

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ ABBES LAGHROUR DE KHENCHELA
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DÉPARTEMENT D'ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master académique

Domaine : Science de la Nature et de la Vie

Filière : *Écologie et environnement*

Spécialité : écologie fondamentale et appliquée

Thème

**Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque par la méthode
DRASTIC couplée de Système d'Information Géographique
(SIG). Cas de la plaine da Remila - khenchela -**

Présenté par :

BOUGUERNIZEN Samira

MEDERAG NAROU Souhyla

Devant le jury :

Présidente :	Mr ZIOUCH Omar Ramzi	MCB	Université Abbes LAGHROUR –Khenchela-
Examineur :	Mr Difallah Tarak	MCB	Université Abbes LAGHROUR –Khenchela-
Encadreur :	Mr BOULABEIZ Mahrez	MCB	Université Abbes LAGHROUR –Khenchela-

Année universitaire : 2017/ 2018

Résumé

La rareté relative des ressources en eau dans la plaine de Rémila (Nord de Khenchela), leur fragilité et leur inégale répartition font naître un risque majeur de pénurie qui, en dépit de toutes les tentatives pour accroître l'offre, semble inéluctable. Ainsi l'accroissement des populations et le développement des agglomérations, des unités industrielles et des terres cultivées ont eu pour corollaire une dégradation de la qualité des eaux souterraines. Cette étude constitue une approche d'aide à la protection et à la prévention la pollution des eaux souterraines de la nappe de Rémila ainsi qu'à la cartographie de zones vulnérables à la pollution. L'application de la méthode DRASTIC dans un environnement SIG a permis cette évaluation.

L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) permet d'augmenter la rapidité et la précision de la cartographie. Les résultats montrent que la moitié la zone d'étude est modérément vulnérable. Les indices DRASTIC les plus élevés sont localisés essentiellement au centre de la plaine, ceci est expliqué par la nature des formations lithologiques perméables relatives dans cette zone, les zones à vulnérabilité très faible et faible occupent les rives est et ouest de la plaine, ceci due à la couverture limoneuse argileuse formant une protection naturelle de la nappe.

Mots Clés : Plaine de Rémila, Climat semi-aride, vulnérabilité, Model DRASTIC, SIG, Algérie.

Abstract

The relative scarcity of water resources in the Remila plain (north of Khenchela), their fragility and unequal distribution create a major risk of scarcity which, despite all attempts to increase supply, seems inevitable. For example, population growth and the development of agglomerations, industrial units and cultivated lands have resulted in a deterioration of the quality of groundwater. This study is an approach to help protect and prevent the groundwater pollution of the Rémila aquifer and to map areas vulnerable to pollution. The application of the DRASTIC method in a SIG environment allowed this evaluation.

The use of geographic information systems (SIG) increases the speed and accuracy of mapping. The results show that half of the study area is moderately vulnerable. The highest DRASTIC indices are located mainly in the center of the plain, this is explained by the nature of the relative permeable lithological formations in this zone. The zones with very weak and weak vulnerability occupy the east and west shores of the plain, due to silty clay cover forming a natural protection of the water.

Key Words: Remila plain, Semi-arid Climate, Vulnerability, Model DRASTIC, SIG, Algeria.

ملخص

إن الندرة النسبية لموارد المياه في سهل ريميل (شمال خنشلة) وهشاشتها وتوزيعها غير المتكافئ أدى إلى خلق خطر كبير من الندرة. فالنمو السكاني وتطوير التجمعات والوحدات الصناعية والأراضي الزراعية أدت إلى تدهور جودة المياه الجوفية. وهذه الدراسة هي نهج للمساعدة في حماية ومنع تلوث المياه الجوفية في ريميل ولتخطيط المناطق المعرضة للتلوث وقد سمح تطبيق طريقة DRASTIC باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (SIG) الذي يزيد من سرعة ودقة الخرائط. فأظهرت النتائج أن نصف مساحة الدراسة ضعيف بشكل معتدل و تتمركز أعلى مؤشرات DRASTIC بشكل رئيسي في وسط السهل، وهذا ما يفسر طبيعة التشكيلات التي تعاني من ضعف ضعيف و ضعيف جدا التي تتموضع في النهايات الشرقية والغربية من السهل وذلك بسبب غطاء الطين الذي يشكل حماية طبيعية للمياه الجوفية الصخرية النسبية في هذه المنطقة.

الكلمات المفتاحية: سهل ريميل ، المناخ شبه القاحل ، الضعف ، نموذج DRASTIC ، SIG ، الجزائر.

Remerciements

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention consciente, d'un
Grand nombre de personnes.

Nous souhaitons ici les en remercier.

Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement mon encadreur :

M. « **BOULABEIZ Fouad** »
qui nous a permis de bénéficier de son expérience, de ses connaissances et de
ses. Conseils, qu'il nous a prodigués.


Je remercie tout particulièrement messieurs les membres de Jury d'avoir
accepté d'examiner ce modeste travail.

Sans oublier bien sur le Dr **ZOUAOUI**. Enseignant universitaire de Batna
en retraite. Je le remercie pour les conseils et les efforts et le temps qu'il
nous a consentis lors de la réalisation de notre thèse.

Je voudrais également remercier Melle « **T. Naziha** ». Chef service à la
Direction de l'hydraulique de la wilaya de Khenchela et en particulier,

enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé
à la réalisation de ce travail.

MERCI



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À

*-À Dieu source de toute connaissance

*-À mon chéri père qui a beaucoup souffert pour mon éducation

*- À ma chère mère qui représente pour moi l'exemple du sacrifice, et de l'honnêteté,

qu'elle trouve ici l'expression de mon entière affection.

*- À mon frère : **MOUHAMED LOUAY.**

*- À ma chérie sœur : **NASSIMA** et sa nounou **DJOURI.**

Que dieu la bénisse et la fasse grandir dans le droit chemin et le respect de ses parents

*-A ma tante **WARDA..**

Enfin je dédie ce modeste travail à tous les autres membres de ma famille ainsi que mon fiancé **YAKOUB.**

Et sans oublier mon chère partenaire et binôme là très gracieux

SOUHILA.

<http://www.myhouseonweb.eu/>
MY HOUSE ON WEB

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À

*-À Dieu source de toute connaissance.

*-À mon chéri père qui a beaucoup souffert pour mon éducation

*- ma chère mère qui représente pour moi l'exemple du sacrifice, et de l'honnêteté,

qu'elle trouve ici l'expression de mon entière affection.

*- À mon frère : **AYOUB**

*- À mes chères sœurs : **ABIR** et **AYA**

*-À ma proche amie : **NAHLA** et sa nounou **HADIL**.

Que dieu la bénisse et la fasse grandir dans le droit chemin et le respect de ses parents

*-A toute chère personne dans ma vie sur tout : **WAFI, AHLAM, AICHA** et **MEREIM**. Et mon fiancé : **SABER**.

Enfin je dédie ce modeste travail à tous les autres membres de ma famille et mes collègues ainsi qu'à spécialement **ABDELAALI**.

Et sans oublier mon chère partenaire et binôme là très gracieux

SAMIRA

<http://www.myhouseonweb.eu/>
MY HOUSE ON WEB

Liste des Figures

Fig. N°	page
01- Carte de situation géographique de la plaine de Remila.....	04
02- La répartition spatiale des précipitations annuelles (A.N.R.H, 1992). Cette carte au 1/500. 000.....	05
03- Cadre géographique régional de la plaine de remila (au nord-est de la figure se situe la sebkha).....	06
04- Des sous-bassins des hauts plateaux constantinois.....	08
05- : Réseau hydrographique de bassin de Remila.....	09
06- Carte géologique du bassin de Remila.....	18
07- Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur de l'Aurès d'après Laffitte, 1939 et modifié par Guiraud, 1973.....	20
08- . Coupe interprétative dans le bassin de Remila d'après Villa (1977).....	25
09- pollution urbaine.....	33
10- Pollution agricole.....	34
11- Les composants d'un système d'information géographique.....	43
12- Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC.....	46
13- Carte de profondeur de la plaine de Remila.....	51
14- Carte de recharge de la plaine.....	53
15- Carte de la zone saturée.....	54
16- Carte de nature du sol de la plaine de Remila.....	56
17- Carte de la topographie.....	57
18- Carte de la zone non saturée de Remila.....	59
19- Carte de perméabilité de la plaine de Remila.....	60
20- Répartition spatiale, en pourcentage, des degrés de vulnérabilité à pollution.....	61
21- Carte d'indice DRASTIC.....	62

Liste des tableaux

N°	page
01-Principaux Oueds de la wilaya de kenchela et leurs exutoires Source CENEAP2009.....	09
02- Colonne lithostratigraphique synthétique des formations présentes dans la région de Khenchela.....	27
03- Types de pollution.....	36
04- Critères de vulnérabilité intrinsèque.....	39
05- Données utilisées pour l'élaboration des sept paramètres DRASTIC.....	44
06- Paramètres utilisés par le modèle DRASTIC.....	47
07- Cotes accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC.....	48
08- Indices de degré de vulnérabilité.....	49
09- Codification des classes la profondeur.....	50
10- Codification des classes Indice de la recharge.....	52
11- Codification des classes de la zone saturée.....	54
12- Codification des classes types de sol.....	55
13- Codification des classes de la topographie.....	58
14- Codification des classes la zone non saturée.....	58
15- Codification des classes la perméabilité.....	60
16- Indices de degré de vulnérabilité.....	62

Table des matières

	Page
Résumé.....	i
Abstract.....	.ii
ملخص.....	iii
Remerciement.....	iv
Dédicace	v
Introduction générale.....	I
 Chapitre I : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	
Introduction.....	03
1.1-PRESENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	03
1-2-LE CLIMAT.....	04
1-3 -GÉOMORPHOLOGIE DU BASSIN DE REMILA.....	06
1-4 -HYDROGRAPHIE.....	07
1-4.1-hydrographie régionale.....	07
1-4-2 -Réseau hydrographique de la région étudiée.....	08
1-5- CADRE LITHOLOGIQUE.....	10
1-5-1. Lithologie de l'aquifère.....	10
1-5-2- Substratum : structure profonde.....	10
1-5-3- Terrains Néogènes.....	10
1-5-4 -Le Plio-Quaternaire.....	11
1-6-LES PRINCIPAUX AQUIFÈRES.....	11
1-6-1 les aquifères alluviaux	11
1-6-2 -l'aquifère miocène	12
1-7- TYPOLOGIE DES NAPPES DU BASSIN DE REMILA.....	12
1-7-1- Nappe phréatique.....	12
1-7-2- Profondeur de la nappe.....	12
1-7-3- Les Nappes profondes.....	13
1-8- STRATIGRAPHIE	13

1-9- PÉDOLOGIE	13
1-9-1 -Caractéristiques pédologiques de la plaine de Remila.....	13
1-10-AGRICULTURE	14

Conclusion.....	14
------------------------	-----------

Chapitre II : GÉOLOGIE DE LA ZONE

Introduction.....	16
2-1- DESCRIPTION DES FORMATIONS LITHOLOGIQUES.....	16
2-1-1- trias	16
2-1-2- Crétacé.....	18
2-1-2-1 -Crétacé inférieur.....	19
2-1-2-2- Crétacé supérieur	20
2-1-3- Miocène.....	23
2-1-4- Quaternaire	23
2-2- Tectonique locale	25
Conclusion.....	27

Chapitre III : L'EAU ENVIRONNEMENTALE

3-1- L'EAU ; CONCEPT ET NATURE.....	29
3-2 -FORMES DE L'EAU ENVIRONNEMENTALE	29
3.3- DISPOSITIONS NATURELLES DES EAUX.....	31
3-3-1 -l'eau des nappes	31
3-3-1-1- Nappe active (ou nappe libre).....	31
3-3-1-2- Nappe captive	31
3-4-POLLUTION DES EAUX.....	32
3-4-1- concept pollution de l'eau	32
3-4-2- Types de pollution	32
3.4.2.1-La pollution ponctuelle	32
3-4-2-1.1-La pollution urbaine.....	32
3-4-2.1.2-La Pollution industrielle.....	33

3-4-2.-2-La pollution diffuse.....	33
3-4-2-2-1-la pollution agricole.....	33
1-4-2-2-2.-La pollution atmosphérique.....	34
3-5. PRINCIPAUX POLLUANTS DES EAUX	34
3-5-1- Matières en suspension	34
3-5-2 Matières organiques.....	35
3-5-3-Matières fertilisantes.....	35
3-5-4 Polluants métalliques et polluants chimiques persistants.....	35
3-5-5-Sels minéraux.....	36
3-5-6-Polluants microbiologiques.....	36
3-6-CONSÉQUENCES DE LA POLLUTION.....	37
3-7- VULNÉRABILITÉ.....	37
3-7-1- notion de la vulnérabilité.....	37
3-7-2 -Origine de la vulnérabilité des eaux souterraines.....	38
3-7-3 -différents types de vulnérabilité	39
3-7-4 -Critères de vulnérabilité intrinsèque	39
3.8-LA METHODE DRASTIC.....	41
3-8-1- présentation de la méthode DRASTIC	41
3-8-2- paramètres de la méthode DRASTIC	41
3-8-3 indice de vulnérabilité DRASTIC	41
3.9-SYSTEME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG)	42
3-9-1 -Portée de la méthode SIG.....	42
1-9-2 -Composantes d'une SIG.....	43
3.10-EVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES NAPPES PAR SIG	43
Chapitre IX : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	
Introduction.....	44
4-1-Matériels et méthode.....	45
4-1-1- Description de la méthode DRASTIC	47

4-1-2 -Système de notation appliqué.....	48
4-2 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	50
4-2-1 -Interprétations des paramètres et réalisation des cartes thématiques.....	50
Conclusion	63
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATION.....	64
Bibliographie.....	66
Annexe.....	73

Introduction générale

La qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets industriels non contrôlés, l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation désordonnée des ressources en eau. Les activités agricoles, minières et industrielles de l'homme moderne génèrent des déchets chargés en éléments polluants. L'accumulation de ces éléments dans les formations superficielles (sols et sédiments) en teneurs élevées, entraîne automatiquement grâce aux phénomènes qui accompagnent l'infiltration des eaux de pluie et superficielles, la contamination des eaux souterraines.

Actuellement, l'Algérie est soumise à de nombreuses tractions quant aux modes de production agricole et industrielle. Elles semblent avoir de multiples effets négatifs sur l'environnement et sur la quantité des eaux souterraines. Étant conscients de la problématique actuelle et souhaitant savoir quels pourraient être les outils permettant de protéger et de protéger les ressources en eaux souterraines à l'échelle régionale, nous avons cherché à étudier la vulnérabilité intrinsèque des eaux. La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination demeure dans ce cas un outil adéquat pour l'estimation de cette dernière. Ce sont des cartes schématiques réalisées dans le but d'aider la prise de décision pour l'aménagement du territoire. Elles peuvent combler des besoins d'inventaire et guider les organismes de réglementation pour assurer une gestion globale de l'ensemble de la ressource en eau souterraine d'un territoire.

