualité des eaux des foggaras dans la région d'Adrar., memoire, p. 8.

13. **Abdelkrim Hadraoui Younes et El-fkih.** 2017, Etude hydrogéologique et hydrochimique de la région de Touat(ADRAR). mémoire, p. 5.
14. **Dana, Alwahadin.** mawdoo3. <https://mawdoo3.com>. [En ligne] 17 février 2022.
15. **Bensalem Idir; Zair Saber et Khemmoudj M.** 2014, Etude de la vulnérabilité à la pollution de la baie de Bejaia par les méthodes DRASTIC et SINTACS. Mémoire, p. 34.
16. **Lekrine Yacine.** 2015, Hydrodynamisme et minéralisation du complexe aquifère du bassin frontalier d'EL Ma Abiod Wilaya de Tébessa (S-E Algérien). mémoire, p. 65.
17. **Illoul Zohra; Boudihadj Halima.** 2020, Etude de l'origine de la salinité de la nappe du continental intercalaire. mémoire.
18. **Mohammed Madi.** 2017, Modélisation du système aquifère et périmètre de protection du captage d'eau potable dans le Sahara septentrional. (Cas de la région d'In Salah). mémoire, p. 25.
19. **Kendouci Mohammed Amin.** 2018, Étude de risque de pollution des eaux souterraines de la ville de Béchar et valorisation du sable en vue de son utilisation en traitement des eaux usées. mémoire de doctorat, p. 8.
20. **Fellah Halima Saadia.** 2012, La cartographie de vulnérabilité et du risque de pollution des eaux souterraines dans le groupement urbain de Tlemcen. mémoire, p. 9.
21. **Fethi Meriem.** 2016, Apport de la géologie dans l'exploitation des gisements de granulats (cas d'une carrière dans la région d'Adrar). mémoire, p. 10.
22. **Bahous Nasri.** 2012, Etude et développement d'un SIG du potentiel géothermique de la wilaya d'Adrar. mémoire, p. 6.
23. **Messaoud Benhamza.** 2013, Aperçu hydrogéologique et hydrochimique sur le système de captage traditionnel des eaux souterraines « foggara » dans la région d'Adrar. mémoire, p. 30.
24. **Remini Boualem.** 2020, Quand les foggaras d'Adrar se réveillent. article, p. 163.
25. **Jacob Oliel.** 2014, La foggara : un ingénieux système d'irrigation. article.
26. **Guédon Stéphanie.** 2018, La frontière romaine de l'Afrique sous le Haut-Empire. Madrid, Espagne : Casa de Velázquez.

27. **P. Kayser; G. Waringo.** 2003, L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer: un monument antique de l'art de l'ingénieur au Luxembourg. Revue archéologique de l'Es, pp. 3-16.
28. **Rashedi, S.H.** Unesco. <https://whc.unesco.org/fr/list/1506/>. [En ligne] 21 02 2022.
29. **Abudu Shalamu; Sevinc Yeliz Cevik; Salim Bawazir; James Phillip King; Cui Chunliang.** 2011, Vitality of ancient karez systems in arid lands: a case study in Turpan region of China. article.
30. **Kantaoui Abdelkarim.** 2016, Contribution a l'etude de l'utilisation des foggaras dans la région de zaouiet kounta (Adrar). Mémoire, p. 16.
31. **Boualem Remini, Bachir Achour et Rabah Kechad.** 2010, La foggara en Algérie : un patrimoine hydraulique mondial. article.
32. **Djaafri Zohra.** Etude de la purification de l'eau de foggara par l'utilisation des graines de Moringa dans la région d'Adrar. mémoire, p. 19.
33. **Mme Bouamra Djohar Chahinez; Asmouni Hanane** 2016, Adoucissement de l'eau des foggaras par mémoire, p. 16.
34. **Grandguillaume Gilbert.** 1973, regime economique et structure du pouvoire: le système des foggarar du Touat. Article, p. 438.
35. **Christian Estevez.** 2019, les sept foggaras d'Algerie, la plus grande de Timimoune. article.
36. **Kachi Slimane.** 2007, Vulnérabilité de la nappe alluviale de Tebessa-morsott face aux polluants. thèse doctorat, p. 132.
37. **Bouffkane Abdelmadjid.** 2017, Hydrologie et hydrogéologie de la région de Jijel etude de la pollution des nappes et méthodologie de protection des ressources. mémoire, p. 136.
38. **Samir Amrani; Saïd Hinaje et Youssef Gharmane.** 2019, Application des méthodes paramétriques (DRASTIC et SI) pour l'étude de la vulnérabilité à la pollution potentielle par les nitrates de la nappe d'eau superficielle de Timahdite-Almis Guigou (Moyen Atlas, Maroc). article.
39. **Aller L.** 1985, Drastic: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. mimore, p. 8.

40. **V. Murat, D. Paradis, M. Savard, M. Nastev, E. Bourque, A. Hamel, R. Lefebvre, and.** Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec: évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD. Canada : Ressources naturelles Canada, 2003, p. 10.
41. **Sabah Latifi ; Salah Chaab.** 2017, Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien. mémoire, p. 55.
42. **Saida Sbagoud.** Validité de l'application de la méthode de vulnérabilité DRASTIC à l'étude de la pollution par les nitrates dans la Mitidja (Nord d'Algérie). article, p. 13.
43. **Guerreiro F.** 2011, Fiches d'aide à Arc gis 9.x desktop (Arc View/ Arc Editor/ Arc Info) site officiel de ESRI, éditeur de la suite Arc Gis <http://www.esri.com/>. article, p. 2.