La plaine de Remila située au nord de la wilaya de Khanchela qui est d'une superficie agricole très importante (près de 20 000 hectares) (Zouaoui, 1991) confrontée à d'énormes difficultés climatiques (pluviosité faible et irrégulière elle se classe selon le diagramme d'Emberger dans la limite du semi-aride frais [Zouaoui, 1991, 2008] et une répartition inégale avec une évapotranspiration élevée, présente un exemple type. La nappe superficielle du Mio-pliocène et la nappe profonde du Maestrichtien constituent les principales ressources en eau de la région, pour satisfaire la demande en eaux potables et l'irrigation. Actuellement la nappe est

menacée par de nombreux foyers de pollution, en particulier les rejets des eaux domestiques et les engrais chimiques utilisés en agricultures, ce qui nécessite un certain degré de protection contre toute contamination probable.

Objectifs : l'objectif principal de cette étude est l'évaluation de la vulnérabilité de l'aquifère de Remila en utilisant le modèle DRASTIC (Aller et al., 1987) intégré dans une SIG (ArcGis 10.1(ESRI,Inc)

Notre travail est le premier de son genre dans l'étude de Ramila

La présente thèse est structurée de la manière suivante :

Introduction générale

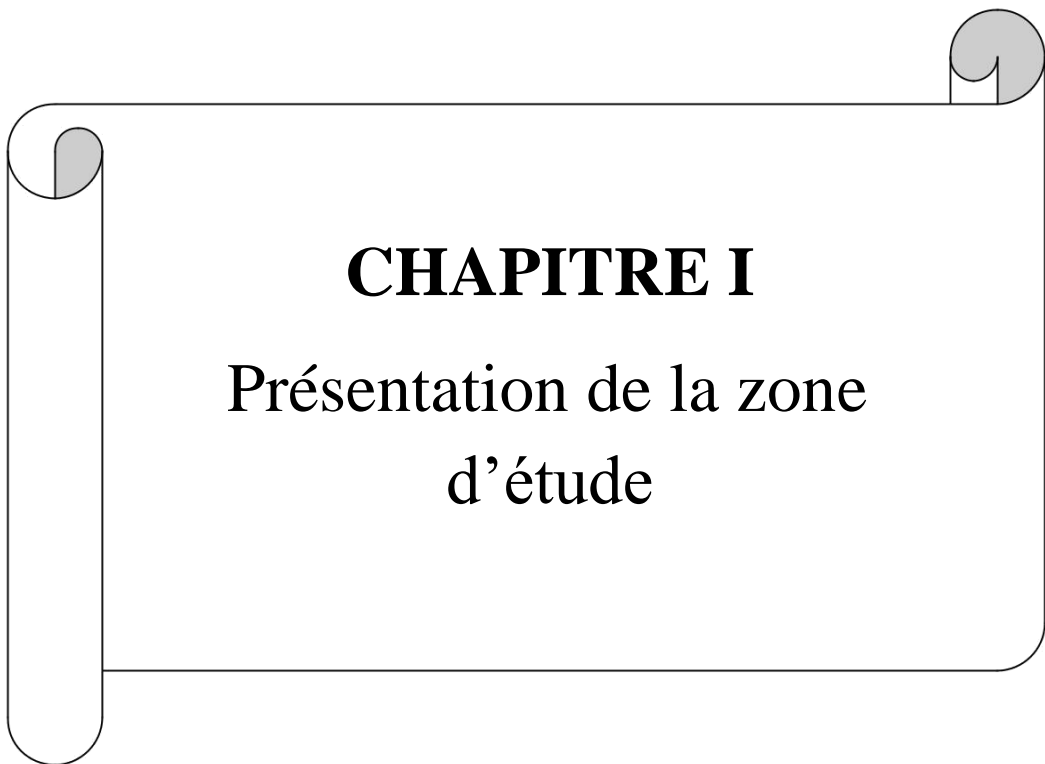
Chapitre 1 : Le contexte physique et géographique de la plaine de Rémila.

Chapitre 2 : La géologique de la zone d'étude.

Chapitre 3 : Les concepts principaux qui liés à l'étude.

Chapitre 4 : Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination en utilisant le modèle DRASTIC couplé avec un SIG

Le mémoire se termine par conclusions générales et perspectives



CHAPITRE I

Présentation de la zone
d'étude

Introduction

Cette première partie a pour but de caractériser la zone d'étude dans son contexte géographique, géomorphologique, hydrologique, hydrogéologique ainsi que les grandes caractéristiques de son climat. L'étude physique de la zone d'étude constitue un élément déterminant dans le processus d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.

1.1-PRESENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La plaine de Rémila s'étend au du massif des Aurès à la latitude $35^{\circ}26'9''$ Nord et à la longitude $7^{\circ}8'36''$ est, sur une superficie de près de 1800 km^2 . Le bassin de Rémila est situé dans les hautes plaines steppiques, entre l'Atlas tellien au nord et l'Atlas saharien au Sud, c'est un bassin hydrologique endoréique centré sur une dépression fermée de 200 km^2 , Sebkhha de Garât-Tarf.

Les limites de la région étudiée sont comme suit figure 1 :

- à l'Ouest, Djebel Bou-Arif (1450 m) et son prolongement Djebel Amrane (1000 m) ;
- au nord, Djebel Fedjoudj (1248 m) ;
- à l'est, la dépression salée la Sebkhha de Garât et Tarf ;
- au Sud, les reliefs crétacés des Aurès : les Djebels Aidel (1300 m), Aourès (1600 m) et Chélia (2308 m).

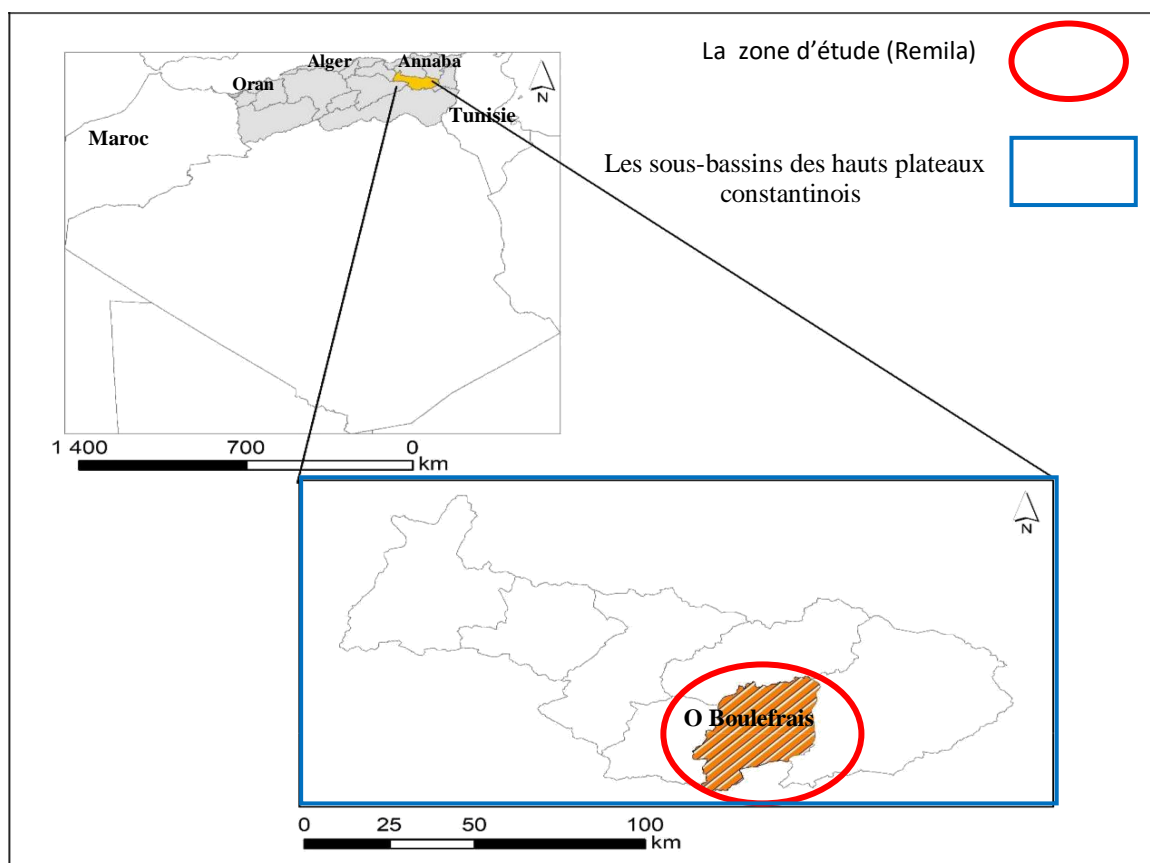


Fig.1 : Situation géographique de la plaine de Remila

1-2-LE CLIMAT

La région de Khenchela se spécifie par un climat continental, chaud et sec en été froid et pluvieux en hiver. La moyenne de la pluviométrie se situe entre 400 et 600 mm/an.

Les régions montagneuses sont couvertes de neige en hiver.

Il se dégage cinq sous-étages bioclimatiques (figure 2) :

semi-aride inférieur : de 350 mm à 450 mm, est composé d'une zone naturelle au nord-ouest montagneux.

- Aride supérieur : à partir de 250 mm à 350 mm, représentés par les hautes plaines du nord de fèves habituellement occupé avec un faible rendement, avec des inclinais d'adaptation des systèmes de production.

-Aride moyen : de 200 mm à 300 mm dans la région montagneuse, représentée par centrale (monts des Nementcha), a vocation steppe.

-Aride inférieur : de 100 mm à 200 mm est composé de la région présaharienne ou dominant les parcours présahariens.

-Aride supérieur : moins de 100 mm et est compose d'une partie de l'Atlas saharien, qui représente la pierre angulaire de la remise en état des terres désertiques de la région.

Dans la zone d'étude, la moyenne des précipitations interannuelles est de 435 mm alors que la température moyenne annuelle est de 15,63 °C. L'indice d'aridité est de 18, ce qui permet de constater que le type de climat qui règne dans la région est de type semi-aride frais. (Zouaoui 2008) (Boubellis, 2009)

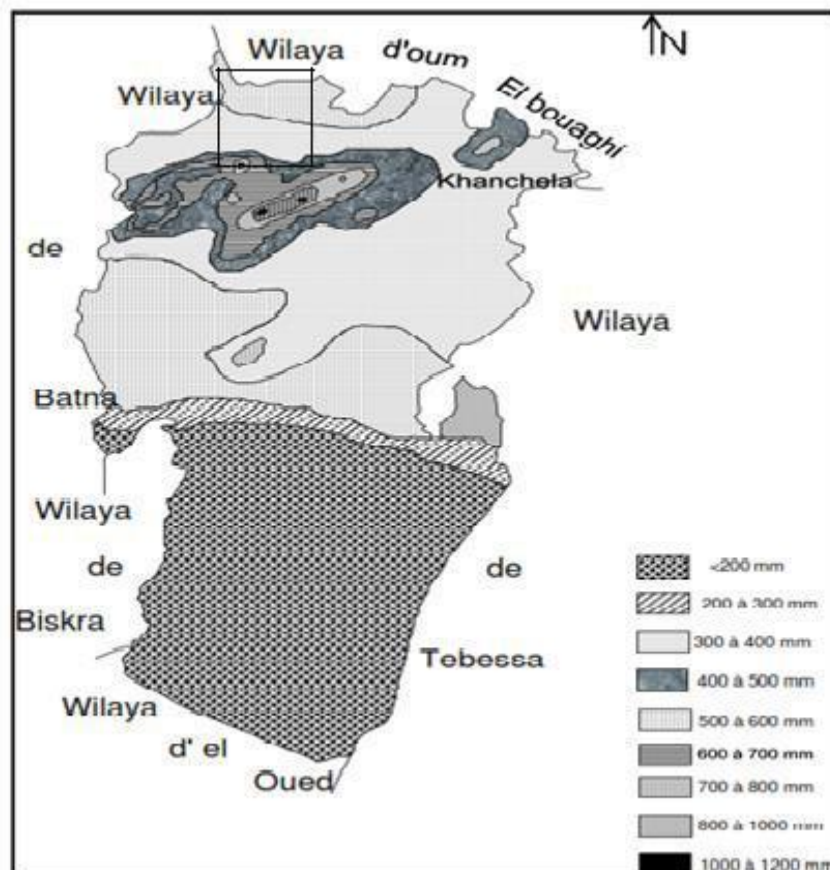


Fig. 2 : La répartition spatiale des précipitations annuelles (A.N.R.H, 1992).

1.3-Geomorphologie du bassin de Remila

D'une longueur voisine de 60 km du Nord-Ouest Sud est, sur une largeur de 30 km, le bassin de Rémila constitue une dépression endoréique très étendue et relativement élevée (altitude moyenne de 900 m). Elle reçoit tous les apports d'érosion des reliefs environnants.

Les massifs qui l'encadrent dépassent les 1200 m d'altitude et culminent à 2300 m au sommet de l'Aurès (Djebel Chélia). La zone basse à une altitude de 830 m est présente dans sa partie orientale, une zone de saumures de près de 200 km², la Sebkhha de Garât-et-Tarf. (Houha, 2007) (Figure 3)

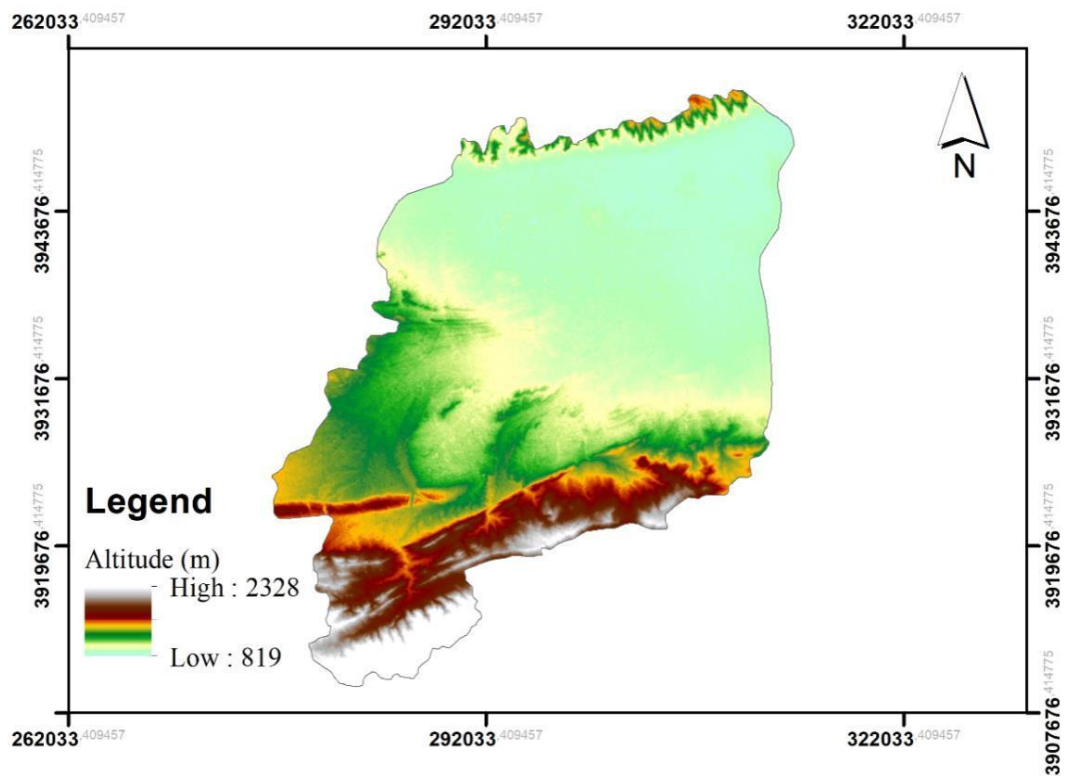


Fig. 3 : Relief régional de la plaine de Remila

1-4-Hydrographie

1-4.1-hydrographie régionale

La wilaya de Khenchela s'inscrit dans les limites géographiques de trois bassins versants (figure 4) :

- ***Le bassin versant des hautes Plaines Constantinoises***, qui correspond à la partie nord de la wilaya (piémonts Nord des Aurès et zone des dépressions) ;
- ***Le bassin versant de la Médjerdah***, pour la partie nord-est correspondant aux versants sud des Djebels : Chettaia, Tafrennt et Bou Tokhma et aux versants nord des Djebels : Tadilist et Tadjinnart ;
- ***Le bassin versant du Chott Melghir***, pour les parties médiane et sud de la wilaya, correspondant au massif des Aurès, aux monts des Nemenchas, aux vallées des Oueds El Arab et Mellagou, ainsi qu'aux plaines steppiques et présaharienne du sud.
- ***Le bassin versant des Hautes Plaines constantinoises***. Ce bassin est drainé principalement par les Oueds Boulefreis, Remila et Gueis. Ces Oueds, alimentés par un chevelu très dense de petits cours d'eau, se jettent tous au niveau des dépressions (petites Sabkhas) situées au nord de la wilaya. Au vu des apports pluviométriques limités dans cette zone et de la présence de formations triasiques, on déduit que le volume des écoulements est faible et que la qualité des eaux est saline.
- ***Le bassin versant de l'Oued Medjerdah***. Ce bassin, qui correspond à la zone de montagne et de vallée du nord-est de la wilaya, est drainé principalement par l'Oued Guergoub.
- ***Le bassin versant de Chott Melghir***. Ce bassin couvre les parties médiane et sud de la wilaya, correspondant au massif des Aurès, aux monts des Nemenchas, aux vallées des Oueds El Arab et Mellagou, ainsi qu'aux plaines steppiques et présahariennes du Sud ; il est drainé par : Oued El Arab, Oued El Abiod, Oued Mellagou, Oued Zaouia, Oued Rharhar.

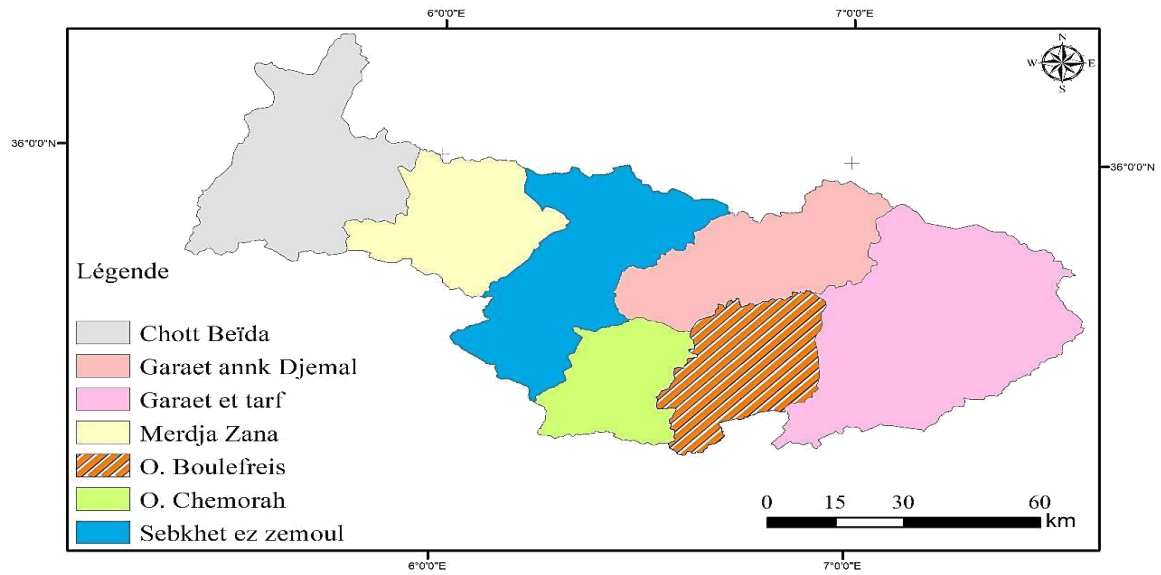


Fig. 4 : Carte des sous-bassins des hauts plateaux constantinois

1.4-2-Réseau hydrographique de la région d'étude.

La région étudiée est caractérisée par un réseau hydrographique bien développé où la majorité des Oueds sont caractérisés par un écoulement temporaire : Oued Boulefraï à l'Ouest, Oued Baghai au centre-est, traversent la plaine et aboutissent dans la dépression salée, et à l'intérieur l'Oued Marouf qui est le prolongement de l'oued Gueis vient se jeter dans les petites garât situées à l'extrême est de la zone d'étude (D.H.W., 1987). Les Oueds de la wilaya sont essentiellement de type endoréique et déversent leurs eaux dans les dépressions salées de la région : (D.E.W., 2009) (figure 5).

Les principaux oueds qui forment le réseau hydrographique de la région de kenchela sont présentés sous forme de tableau (tableau 1).

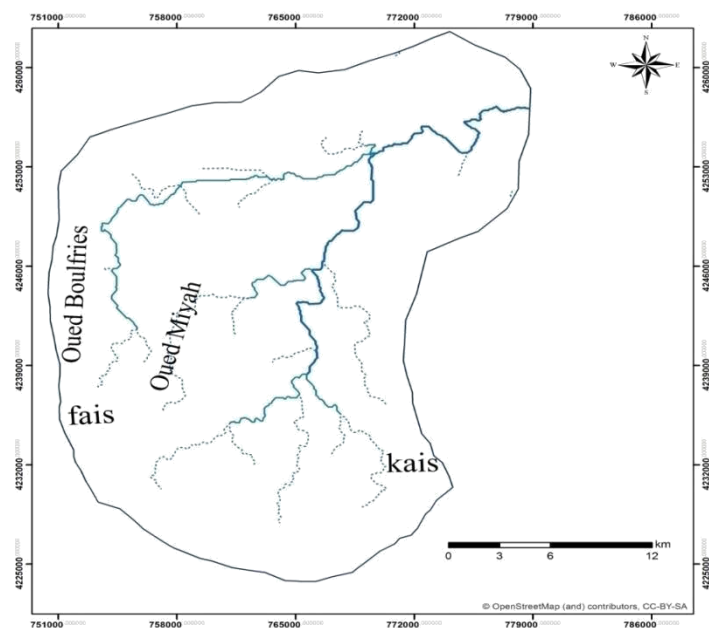


Fig. 5 : Réseau hydrographique de bassin de Remila

Tableau 1-Principaux Oueds de la wilaya de kenchela et leurs exutoires
Source CENEAP, 2009

Dénomination	Principaux affluents	Exutoire
Oued Sbikha	Oued Guergoub	Bassin de Sbikha
OuedBouDjeran, OuedZoui		Bassin de Sbikha
Oued Boulefreis	Oued Martoum, Oued El Melah, Oued Taouzient, Oued Meroui	Gareat et Tarf
Oued Gueis	Oued Issouel	Gareat et Tarf
Oued El Hamma	Oued El Kissan	Gareat et Tarf
Oued Baghai, Oued Aimer		Gareat et Tarf
Oued El Arabe	Oued Mellagou, Oued El Abiodh, Oued Tamagra, Oued El Hatiba	Chott Melghir
Oued El Hazz	Oued. Aleb El Khezil	Chott Melghir
OuedMeghder El Beggour, OuedBidjer, OuedRharhar, Oued El Mita		Chott Melghir

1.5- Cadre lithologique

1-5-1. Lithologie de l'aquifère

La nappe de Rémila se développe dans des terrains dont la nature et la texture sont variables ; il s'agit de formations détritiques du plioquaternaire, des formations gréseuses du Néogène et des marnes calcaires du Turonien. Chacune des formations a un caractère hydrogéologique propre ce qui nous amène à les décrire séparément (**Houha, 2007**)

1-5-2- Substratum : structure profonde

Les grandes lignes structurales du substratum hanté quaternaire sont marquées par un passage d'ouest en est des calcaires turoniens et cénomaniens aux marnes cénomaniennes. Ce sont ces marnes qui constituent le substratum sous la Garat et Tarf. Le substratum calcaire se trouve limité à la zone Ouest, au voisinage de Djebel Amrane, et à la partie sud, dans les zones de Boulfreis à Kais (**Kebbache, 2011**).

Au pied du Djebel Fedjoudj, le plongement Sud des calcaires patients a pu être suivi jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 500-600m.

1-5-3- Terrains Néogènes

Les formations miocènes s'allongent le long de la bordure sud du bassin avec une allure synclinale délimitée sous le recouvrement quaternaire. Il s'agit de grès marin noyé dans une importante épaisseur de marnes gréseuses verdâtre ou gris-bleu et constituent en réalité une roche assez dure et peu perméable. Cette formation n'est pas suffisante pour qu'une nappe continue puisse s'y développer (**C.G.G., 1970**).

1-5-4 -Le Plio-Quaternaire

Les terrains quaternaires sont le lieu de bonnes circulations d'eau, l'épaisseur saturée de cette formation est suffisante. Il est formé de plusieurs niveaux grossiers, sables, graviers, conglomérats bien développés, dans la partie ouest et centre de la plaine. Ces niveaux grossiers se présentent sous la forme de vastes lentilles parfois

sans liaison entre elles, en prolongement du Djebel Amrane et du massif miocène de Boulfreis. Il est moins important et moins profond dans la partie sud-est de la plaine.

Il constitue donc la couverture perméable qui permet l'infiltration des eaux météoriques, cet ensemble joue un rôle hydrogéologique important du fait de sa perméabilité en général excellente. C'est dans cette formation du remplissage plioquaternaire que la nappe de Rémila est contenue (CGG, 1970).

1-6. Les principaux aquifères

Les deux types d'aquifères sont :

- les aquifères alluviaux
- l'aquifère miocène

1-6.1 les aquifères alluviaux

Deux types d'alluvions peuvent être distingués : les alluvions anciennes et les alluvions récentes qui reposent sur les premières. Les alluvions anciennes sont constituées de galets, graviers et sables bien roulés ou très émoussés. Les alluvions récentes présentent d'importantes variations de faciès, mais sont toujours composées de dépôts fins. Ainsi l'aquifère des alluvions anciennes est localement captif ou semi-captif sous les limons (Kebbache, 2011).

Ces aquifères représentent la plus importante ressource régionale en eau souterraine occupent le bassin de Rémila et tout autour du massif des Aurès. Ils sont constitués d'éléments détritiques grossiers, sable, gravier et conglomérats, emballés dans une matrice argilo-limoneuse et sont le lieu de bonnes circulations d'eau, l'épaisseur saturée de cette formation est suffisante. Ils correspondent à un réservoir multicouche à cause de la présence de lentilles argileuses parfaitement interconnectée d'un point de vue hydrogéologique. La nappe est presque en charge et peut même être artésienne.

1-6-2 -l'aquifère miocène

S'allonge le long de la bordure sud du bassin avec une allure synclinale délimitée sous le recouvrement quaternaire, ne présente qu'un intérêt local et est, de ce fait, peu exploité. Il s'agit de grès marin noyé dans une importante épaisseur de

marnes gréseuses verdâtre ou gris-bleu et constituent en réalité une roche assez dure et peu perméable. Cette formation n'est pas suffisante pour qu'une nappe continue puisse s'y développer (C.G.G., 1970).

1-7- Typologie des nappes du bassin de Rémila

1-7-1- Nappe phréatique

La nappe aquifère est contenue dans le remplissage quaternaire dans des intercalations argilo-sableuses et dans des sables et graviers. C'est un aquifère multicouche séparé par des argiles et des marnes (Houha, 1997).

Les zones d'alimentation se situent :

- Principalement au sud, à partir du versant nord du massif de l'Aurès et à l'Ouest, à partir du Djebel Amrane.
- L'alimentation par le Djebel Fedjoudj au nord est considérablement plus réduite.
- Il faut noter que le rôle joué par les oueds est conséquent de l'alimentation de la nappe phréatique. Il semblerait que certaines eaux s'échappent des Oueds, Gueiss, Boulfreis et Baghai, pour alimenter la nappe (Houha, 1997).

1-7-2- Profondeur de la nappe

La nappe est dans l'ensemble de la plaine peu profonde et se situe vers 5 m dans toute la partie centrale et ouest de la plaine. On remarquera une anomalie importante dans la région de Kais, où la nappe est profonde et atteint jusqu'à 30 m, pour se trouver très rapidement à 5 m de profondeur à quelques kilomètres au nord (C.G.G., 1970 et A.N.R.H., 2002).

1-7-3- Les Nappes profondes

Les nappes profondes à porosité de fissure constituée par les calcaires et des marnes calcaires d'âge crétacé formant une nappe libre et parfois captive, qui peut être un grand réservoir en eau souterraine.

1-8- Stratigraphie

D'une façon générale, la stratification de la région de Remila peut être schématisée comme une base calcaire de crétacé recouverte par des dépôts sédimentaires de quaternaire. Les données par des sondages des forages de la mission chinoise montrent une grande variabilité dans l'épaisseur et la granulométrie des dépôts sédimentaires, variant, de quelques mètres, et la granulométrie du matériel à la fraction d'argile (CPH, 1970)

1-9- Pédologie

1-9-1 -Caractéristiques pédologiques de la plaine de Remila

D'après les données morphologique et analytique de la plaine de Remila, elle présente des caractéristiques spécifiques à elle. De manière générale les données dégagées sont semblables et typiques des sols salés des zones arides et semi-arides de l'Algérie (Zouaoui, 1991, 2008).

La texture dominante est argileuse, sur certains sols la présence d'une stratification entre plusieurs textures est évidente. L'aspect texturant dominant sur ces sols est une contrainte à ne pas négliger, car il limite le choix des cultures ainsi que leur croissance. L'impact est ressenti au niveau de la production ; deux autres aspects limitants aussi sont dégagés, il s'agit de teneur élevée du calcaire et des sels salins. Ces deux facteurs sont des caractéristiques dominantes des sols des régions semi-arides et arides (Halitim,1973 ;Zouaoui,2008). Les sels salins rencontrés se présentent sous forme d'amas et d'efflorescences salines et de cristaux au-delà des 45 premiers centimètres de profondeur. L'apparition en surface des sels est remarquée en périodes sèches ou après irrigation ou nous notons des remontées conséquentes.

1-10-Agriculture

L'agriculture et l'élevage ovin et bovin ainsi que l'exploitation forestière sont les activités traditionnelles de la wilaya de kenchela.

La vaste plaine de Remila est connue par sa grande activité agricole et pastorale. Elle est située sur la route principale qui relie les hauts plateaux aux basses plaines steppiques, passage obligé de l'axe commercial Sahara-Tell. Elle s'étend sur l'essentiel du potentiel en superficie agricole utile (SAU).

L'agriculture est essentiellement tournée vers la céréaliculture. On y pratique aussi de l'élevage ovin et bovin compte tenu des potentialités fourragères dont dispose cette région. Les pratiques arboricoles sont éparses et sont pratiquement à caractère familial. C'est le cas aussi des pratiques maraichères qui ont pris toutefois un essor de développement important local et régional passant du stade familial limité vers une production plus large occupant les marchés avoisinants.

L'élevage intensif, avicole, ovin, et bovin, tient une place prépondérante dans le tissu socio-économique de Remila.

Il faut noter toutefois que compte tenu des conditions climatiques aléatoires et contraignantes, car les quantités pluviales sont faibles, les rendements sont conséquemment faibles et ne dépassent pas les 10 qtx/ha (**Zouooui 2008**).

Parallèlement, la présence de formations triasique, associée aux faibles précipitations, qui augmente la salinité des sols, notamment à proximité des dépressions. L'insuffisance de drainage, processus de blocage de l'écoulement naturel des eaux de pluie, se traduit ainsi par la formation de dépressions salines hydro-allomorphes aux alentours desquelles se développe une végétation favorable telle *Artémisia* sp, *Attriplex* sp, *Zizyphus* sp (**Bouafia, 2015**).

Conclusion :

En conclusion de cette partie hydrographique, il se dégage que la plaine de Remila est connue par son climat semi-aride. À ce stade des études, les réserves hydriques sont méconnues et les débits en eau (forages et puits) sont limités et ne permettent pas une agriculture intensive sur ces terres.

Les études hydrodynamique et hydrogéologique de cette région auront permis de situer les niveaux perméables susceptibles de constituer des nappes profondes et d'estimer relativement, mais sans une nette précision les réserves prévues et d'avoir ainsi une idée sur les capacités à exploiter ainsi que le comportement des eaux relatives à la géométrie de ces aquifères.



CHAPITRE II

Géologie de la
zone d'étude

Introduction

Tout processus d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution est basé sur une bonne connaissance de la géologie locale. La structure géologique joue un rôle primordial dans la protection des eaux souterraines à la suite d'une pollution diffuse ou accidentelle.

Nos connaissances géologiques sur la région d'étude sont largement inspirées des travaux et études régionales et des synthèses sur le massif des Aurès sur les hautes plaines steppiques et sur les zones humides. La plupart de ces études ont été axées sur les caractères stratigraphiques, géomorphologiques, sédimentologiques et structuraux (Laffitte, 1939 ; Guiraud, 1973 ; C.G.G. 1969 ; Villa, 1977 ; Houha, 1996 et 2007).

II-1- DESCRIPTION DES FORMATIONS LITHOLOGIQUES

La puissante série stratigraphique du bassin étudié est composée à sa base par un socle mésozoïque sur lequel repose, en discordance, une couverture sédimentaire allant du trias supérieur jusqu'au Quaternaire.

Un seul ensemble présente la lithostratigraphie de la plaine de Remila celle de quaternaire encadré par d'autres formations lithostratigraphiques :

II-1-1 -Le Trias

Dans les Monts et massifs montagneux qui entourent la plaine de Rémila, il a été dégagé de nombreux affleurements triasiques (diapirs) (fig. 6). Dans ces régions le Miocène est isolé du Crétacé, suivant une bande de 4 à 5 km de long et de 300 à 400 m de large et sur Djebels El Krouma et Knif en contact anormal avec l'albien, le Cénomaniens et le Sénonien (Laffite, 1939 ; Villa, 1977).

L'affleurement est sous forme de masses chaotiques sans aucune stratification. La constituante est essentiellement évaporitique, constituée en grande partie d'argiles de couleur rouge lie-de-vin à cargneules jaunâtre, à dolomies noires et à gypse marneux ou fibreuses, on y trouve aussi parfois des grès quartzeux (Laffite, 1939 ; Villa, 1977).

Les pointements des Djebel Knif et El Krouma plus ou moins isolés possèderaient un volume considérable, ce dernier serait masqué par un dépôt

alluvionnaire important. Le Trias de ce secteur est en contact anormal avec le Cénomaniens et le Sénonien (**Villa, 1977**).

À l'Est de Djebel el Chettaia, un affleurement triasique en forme de croissant se développe localement d'Ain Krim au Nord jusqu'au Djebel El Tarf (le diapir de Tazougouret) sur une longueur de 12 km et une largeur de 2 km environ ; il est en contact anormal avec le Turonien et Sénonien supérieur (**Laffite, 1939 ; Villa, 1977**).

Le gypse est le plus fréquent, en amas saccharoïdes blanc grisâtre, durs, ou sous forme de grands cristaux. L'abondance des sels caractérise cet affleurement, visible dans les diapirs de Khenchela et Krouma, mais cela tient, non pas à un caractère original particulier au Trias de cette région, mais au fait que ce pointement étant récent (post-miocène), le sel n'a pas eu le temps d'être dissous, tandis que dans les autres pointements, qui sont anté-miocènes, il a disparu depuis longtemps (**Laffite 1939**). Les argiles et marnes bariolées, de couleur verdâtre, rougeâtre à violacé, constituent les roches les plus abondantes à l'affleurement. Les formations anciennes calcaires dolomitiques, de couleur grise bleutée à noirâtre, généralement bien stratifiés et présentant parfois quelques taches marneuses, sont fréquemment emballés dans les complexes triasiques (**Laffite, 1939**).

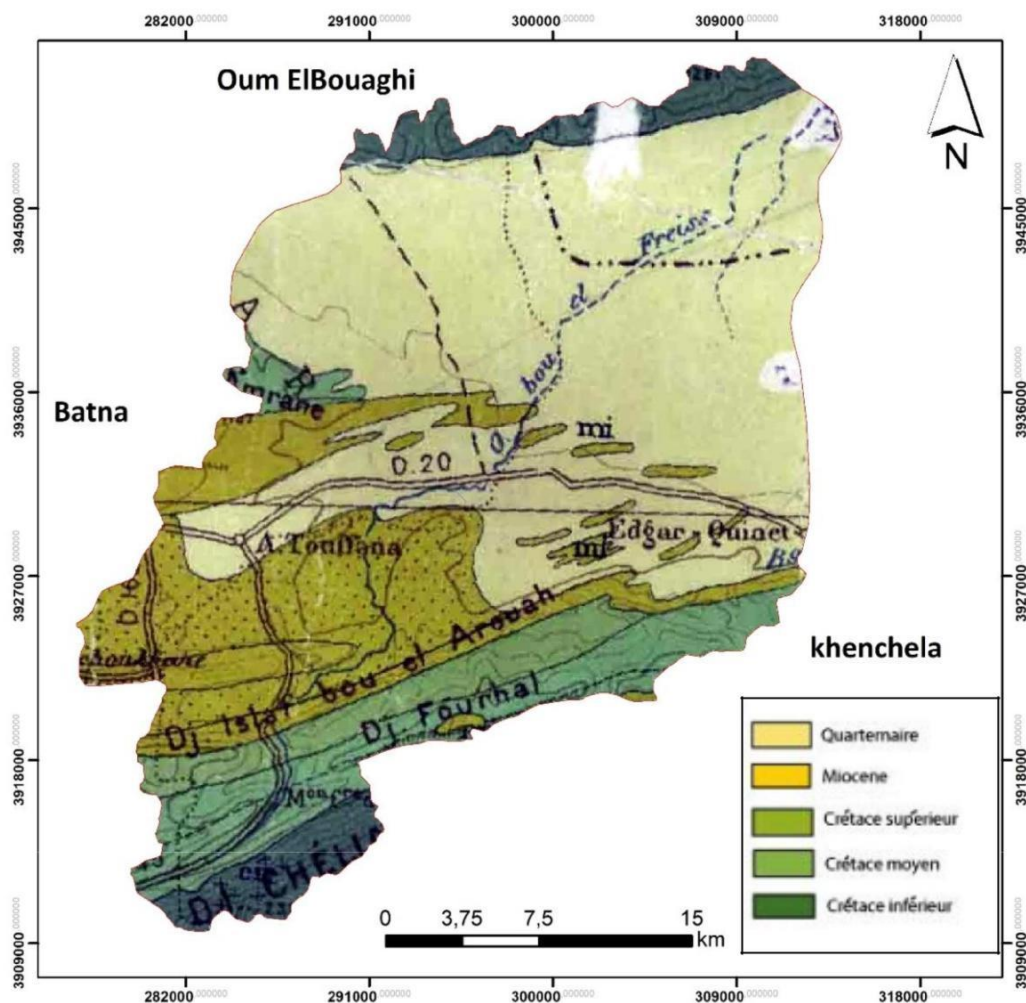


Fig.6. Carte géologique du bassin de Remila (extrait de la carte Nord Est de l'Algérie 1 : 500 000)

II-1-2- Le Crétacé

Le Crétacé a été subdivisé par Laffite (1939) en Crétacé inférieur ou série gréseuse (Berriasien à l'Albien) et en Crétacé supérieur ou série marron calcaire (Cénomaniens à Maestrichtien).

Les formations crétacées présentent une masse énorme de calcaire marneux, de marne calcaire et de marne qui s'allonge depuis les plis de Khenchela, les monts de Dhalàa et ceux de F'kirina jusqu'aux montagnes bordant Garaet Tarf suivant des directions NE-SW (C.G.G, 1969).

II-1-2-1. Le Crétacé inférieur

Il couvre une grande partie des Anticlinaux du Djebel Chelia, Anticlinal de Khenchela, il affleure aussi au Kef Tifekressa, Ras Serdoun, Djebel Chenntgouma, Djebel Faraoun et Djebel Aidel.

Laffitte (1939) a soigneusement décrit la plupart des faciès et c'est à partir de ses descriptions, modifiées ou complétées en quelques points, que (**Guiraud, 1973**) a établi (Figure 7), qui résume de façon schématique les principales variations observables.

Le Crétacé inférieur peut être subdivisé en quatre ensembles lithologiques :

- Un ensemble inférieur (1000 m) à dominance argileuse correspondant au Berriasien supérieur Valanginien. On note que le Valanginien n'est seulement connu qu'au Djebel Azreg à Batna, presque au centre du massif montagneux.
- Un ensemble basal (1300 m) à dominance carbonate avec des calcaires micritiques et bioclastiques en bancs métriques (Tithonien supérieur-Berriasien moyen).
- Un ensemble médian (1400 m) à dominante grécodolomitique appartenant à l'Hautrivien-Barrémien.
- Un ensemble supérieur (700 à 750 m), comprenant à la base des dolomies et une alternance des grés, de calcaire à Orbitolines, puis des grés à stratifications obliques, des marnes gréseuses, des calcaires marneux et des calcaires au sommet, est attribué à l'Aptien-albien.

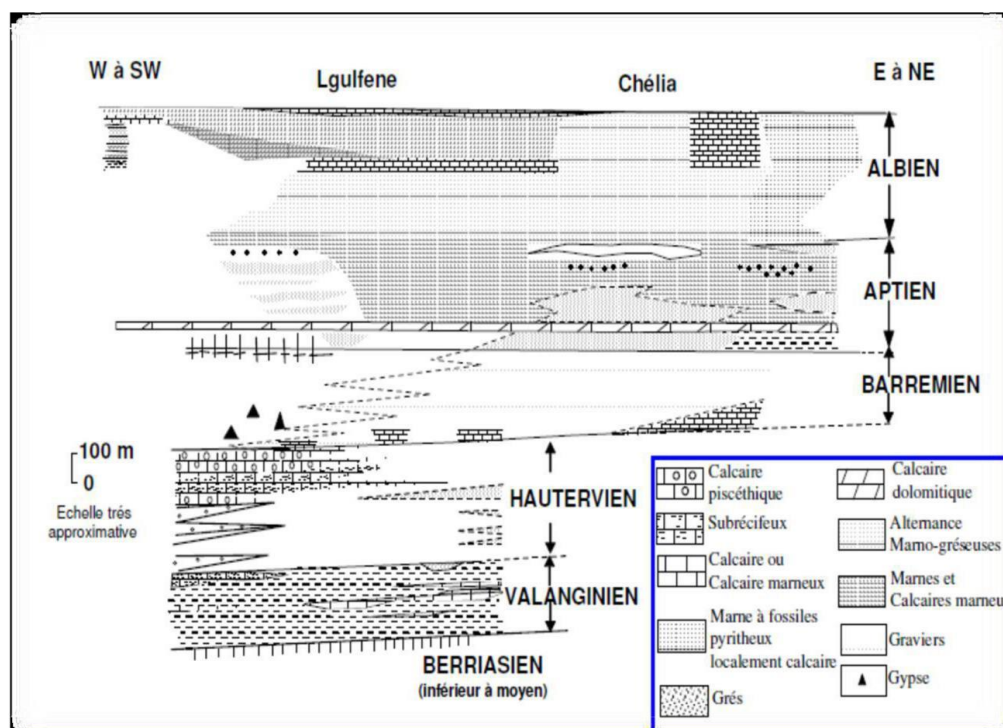


Fig.7 : Schéma illustrant les variations de faciès dans le Crétacé inférieur de l'Aurès d'après Laffitte, 1939 et modifié par Guiraud, 1973.

II-1-2-2- Crétacé supérieur

Il occupe une grande superficie à l'affleurement dans l'Aurès et forme l'essentiel des affleurements mésozoïques des confins de l'Aurès.

- Cénoomanien

Le Cénoomanien comporte une série de marnes grises dans lesquelles s'intercalent des calcaires fins argileux, une partie médiane formée de marnes grises, vertes ou ocres, contenant parfois du gypse diffus ainsi que des passées argileuses ;

Une série terminale constituée de marnes et de calcaires formant une corniche (proportion de ces derniers augmente vers le sommet)

Le Cénoomanien est présent dans tous les anticlinaux de l'Aurès. Il est essentiellement calcaro-marneux. La partie inférieure est surtout marneuse. La partie supérieure est constituée de bancs calcaires massifs, mais peu épais. L'épaisseur de

cette formation est très variable. Elle peut atteindre 500 à 600 mètres au cœur de l'Aurès.

- **Le Cénomaniens inférieur C1b** : Il est formé de marne grise bleutée accompagnée de biomicrites argileuses grises décimétriques parfois noduleuses, à niveaux glauconieux et empreintes d'Ammonites. Sur le flanc nord-ouest de Khenchela
- **Le Cénomaniens moyen C1a** : Une puissante série de marnes grises s'enrichissant de micrites gris blanchâtres à fins tests de lamellibranches et de gastéropodes, et juste au-dessus on a des marnes gris bleuté à biomicrites argileuses grises blanchâtre en bancs décimétriques.
- **Le Cénomaniens supérieur C1c** : Il correspond à une barre d'épais bancs calcaires à pâte fine et à cassure écailleuse, à aspect bitumineux et à films centimétriques de marnes gris bleu et avec au sommet un niveau de nodules pyriteux (cas du Djebel Chelia et Amrane).

-Turonien

Le Turonien comporte, en effet, au-dessus des marnes calcaires de base, un ensemble de marnes beiges et calcaires. Dans le Djebel Amrane, le Turonien est schisteux à la base, calcaire dans la partie moyenne, et Marno-calcaire au sommet. L'épaisseur du Turonien peut atteindre 800 mètres dans les faciès Marno-calcaires du cœur de l'Aurès, mais varie de 1000 à 300 mètres dans les calcaires.

Les dépôts de turonien sont constitués tout d'abord d'environ 200 m de marno-calcaires blanchâtre en plaquettes fines à cassures noirâtres bitumineuses ainsi que des marnes grises ou noires montrant des intercalations de marno-calcaires zoogène en bancs décimétriques, ensuite on a 150 m d'alternance de marnes gris beige et calcaires zoogènes noduleux en bancs décimétriques ou métriques (**Houha, 2007**).

-Le coniacien

Au Djebel Chettaia et sur la feuille de Chelia, cette série présente à la base sur 90 m par des alternances de marne beiges ou grises et de calcaire gris à ostracodes et de calcaires gris, bio détritique et grumeleux

- Santonien

Il se présente sous deux faciès différents. Au Djebel Knif et El Krouma un faciès récifal s'exprime largement, il s'agit de biosparites bréchiformes à éléments polygéniques grossiers et argileux centimétriques à décimétriques (calcaires, calcaires dolomitiques grés) plus ou moins bien roulés de couleur gris noir à brun roux avec amas d'Hippurites des algues et des débris de Rudistes. En outre de nombreux quartz bipyramides colorés sont visibles dans le ciment ainsi que des concrétions siliceuses. Alors que dans le synclinal de Djebel Aurès et à l'est de Djebel Chettaia, on a essentiellement des marnes gris bleu avec, à la base et au sommet des marnes calcaires en bancs décimétriques ou métriques riches en débris de Lino cérames.

- Campanien

Très visible dans les monts des Aurès et aux environs de Djebel Chettaia, Knif et Tafrent, et avec un affleurement timide autour de Djebel Tokhma et sur le versant est des Djebels Fedjidjet et Guern Ahmar, le Campanien contient des marnes noires avec de rares intercalations de calcaires ocres, crayeux et noduleux, légèrement phosphatés, en bancs décimétriques.

- Maestrichtien

Le Maestrichtien est assez différent ; il est subdivisé en :

- *Maestrichtien inférieur (à dominante marneuse) C6a* : Ce sont des marnes gris beige à débris de mollusques suivis d'alternances de marnes beiges et calcaires ocres zoogènes, grumeleux ou noduleux en bancs décimétriques et fossilifères.

- *Le maestrichtien supérieur (calcaire à Inocerames) C6b* : C'est une assise constante et homogène de calcaires massifs blanchâtres grumeleux en banc décimétrique à large stratification oblique à passées noduleuses et à rognons de silex, ils contiennent des Miliolidès, des insérâmes. L'épaisseur de ces formations ne dépasse pas les 95 m. Les principaux affleurements constituent les hauteurs de Djebel Chettaia et, le bord du Djebel Tafrennt et largement sur Dhalaa (C.G.G, 1969).

II-1-3- Miocène

-*L'Aquitano burdigalien* : À Djebel Amrane, il montre une discordance sur le crétacé, il s'agit de conglomérat, d'argiles silteuses rouges et de poudingues à gros éléments arrondis de calcaires et de grés quartzeux à ciment ferrugineux.

-*Langhien-séravalien* : Également discordant, il contient des marnes gris beige parfois silteuses et des calcaires gréseux roux à algues, cette série est plus ou moins condensée de biomicrites interclastiques gréseuses et glauconieuses d'aspect noduleux.

-*Tortonien inférieur* : Il se dispose en chenaux hectométriques et correspond à des grés grossiers en bancs plurimétriques à abondantes dragées de quartz (leur diamètre atteint 2 cm) et rares intercalations argileuses.

-*Tortonien supérieur* : Cette formation, beaucoup plus développée dans le bassin miocène de Timgad, n'affleure qu'aux alentours de Baghai. Ce sont des argiles silteuses avec des niveaux gréseux friables ferrugineux à rares dragées de quartz (leur diamètre est d'environ 0,5 cm) (villa, 1977).

II-1-4- Quaternaire.

Dans le bassin de Rémila, les terrains quaternaires présentent des faciès et des dispositifs assez variables qui résultent de la diversité de la lithologie et de la structure antérieures (figure 8).

Les formations quaternaires sont particulièrement bien développées dans les régions comprises entre les reliefs crétacés des monts des Aurès au sud et la dépression centrale du bassin de Rémila, établie principalement sur le Néogène.

Les piémonts sont ici généralement modelés en glacis à couverture détritique peu épaisse, dont les plus visibles sont situés au sud de Baghai et Kais, à matériel grossier. Ces glacis sont constitués au voisinage immédiat des reliefs par des alternances de couches de cailloutis et blocailles et de colluvions avec un enrichissement en calcaires dans les horizons superficiels (Houha, 2007).

Lorsqu'on s'éloigne du piémont, l'épaisseur des couvertures de glacis diminue rapidement. Les formations anciennes sont constituées par des alternances de conglomérats et de sables surmontés par des sédiments fins argile sableuse, rouge au sommet desquels apparaît une croûte calcaire blanche.

Des alluvions récentes constituent la plaine de Remila ainsi que les bas fonds des principales vallées provenant des reliefs environnants.

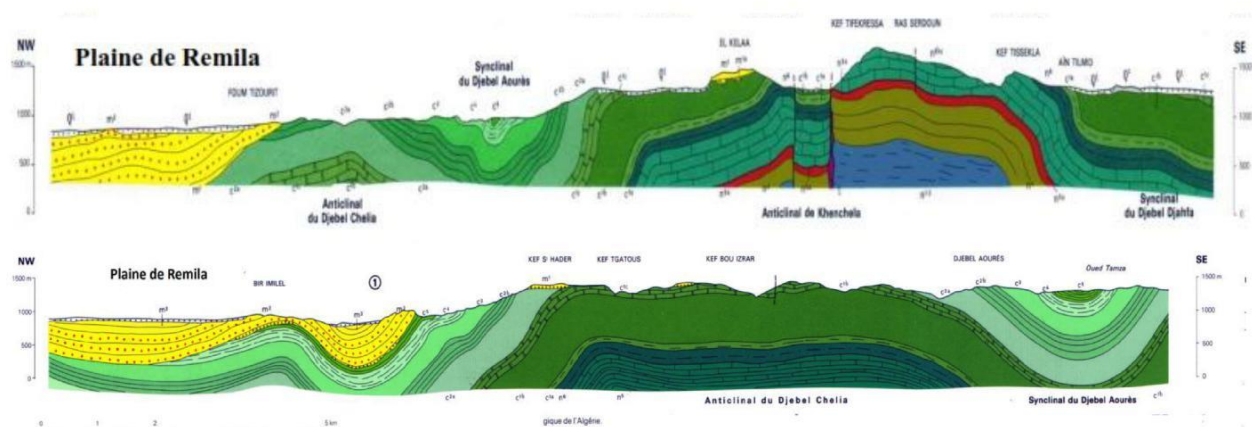
L'examen de quelques coupes de forges, montre que la sédimentation est en majeure partie argileuse et marneuse, avec une proportion importante de gypse et présente un maximum d'épaisseur au centre de la plaine et au voisinage du Chott (CGG, 1970).

Elles débutent par un conglomérat de base assez grossier, dont la puissance est irrégulière, de quelques mètres au Sud (Kais, Menzer) elle dépasse par exemple une vingtaine de mètres au centre. Au-dessus, des lentilles de galets et gravier roulés à éléments gréseux peuvent s'interstratifier au sein d'argiles sableuses qui forment l'essentiel du dépôt.

Superposé à cet ensemble vient une nouvelle formation qui comporte des passées de poudingues peu épais et plus fins, à sa base et qui surmontent des sables et sables argileux.

Au Sud du bassin, dans la région de Kais, le Plio-Quaternaire est constitué d'alluvions récentes formées de graviers et galets roulés à éléments gréseux sur une épaisseur de 3m 50. En dessous on trouve des alluvions marneuses d'épaisseur inconnue d'une épaisseur de 7m50. Les éboulis sont constitués par des blocs de grès toutes tailles. Un cône de déjection torrentiel qui occupe la partie sud-est et est formé de cailloux gréseux et d'argile sableuse d'une épaisseur de 3 m (Laffitte 1939 ; Villa 1977).

Coupe géologique au sud-est de la plaine de Remila



Coupe géologie au sud-ouest de la plaine de Remila



Fig. 8. Coupe interprétative dans le bassin de Remila d'après Villa (1977).

II-2- Tectonique locale

En Algérie le domaine Atlasique correspond essentiellement à deux grands ensembles morphologiques bien individualisés, l'atlas saharien à l'Ouest, Aurès-Nememcha à l'est, dont l'histoire géologique montre qu'ils appartiennent à une même chaîne (tableau 2).

- Le relief de L'Aurès a subi de nombreux dépôts et ses formes actuelles sont dues à l'élévation postpliocène. La phase de plissement maximum dans l'Aurès débute à la fin du Lutétien ; ils correspondent aux mouvements de l'orogénèse pyrénéenne (**Villa, 1977**).
- Le massif de l'Aurès serait affecté par une forte subsidence lors du Mésozoïque puis énergiquement plissée à la fin de l'Éocène moyen ; certaines parties du massif s'élèvent, d'autres s'affaissent. C'est dans celles-ci que se déposent les couches rouges, jusqu'à la fin du Pontien.
- Surrection vers la fin de l'Oligocène de l'ensemble de la chaîne, quelques plis et flexures de direction E-W se produisent alors dans les Aurès marqués par un substratum sédimentaire hérité des transgressions marines du secondaire et du tertiaire (**Bouafia, 2015**).
- Les mouvements post-burdigaliens ont modifié notablement les formations Miocènes marins et continentaux. Ainsi les grés burdigaliens en bordure sud de la plaine de Rémila sont révélés à 60-80 m entre Timgad et Kais et à 20-50 m à l'est de Kais. Ils présentent au sud-ouest de la plaine de Rémila une allure synclinale entre le flanc sud et le Djebel Amrane. La direction générale est-ouest et d'autre part coupée par des accidents orthogonaux.
- À la fin du Tertiaire, une phase d'érosion aboutit au façonnement des formes Crétacé et au comblement des dépressions par des dépôts continentaux.

Tableau 2. Colone lithostratigraphique synthétique des formations présentes dans la région de Khenchela

Ere	Période	Epoque	Étage	Lithologie	
M E S O Z O I Q U E	Trias	Trias		Argile, gypse, calcaro-dolométique	
	Crétacé	Crétacé inférieur	Berriasien	Marno-calcaire, dolomie, grès, calcaire, marne	
			Valanginien		
			Hauterivien		
			Barrémien		
			Aptien		
			Albien		
		Crétacé supérieur	Cénomannien		
			Campanien		
			Maastrichtien		
C E N O Z O I Q U E	Paléogène	Paléocène	Paléocène	Calcaire, argile, marne	
		Eocène	Eocène		
	Néogène	Miocène	Aquitannien	Argile, marne, grès, conglomérat	
			Burdigalien		
			Langhien		
			Serravallien		
			Tortonien		
	Quaternaire			Eboulis à blocs	Alluvion, regs, terrasses, sols bruns,
				Alluvions anciens	
				Glacis polygéniques	
Villafranchien					

Conclusion :

L'épaisseur considérable de sédiments accumulés dans les Aurès ; du trias au pliocène est due à la proximité du continent africain où l'action de l'érosion s'exerçant sur des surfaces considérables pouvait alimenter une sédimentation importante.

Les sédiments s'accumulaient dans le fossé qui se trouvait sur remplacement de l'Atlas saharien et qu'ils comblent au fur et à mesure de son approfondissement, ce qui fait que les sédiments bathyaux y sont très rares.

On distingue trois niveaux perméables :

- *Quaternaire* : Gravier, sable, grossiers galets et calcaires constituent l'essentiel de ces formations. Ces horizons perméables ont des épaisseurs variables (entre 10 m au sud et 30 m au nord de la plaine).
- *Tortonien* : gréseux, affleure que dans la partie nord (bassin de Touffana). Il constituer un bon aquifère.

· *Maastrichtien supérieur* : Les calcaires du Maastrichtien supérieur constituent l'élément essentiel de la région, ce niveau assez épais (150 mètres) ; et couvrant d'importantes superficies de calcaires bien fissurés et karstifiés (**durozoy, 1949**), au moins sur une certaine épaisseur ; il constitue un milieu favorable à l'accumulation des eaux souterraines et se présente comme le principal réservoir de la région.



CHAPITRE III
Principaux concepts

III-1- L'eau ; Concept et nature

L'eau est un corps, incolore, inodore, et insipide de formule H₂O. Elle est sous forme soit solide, soit liquide et soit gazeuse. Elle se trouve en général dans son état liquide et possède des températures ambiantes et des propriétés uniques. L'eau est un solvant désigné de « solvant universel ». L'eau que l'on trouve sur terre est rarement pure. Les chimistes utilisent de l'eau distillée pour leurs solutions, mais cette eau n'étant pure qu'à 99 %, il s'agit techniquement d'une solution aqueuse. Nous trouvons deux types d'eau :

III-2 -Formes de l'eau environnementale

Dans le milieu environnemental, l'eau est soit souterraine soit superficielle

L'eau dite souterraine est sous forme stockée à différent niveau de la couche superficielle terrestre. Elle est retenue entre deux niveaux géologiques imperméables. Elle peut se profiler entre ces deux couches et émerger plus loin ou elle s'écoule plus librement à la surface de la Terre (eau de ruissellement). Dans ce cas, son captage devient plus aisé et peut être utilisé à d'autres fins utiles.

Il s'agit d'une ressource facilement accessible, mais malheureusement fragile et vulnérable, la pollution la rendant souvent impropre à l'utilisation en l'absence d'un traitement préalable. **(Goudjil ; Bencheikeh, 2011).**

Les eaux qui ne sont ni ré-évaporées, ni retournées à la mer par ruissellement s'infiltrant dans le sol et sous-sol et s'y accumulent pour constituer les eaux souterraines. La pénétration et la rétention des eaux dans le sol dépendent des caractéristiques des terrains en cause et notamment de leur structure qui peut permettre la formation de réservoirs aquifères appelés nappes.

La surface supérieure de la nappe est appelée surface piézométrique. L'altitude de chaque point de cette surface est appelée niveau piézométrique qu'il ne faut pas confondre avec le niveau hydrostatique d'une surface d'eau libre. La forme de la surface piézométrique peut être déterminée par des sondages. Cette forme est fonction du niveau et du débit de l'exutoire que de la perméabilité du terrain.

La pénétration, la circulation, le séjour de l'eau dans les terrains dépendent à la fois de leur nature, de leurs structures élémentaires et des dispositions relatives des diverses couches géologiques. Parmi les paramètres de structure, citons : la répartition granulométrique, la porosité, la perméabilité. (Mebarki, 1982)

III.3- DISPOSITIONS NATURELLES DES

EAUX III-3-1 -l'eau des nappes

Selon les conditions géologiques, on peut distinguer deux types de nappes

-nappe active et,

-Nappe captive

III-3-1-1- Nappe active (ou nappe libre)

C'est une nappe due à la succession d'une couche imperméable surmontée d'une roche-magasin. L'ensemble du dispositif peut être affecté d'une pente plus ou moins forte. La nappe est alimentée directement par l'infiltration des eaux de ruissellement. Le niveau de cette nappe fluctue en fonction de la quantité d'eau retenue.

L'équilibre hydraulique entre pluviométrie et réserve est assuré par le trop-plein qui constitue les sources. Celles-ci apparaissent en des points particuliers dus principalement à la topographie de la couche imperméable. Le niveau supérieur de la nappe piézométrique s'établit uniquement en fonction de la perméabilité du terrain à travers lequel pénètre l'eau d'infiltration. (Laouar, 2012 ; Goudjil et Bencheikeh, 2011).

III-3-1-2- Nappe captive

Ce type de nappe est dû à l'enfoncement d'une roche-magasin par suite de la pente des couches géologiques. L'eau est enfouie dans le sol depuis des milliers ou des centaines de milliers d'années. Ces nappes sont exploitées par des forages profonds pouvant aller jusqu'à 2000 m. Toutefois, une nappe captive peut être alimentée en certains points là où le terrain aquifère affleure à la surface du sol ou vient se perdre dans une couche perméable. (Laouar, 2012 ; Goudjil et Bencheikeh, 2011).

III-4-POLLUTION DES EAUX

III-4-1- Concept pollution de l'eau

On appelle pollution de l'eau toute modification défavorable chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif sur les êtres vivants qui consomment des conséquences sérieuses sur leur santé. La pollution de l'eau peut aussi rendre l'eau inutilisable pour l'usage désiré.

III-4-2- Types de pollution

On distingue deux sources de pollutions à savoir :

*-*la pollution ponctuelle.*

*-*la pollution et la pollution diffuse.*

III.4.2.1-La pollution ponctuelle

Elle est formée de rejets localisés, plus ou moins abondants relativement faciles à identifier. Chronique ou accidentelle, cette pollution est provoquée par des déversements domestiques, urbains, ou industriels peu ou non traités. (**Messaoudi et birech, 2006 ; Bencheikh et Goudjil, 2011**).

III-4-2-1.1-La pollution urbaine (figure 9)

Les eaux usées urbaines transportent des corps en suspension et en solution comme les produits ménagers. Les stations d'épuration ne traitent que 65 % des eaux usées et ne traitent généralement pas les composés chimiques en solution.

Certains composés organiques notamment les phosphates sont à l'origine de déséquilibres des écosystèmes en favorisant par excès le développement de certains végétaux indésirables qui consomment de l'oxygène du milieu jusqu'à priver les animaux qui s'y trouvent. (**Messaoudi et Birech, 2006 ; Bencheikh et Goudjil, 2011**).



Fig.9 : Pollution urbaine

III-4-2.1.2-La Pollution industrielle

Une usine doit être équipée d'une station d'épuration (STEP). Un traitement primaire élimine les matières en suspension (résidus de lavage, corps gras, huiles), puis un traitement secondaire élimine les matières en solution (métaux lourds), réalité, seulement 65 % des eaux usées passent en station d'épuration ou le traitement secondaire n'est généralement pas mis en application (bien souvent pour des raisons de coût). (Bouguetit et Benhamida, 2015)

III-4-2-2-la pollution diffuse

Elle est due au lessivage et à l'érosion plus ou moins rapide et accusée des sols. Différentes substances sont entraînées vers les nappes et les rivières telles que les hydrocarbures, les métaux lourds, les pesticides. Cette pollution peut s'étendre sur de grandes surfaces. Elle est difficile à identifier et donc difficile à maîtriser (Messaoudi et Birech, 2006).

III-4-2-2-1-la pollution agricole (figure 10).

Les engrais apportent aux végétaux cultivés les éléments nécessaires à leur croissance notamment l'azote, le potassium, et le phosphore.

Les dérivés azotés (spécialement les nitrates) et les phosphates provoquent des déséquilibres dans les milieux qui reçoivent les eaux de ruissellement et les eaux

d'infiltration issues de l'agriculture en favorisant le développement des algues qui prennent place à toute forme de vie à cause de leur sur développement.

Les pesticides sont des produits chimiques destinés à détruire les champignons (fongicides), les vers de terre (hématicides) et les insectes (insecticides) qui parasitent les agricultures. **(Bouguetit et Benhamida, 2015)**



Fig.10 : Pollution agricole

III-4-2-2-la pollution atmosphérique

L'atmosphère terrestre s'il contient des polluants peut être une source non négligeable de pollution. En effet en cas d'orage les sols seront contaminés et le ruissellement et l'infiltration des polluants menacent à la fois les eaux superficielles et les eaux souterraines. Cette contamination qui risque d'être durable cause de grande difficulté de traitement **(Bouguetit et Benhamida, 2015)**.

III-5. Principaux polluants des eaux

III-5-1- Matières en suspension

Les matières en suspension sont de fines particules. Présentes naturellement dans l'eau des rivières pour certains (planctons, débris végétaux fins, minéraux), elles sont aussi des polluants d'origine humaine pour d'autres (matières organiques et minérales). Elles peuvent réduire la transparence de l'eau (turbidité), ce qui est néfaste pour la biologie des cours d'eau. **(Messaoudi et Birech, 2006 ; Lakhdari, 2008)**.

III-5-2 -Matières organiques

Certains rejets contiennent des matières organiques, ces polluants sont biodégradables, ils peuvent être transformés en eau et en Dioxyde de carbone (CO₂) par des micro-organismes (bactéries, algues), mais cette biodégradation consomme de l'oxygène, qui ne sera donc plus disponible pour la faune aquatique (poissons, crustacés...). C'est pourquoi l'on mesure souvent la pollution organique par « la demande biologique en oxygène » (DBO), autrement dit la quantité d'oxygène qui sera consommée par des micro-organismes pour sa biodégradation. On mesure également « la demande chimique en oxygène » (DCO), c'est-à-dire la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder tout ce qui peut l'être par voie chimique. (Bouguetit et Benhamida. 2015).

III-5-3 -Matières fertilisantes

La présence d'azote et de phosphore en quantité excessive dans les cours d'eau entraîne la prolifération d'algues qui diminuent la luminosité et surtout consomment l'oxygène dissous dans l'eau (phénomène d'eutrophisation). Cette pollution est produite par les eaux usées urbaines, certains effluents industriels, et le ruissellement des eaux chargées d'engrais apportées en excès aux cultures. (Messaoudi ; Birech, 2006)

III-5-4 -Polluants métalliques et polluants chimiques persistants

Certains polluants chimiques sont particulièrement persistants, ils résistent à la dégradation chimique et biologique. Avec les métaux lourds ils forment une famille de polluants très dangereux qui absorbés par des plantes ou des petits animaux, ils s'accumulent et se concentrent tout au long de la chaîne alimentaire, au sommet de laquelle se trouve l'homme (Messaoudi ; Birech, 2006).

III-5-5 -Sels minéraux

Présents naturellement dans l'eau en faible quantité, les sels minéraux (chlorures ou sulfates de calcium, de magnésium, de sodium ou de potassium) peuvent voir leur concentration s'élever à la suite de rejets industriels. Cela peut nuire à la biologie aquatique (Messaoudi ; Birech, 2006)

III-5-6 -Polluants microbiologiques

L'eau peut contenir des micro-organismes pathogènes (des virus, des bactéries, des parasites). Ils sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau (baignade, élevage de coquillage) (**Laouar, 2012**).

Enfin, le tableau ci-dessous (tableau 3) résume dans son ensemble et de façon succincte les types de pollution, leur nature et leur source.

Tableau 3: Types et sources de pollution

TYPES DE POLLUTION	NATURE	SOURCE
Physique		
pollution thermique	rejets d'eau chaude	centrales thermiques
pollution radioactive	radio-isotopes	installations nucléaires
Matière organique	glucides, lipides, protides	effluents domestiques, agricoles, agroalimentaires
Chimique		
Fertilisants	nitrate, phosphates	agriculture, lessives
métaux et métalloïdes	mercure, cadmium, plomb, aluminium, arsenic...	industries, agriculture, pluies acides, combustion
Pesticides	insecticides, herbicides, fongicides	agriculture, industries
Organochlorés	PCB, solvant	industries
composées organiques de synthèse	nombreuse molécules	industries
Détersifs	agents tensio-actifs	effluents domestiques
Hydrocarbures	pétrole et dérivés	industrie pétrolière, transports
M microbiologiques	bactéries, virus, champignons	effluents urbains et d'élevage

Source : Hachette., 1996.

III-6-Conséquences de la pollution

Les conséquences de la pollution sont nombreuses, notamment :

- Les matières organiques solubles abaissent la teneur en oxygène dans les cours d'eau, ce qui conduit à la réduction et à la mort de la faune aquatique.
- Les matières en suspension, s'accumule au fond des cours d'eau, lacs et étangs et cause l'augmentation de la turbidité.
- Les acides sont toxiques à la vie aquatique et détériorent les réseaux d'assainissement.

- Les huiles et les graisses flottantes conduisent au colmatage des conduites et donnent un aspect esthétique indésirable.
- Les matières toxiques et les métaux lourds sont toxiques à la vie aquatique.
- Le phosphore et l'azote conduit à l'eutrophisation des cours d'eau.
- Le phosphore est un élément limitant la croissance des plantes et du phytoplancton.
- Les coliformes fécaux et les microorganismes pathogènes participent à la contamination bactériologique des cours d'eau (**Bouguetit ; Benhamida, 2015**)

III-7- Vulnérabilité

III-7-1- notion de la vulnérabilité

La vulnérabilité est le caractère de ce qui peut être attaqué, blessé ou endommagé. Le terme « *vulnérabilité* » traduit la fragilité ou la sensibilité d'un système face à une menace externe : pollution, événements socio-économiques, aléas climatiques, etc. Ce terme vulnérabilité a été utilisé historiquement depuis les années 50 notamment dans les domaines des sciences humaines, de la protection sociale et de la médecine. En hydrogéologie, la notion de vulnérabilité a été introduite par Margat vers la fin des années 60 (**Margat, 1968**). Le concept de vulnérabilité repose sur l'idée que le système hydrogéologique procure une protection naturelle de la nappe d'eau souterraine contre les menaces de pollution. La toutefois, variété des conditions naturelles faite que les eaux souterraines sont inégalement protégées. À partir des années 1980, ce concept a évolué en ajoutant aux caractéristiques du milieu physique naturel les sources et la nature des polluants susceptibles de migrer vers la nappe et détériorer la qualité de ces eaux (**Margat, 1968 ; Albinet et Margat, 1970 ; Olmer et Rezac, 1974 ; Foster, 1987 ; Civita, 1990 ; Aubre, 1992 ; EPA, 1993 ; Vrba et Zaporozec, 1994 ; Amharref et al, 2007**). Ce concept a évolué ensuite à travers le monde et a donné lieu à de vulnérabilité des eaux souterraines. En 1970, Albinet et Margat, l'ont définie comme étant la possibilité de percolation et de diffusion de polluant depuis la surface du sol jusqu'à la nappe, dans des conditions naturelles, et par la suite plusieurs définitions ont été données. Certains auteurs ont proposé des définitions directes, d'autres ont seulement indiqué les paramètres qui doivent être pris en compte pour son évaluation. En effet,

la vulnérabilité d'une eau souterraine à la pollution est une notion relative sans dimension et non mesurable (Vrba et Zaporozec, 1994). Elle diffère d'un concepteur à l'autre selon la diversité du territoire et les particularités du milieu physique dans lequel elle a été conçue. Vernoux et al en 2007 ont également défini la vulnérabilité comme une notion indépendante du temps et que les conditions de protection des eaux souterraines, du sol et à la surface de la nappe sont invariables

III-7-2 -Origine de la vulnérabilité des eaux souterraines

D'après Cazaux (2007), le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur un modèle « origine – écoulements – cible ». Ce modèle est repris et détaillé en particulier dans un projet européen traitant de la protection des aquifères, l'action COST620. (Zwahlen, 2003).

L'origine de la contamination : c'est le lieu d'infiltration du polluant au niveau de la surface du sol. Cette approche ne tient pas compte des pertes ou fuites de réseaux des eaux usées.

L'écoulement : c'est le trajet du contaminant à travers le milieu naturel, c'est à dire sa composante verticale au sein de la zone non saturée. Si l'objet de la protection est le point de captage d'eau (puits, forage, exutoire), il faut également prendre en compte l'écoulement au sein de l'aquifère.

La cible : est l'eau souterraine faisant l'objet d'une protection. Il peut s'agir soit du toit de la nappe, soit du captage d'eau.

III-7-3 -différents types de vulnérabilité

La vulnérabilité intrinsèque : c'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. Elle ne tient compte que des facteurs physiques influençant le mouvement d'un polluant vers la nappe (Landreau, 1996 in Cazaux, 2007 ; Schnebelen et al, 2002).

La vulnérabilité spécifique : c'est le terme 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 (*Schnebelen et coll. 2002 in Bézèlques et coll., 2002*).

III-7-4 -Critères de vulnérabilité intrinsèque

Les critères de la vulnérabilité intrinsèque, et ce selon l'état de la zone saturée ou non une fois soumise à la pollution, sont présentés dans le tableau suivant (tableau 4).

Tableau 4 : les Critères de vulnérabilité intrinsèque (Vrba et Civita, 1994)

	Vulnérabilité intrinsèque (naturelle)			
	Critères essentiels			
paramètres	Sol	Zones non saturée	Aquifères (zone saturée)	Recharge
Principaux	-Texture -Structure -Epaisseur -Tau de matière -Teneur en argile -Perméabilité	-Epaisseur (par rapport aux niveaux piézométriques -Lithologie (en tenant compte de la structure et de la stratification de la roche -Temps de Transfer de l'eau	-lithologie (en tenant compte de la structure et de la stratification de la roche) -Epaisseur -porosité efficace -perméabilité -sens d'écoulement des eaux souterraines -temps de résidence et âge des eaux souterraines	- Taux de recharge annuelle nette - Précipitations - Annuelles
complémentaires	-Capacité d'échange -Cationique -Capacité de réduction et de sorption -Carbonate -Densité apparentes -Humidité capacité au champ -Prélèvement d'eau par les racines -Réaction de transfert d'azote	-Teneurs en eau -Perméabilité	-inaccessibilité hydraulique -capacité d'emmagasinement -transmissivité	-Evaporation -Evapotranspiration -température de l'air

III.8-La méthode DRASTIC

III.8.1-Présentation de la méthode DRASTIC

La méthode DRASTIC est une méthode d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines indépendamment du type de polluant. Elle a été développée en 1987 aux États-Unis par la National Water Well Association (Aller et al, 1987) pour le compte de l'Agence américaine pour la Protection de l'Environnement (US EPA). L'objectif était de réaliser une méthode d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque applicable aux conditions hydrogéologiques rencontrées aux États-Unis. Elle évalue la facilité avec laquelle la pollution peut transiter à travers le sol et la zone non saturée pour atteindre la surface de la nappe, en se basant sur sept paramètres. Elle considère que le type de contaminant n'intervient pas dans la définition de la vulnérabilité et que le comportement du polluant depuis la surface du sol jusqu'à la zone saturée est le même que celui d'une eau de précipitation.

III-8-2- Paramètres de la méthode DRASTIC

L'acronyme anglais défini par les sept paramètres cités ci-après forme l'appellation DRAS'TIC à savoir :

[D] : Depth To water (profondeur de la nappe).

[R] : nette Recharge (infiltration efficace).

[A] : Aquifer média (milieu aquifère).

[S] : Soil media (type de sol).

[I] : Impact of vadose zone (impact de la zone non saturée)

[C] : hydraulique Conductivity (Conductivité hydraulique).

III-8-3 -Indice de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC

Le modèle DRASTIC a été originalement développé aux États-Unis afin de permettre l'évaluation du potentiel de pollution des nappes d'eau souterraine (Aller et al, 1987). Son indice numérique représente la somme pondérée des notes correspondant aux sept paramètres hydrogéologiques de la méthode. L'indice DRASTIC est calculé par la sommation pondérée du produit des côtes et des poids pour chacun des paramètres en appliquant la relation (1) suivante :

$$I \text{ DRASTIC} = DnDp + RnRp + AnAp + SnSp + TnTp + InIp + CnCp [1]$$

Où :

n notations accordées à chaque paramètre ;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

L'indice DRASTIC final obtenu permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe et il varie entre 23 et 226. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice [I DRASTIC] calculé est élevé.

III-9- Système d'information Géographique (SIG)

III.9.1-Portée de la méthode SIG

Les Systèmes d'Information géographique (SIG) sont des outils performants par excellence pour l'étude de l'environnement et la modélisation spatiale des phénomènes naturels (**Goodchild, 1996**). Ils permettent l'analyse et le traitement de grandes masses de données spatiales et facilitent également l'élaboration des cartes de vulnérabilités des aquifères. En effet, ces logiciels facilitent les analyses multicritères et les mises à jour des modèles élaborés (**Kaid Rassou, 2009**). Le Système d'Information géographique (SIG) compte parmi les nouvelles techniques informatiques destinées au domaine de prévision et d'intervention puisqu'il répond à une problématique de gestion, de planification et d'aménagement (**Gaaloul, 2009**). Pour la réalisation de cartes de vulnérabilité, plusieurs logiciels peuvent être utilisés notamment ceux à systèmes matriciels (format raster), ceux à systèmes vectoriels et les logiciels permettant l'utilisation des deux systèmes.

Le SIG contient un ensemble de données alphanumériques et de données spatiales. Ces données sont stockées soit sous format vectoriel, soit sous format raster. Le format vectoriel gère les points, les lignes et les polygones, les vecteurs sont complétés par des informations alphanumériques. Les données raster sont stockées sous forme de cellules formant une maille et peuvent aussi être complétées par des données alphanumériques telles que la moyenne, le max, le min, la somme de grandeurs géographiques. Les données nécessaires à la réalisation des cartes thématiques des différents paramètres utilisés par les deux méthodes DRASTIC, ont été acquises de plusieurs sources et converties par le Système d'Information

géographique (Arc Gis) sous forme de cartes thématiques relatives aux paramètres nécessaires à la réalisation des cartes de vulnérabilité correspondantes aux méthodes utilisées : DRASTIC.

III.9.2-Composantes d'un SIG

Les utilisateurs (spécialiste en géomatique, géographe...)

- *Les processus de travail* (principes et méthodes) (méthodes de collecte de données, de structuration et d'entreposage, norme intégrité des données...)
- *Les données géographiques structurées* : Base de données à référence spatiale [accès, qualité et sécurité des données] ; sources fiables (ANSD, ANAT, CSE...).
- *Le matériel physique* (tels les ordinateurs, serveur, tablette électronique...)
- *Les logiciels* (ArcGIS, QGis, MapInfo...) (**Manga. 2015**).

Nous présentons ci-dessous les composantes d'un système d'information géographique (figure 11).



Fig.11. Les composantes d'un système d'information géographique

III-10-Apport des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Dans l'optique de la gestion des risques naturels et anthropiques, les systèmes d'informations géographiques (SIG) apportent des informations localisées et

objectives irremplaçables. Dans un premier temps, ils permettent de gérer une multitude d'informations de tous types, de les mettre à jour, d'optimiser leurs échanges et de générer de nouvelles couches d'informations par le biais de leurs croisements. En second lieu, ils assurent la restitution des cartes thématiques et les analyses qui en résultent.

Le SIG compte parmi les nouvelles techniques informatiques destinées au domaine de prévision et d'intervention puisqu'il répond à une problématique de gestion, de planification et d'aménagement. Il offre les possibilités de croisement au sein d'une base de données spatialement référencée de façon à extraire commodément des synthèses utiles à la décision (**Eastman, 1995 ; Duchaine, 1998 ; Hentati et al, 2005**).

L'apport du SIG dans les études de vulnérabilité des nappes permet d'aborder les risques de la pollution des eaux souterraines, d'aider à limiter ce risque par une meilleure planification et une intervention efficace sur le terrain afin de préserver la qualité de la ressource. Toute méthode d'évaluation de la vulnérabilité doit être combinée à un SIG pour déterminer les zones susceptibles d'altérer la qualité de l'aquifère à partir de la superposition des cartes thématiques des paramètres pris en compte par la méthode concernant les caractéristiques naturelles de l'aquifère d'une part, les types d'occupation du sol et les différentes activités d'autre part (**Hentati et coll., 2005 ; Chloé, 2007**).



CHAPITRE IV

Cartographie de la
vulnérabilité
intrinsèque de la nappe
de Remila

Introduction

Parmi les nombreux outils cartographiques à la disposition de toute personne responsable de la gestion de ressources en eaux souterraines ou de l'aménagement du territoire, la carte de vulnérabilité est ainsi un des éléments-clés pour la protection et la gestion des ressources en eau (Ducommun, R 2010). Les cartes de vulnérabilité permettent ainsi de représenter une multitude de données en provenance de sources variées, en les modulant en un nombre limité d'indices relatifs de vulnérabilité. Concrètement, la cartographie de vulnérabilité établit une représentation spatiale 2-D du degré de vulnérabilité d'un aquifère donné à une contamination potentielle, basée sur les attributs hydrogéologiques, géomorphologiques et hydrologiques (climat, pluviométrie) de celui-ci.

IV-1 Choix de la méthode

Il n'existe pas de méthode absolue d'évaluation de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine, mais plusieurs méthodes qui ont été mises au point (**Murat et al, 2000**). Dans le cadre de la présente étude, la méthode DRASTIC a été choisie pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines (**Aller et al, 1987**).

La méthode est basée sur l'évaluation de sept paramètres : profondeur de la nappe (D), recharge (R), type d'aquifère (A), type de sol (S), topographie (T), impact de la zone vadose (I) et conductivité hydraulique (C) (tableau 5).

Tableau 5 : Données utilisées pour l'élaboration des sept paramètres DRASTIC.

Paramètre	Source de données	Type de données	Mode de traitement
profondeur de la nappe	Fiche technique des forages	Point	interpolation
Recharge nette	Carte hydro-climatique et pédologique	Point	interpolation
Lithologie de l'aquifère	Coupe lithologique des forages	Polygone	interpolation
Sol (Texture)	La carte pédologique de	Polygone	Digitalisation

	Tebessa 1938		
Topographie	Le modèle numérique de terrain MNT (http://earthexplorer.usgs.gov)	Polyline	Digitalisation
Zone non saturée	Coupes lithologiques des forages.	Polygone	interpolation
Perméabilité	Les essais de pompage	point	interpolation

Pour chaque paramètre, la plage de valeurs possibles est subdivisée en différents intervalles et une cote est attribuée à chacun d’eux. Un indice de vulnérabilité (IDRASTIC) est alors calculé en additionnant la contribution des sept paramètres, pondérée selon l’importance de chacun de ces paramètres dans l’évaluation de la vulnérabilité, à l’aide de l’équation :

$$IDRASTIC = DwDr + RwRr + AwAr + SwSr + TwTr + IwIr + CwCr.$$

IV-2 -Matériels et méthode

La carte de vulnérabilité de la plaine de Remila est réalisée au moyen d’un SIG. Les fichiers traités et utilisés pour les additions d’indices sont en format raster à valeurs entières, avec une taille de cellule de 30 m. le logiciel ArcGis (ESRI inc.) a été utilisé. C’est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d’utilisation des systèmes d’informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l’éducation et des médias. ArcGIS Desktop comprend une suite d’applications intégrées : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox. À l’aide de ces trois applications, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée.

L’ensemble des données cartographiques présentées dans cette étude a été porté dans une base de données géographique au format ArcDesktop. Une fois les données spatiales ont été compilées selon l’organigramme ci-dessous (figure 11), il a été calculé les indices à partir de la répartition géographique des scores pondérés

attribués aux sept paramètres DRASTIC. La classification de ces indices en fonction des classes DRASTIC permet de spatialiser la vulnérabilité relative de chaque secteur étudié.

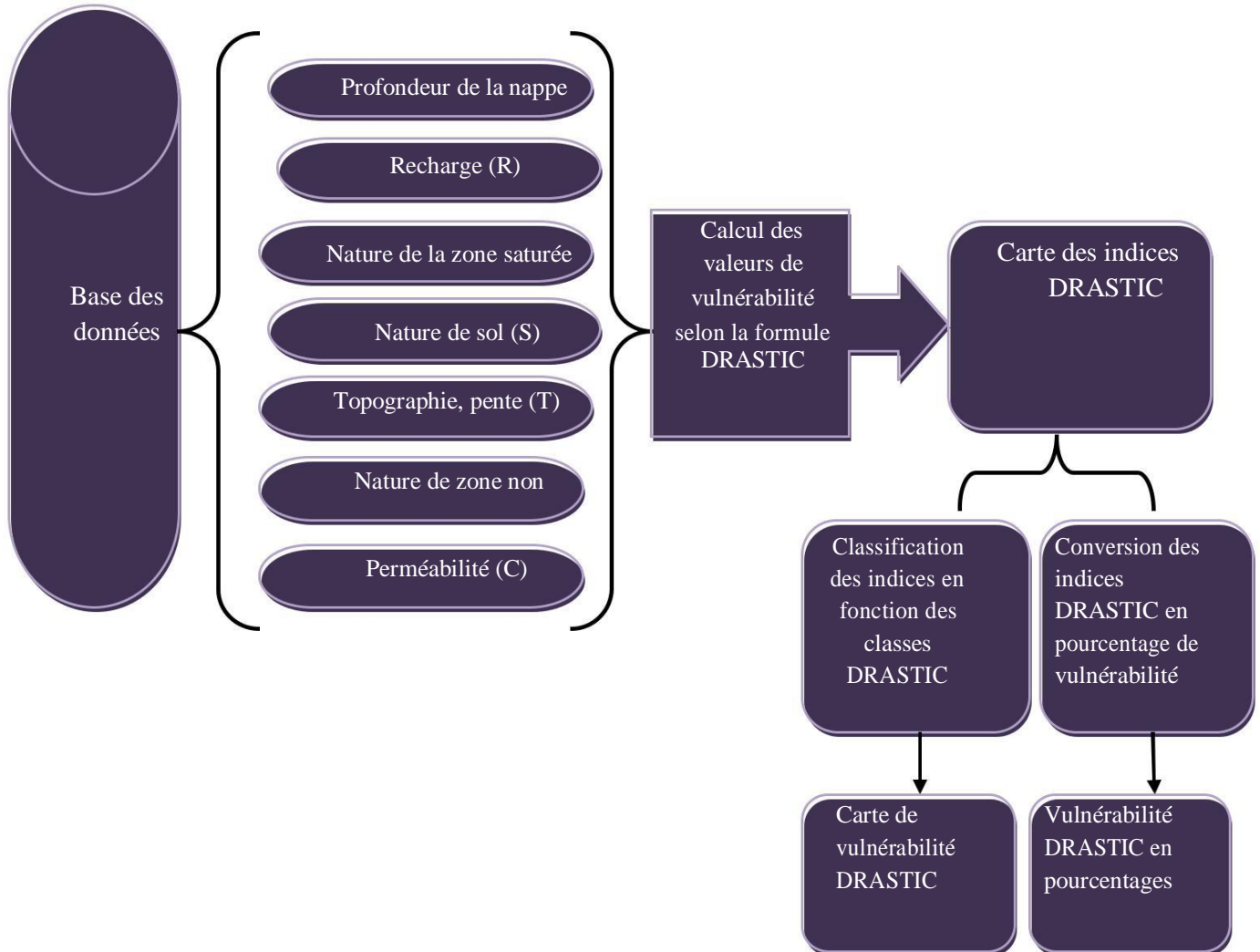


Fig.12-Organigramme présentant les étapes de réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC

IV-2-1 -Description de la méthode DRASTIC.

La méthode DRASTIC exige la caractérisation détaillée des unités hydrogéologiques du territoire à cartographier, notamment la définition des sept paramètres physiques qui interviennent dans les phénomènes de transport et d'atténuation des contaminants. L'importance relative de chaque facteur est évaluée

par un poids fixe, variant entre une valeur de 5 pour les facteurs les plus significatifs et une valeur de 1 pour les facteurs les moins significatifs (Tableau 6).

Tableau 6 : Paramètres utilisés par le modèle DRASTIC (Aller et *al.* 1996)

Symbole	Paramètre	Propriétés	Poids
D	Profondeur de la nappe	Plus l'épaisseur de la zone non saturée est élevée, plus le contaminant et beaucoup de temps pour atteindre la nappe.	5
R	Recharge nette	plus la lame d'eau infiltrée est grande, plus le risque de contamination est élevé.	4
A	Lithologie de l'Aquifère	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.	3
S	Sol	Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.	2
T	Topographie	Plus la pente des terrains est grande, plus la recharge est importante et par conséquent la contamination des eaux souterraines est élevée.	1
I	Zone non saturée	La percolation du polluant jusqu'à la nappe est d'autant plus grande que cette texture est favorable (graviers, sables grossiers...)	5
C	Perméabilité	Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide	3

IV-2-2 -Système de notation appliqué

Pour chacun des paramètres DRASTIC, une note est affectée sur une échelle entière allant de 1 (le moins important) à 10 (le plus important). Pour un paramètre donné, une note basse implique que la nappe concernée n'est pas vulnérable à la pollution et vice-versa.

L'échelle étant entière (discrète), il est donc naturel que les valeurs obtenues pour chacun des paramètres soient regroupées en classes ayant chacune un nombre unique.

Les tableaux suivants montrent les notes typiques attribuées à chacun des sept paramètres (tableau 7) et les indices (tableau 8)

Tableau 7 : Cotes accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC

Profondeur du plan d'eau (D) (m)		Recharge efficace (R) (mm/an)	
0 – 1,5	10	0-50	1
1,5 – 4, 5	9	50-100	3
4,5 – 9	7	100-180	6
9 – 15	5	180-250	8
15 – 23	3	> 250	9
23– 31	2		
>31	1		
Lithologie de l'aquifère (A)		Nature du sol (S)	
Calcaire karstique		Peu épais ou absent	10
Basalte		Gravier	10
Sable et gravier		Sable,	9
Calcaire massif		Argile, agrégats ou	7
Grès massif		pentons Limon	6
Shales en séquence		sableux	5
Métamorphique altéré,		Limon	4
grès lités, calcaires		Limon silteux	3
Métamorphique		Limon argileux	1
Shale massif		Argile non agrégée et non fissurée	
Pente du terrain (T) (%)		Lithologie de la zone non saturée (I)	
0-2	10	Calcaire karstique	10
2-6	9	Basalte	9
6-12	5	Sable et gravier	8
12-18	3	Sable et gravier avec silt et argile	6
> 18	1	Calcaire lité, grès, shale Grès	6
		Calcaire	6
		Shale	3
		Silt/argile	1
Conductivité hydraulique (C) (m/j)			
0,04-4		1	

4-12	2
12-29	4
29-41	6
41-82	8
>	10

Tableau 8 : Indices de degré de vulnérabilité. Engel *et al*, 1996.

L'indice DRASTIC	dégré de vulnérabilité
23-83	Très faible
84-113	Faible
114-144	Moyen
145-174	Élevé
175-226	Très élevé

IV-3 -Résultats et discussions

IV-3-1 Profondeur de la nappe (D) (figure 13 et tableau 9) :

Le paramètre profondeur à la nappe représente la distance verticale traversée par un contaminant depuis la surface du sol jusqu'à la nappe. La profondeur du plan d'eau est un paramètre important, elle détermine l'épaisseur des matériaux à travers lesquels un contaminant peut circuler avant d'atteindre le plan d'eau.

D'après Vrba et Zaporozec (1994), généralement, la protection potentielle de l'aquifère augmente avec la profondeur de la nappe. Ce paramètre a été obtenu par interpolation sur 12 puits.

Dans notre zone d'étude la carte de la profondeur à la nappe, peuvent être réparties généralement en trois zones principales : La partie nord-est de la plaine la profondeur a la nappe est inférieur à 9 m. Au Sud-ouest de la plaine la profondeur a la nappe est supérieur a 22 m. dans le reste de la zone d'étude la profondeur a la nappe est comprise entre 9 et 22 m.

Tableau 9 : Codification des classes la profondeur.

Profondeur de la nappe « D »	
Profondeur à la nappe (m)	Cotes
1,5-4,5	9
4,5-9	7
9-15	5
15-22	3
22,5-30	2
>30	1

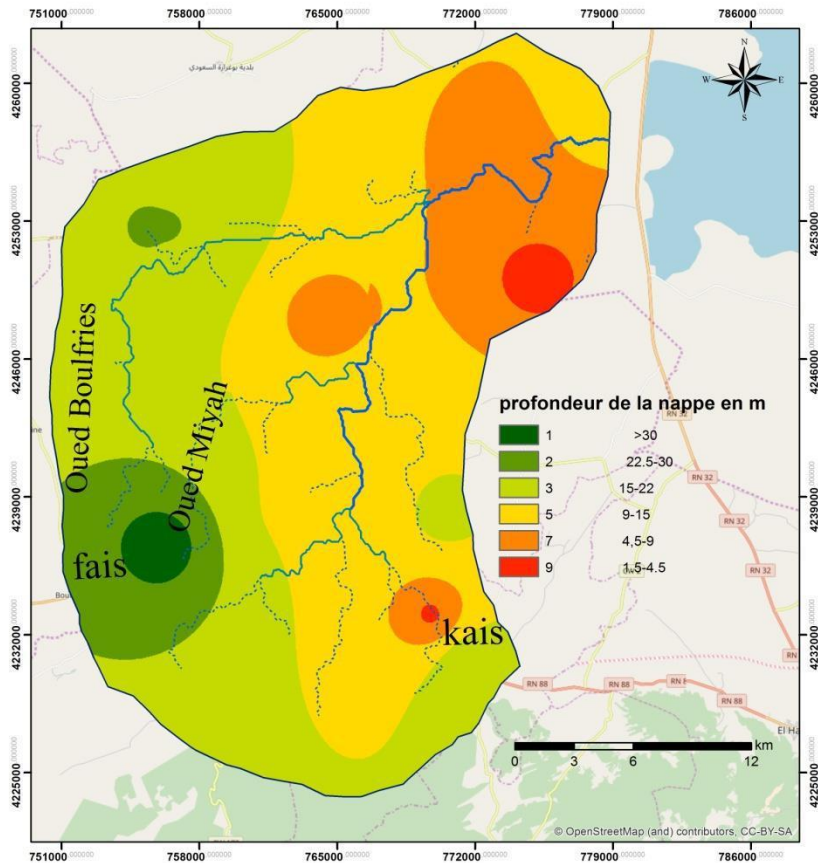


Fig.13 : Carte de profondeur de la nappe de Remila

IV-3-2. La recharge (R) (figure 14 et tableau 10) :

La recharge des eaux souterraines est le flux d'eau qui atteint la nappe phréatique, formant un ajout dans le réservoir des eaux souterraines pendant une période de temps spécifiée. Cette eau permet de transporter le polluant, de la surface

de la terre vers la zone saturée en traversant la zone non saturée. Généralement, plus la quantité d'eau est importante, plus la possibilité de contaminer la nappe est élevée. Elle est généralement exprimée en recharge nette annuelle. La quantité et la qualité de recharge affectent de manière significative les processus physiques et chimiques dans le système sol-roche souterraine (**Vrba et Zaporozec, 1994**).

Il s'agit d'une notion complexe qui dépend d'un grand nombre de processus et de facteurs tels que les précipitations, les caractéristiques du sol, la végétation, l'utilisation des terres et la topographie.

La recharge nette dans la zone d'étude est obtenue selon la méthode **Williams and Kissel (1991)**. Cette méthode a été appliquée pour plusieurs zones semi-arides aux états unis.

La recharge, **R**, est calculée selon cette méthode avec les équations suivantes correspondantes à différents groupes hydrologiques de sols : $R = (P - 10.28) / (P + 15.43)$ → groupe hydrologique A.

$R = (P - 15.05) / (P + 22.57)$ → groupe hydrologique B.

$R = (P - 19.53) / (P + 29.29)$ → groupe hydrologique C.

$R = (P - 22.67) / (P + 34.00)$ → groupe hydrologique D.

Où **P** est la somme des précipitations annuelles et irrigation, exprimée en pouces. Les quatre groupes hydrologiques A, B, C et D correspondent aux types de sols classés en fonction de leur infiltration (**Viessmann et coll. 1977**).

•**Groupe A** : les sols qui ont un taux d'infiltration très élevé même si elles sont complètement mouillées

•**groupe B** : les sols avec une vitesse d'infiltration modérée lorsqu'il est complètement mouillé.

•**Groupe C** : les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration lente lorsqu'il est complètement mouillé

•**Groupe D** : les sols caractérisés par une vitesse d'infiltration très lente lorsqu'il est complètement mouillé.

La carte hydrologique des sols a été tirée de la carte générale des sols de Tebessa 1 : 100 000. Deux groupes des sols ont été identifiés ; le premier représente la majeure partie de la zone d'étude (en rouge) ou la recharge est de l'ordre de 200 mm, et la deuxième partie (en vert) la recharge est inférieure à 100 mm.

Tableau.10 : Codification des classes Indice de la recharge

Recharge « R »	
Recharge « R » (cm)	Cotes
25,5	9
5-10	3

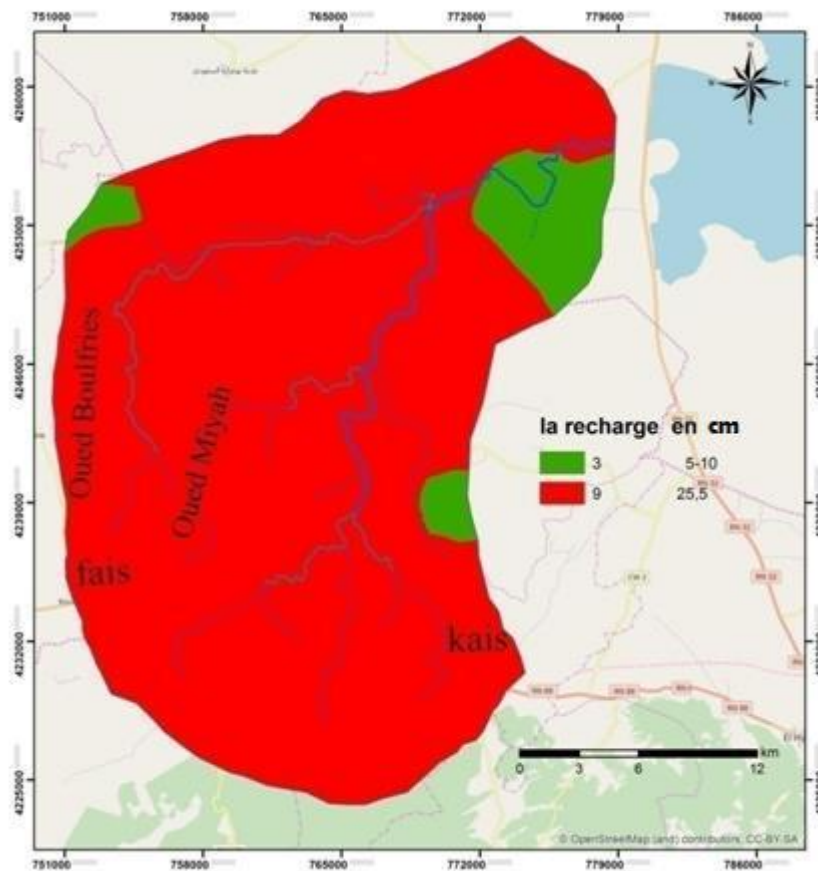


Fig.14 : Carte de recharge de la plaine

IV-3-3 La zone saturée (A) (figure 15 et tableau 11) :

La zone saturée constitue un système hétérogène, et sa vulnérabilité devrait être différenciée horizontalement (zones d'alimentation et d'évacuation) et verticalement (oxydation, zones de réduction) et conformément au système d'écoulement souterrain existant, d'extension géographique (régionale ou locale) ou de profondeurs variées (superficielles ou profondes) (Vrba et Civita, 1994). Les principaux paramètres pour l'évaluation de la vulnérabilité comprennent la nature de l'aquifère, la porosité, la perméabilité, les propriétés d'emmagasinements et la taille des grains. En général plus

la taille des grains sont élevée, plus la perméabilité augmente et la capacité d'atténuation ce diminué.

Les cartes du paramètre lithologie de la zone saturée « A » sont représentées par des indices entre 1 et 5. En effet, dans la zone d'étude, la nappe circule dans des couches de marne calcaire située dans Sud- est et le Nord –ouest de la plaine. Dans le reste de la nappe, la lithologie de l'aquifère, constituée généralement par un mélange de gravier et argile, ainsi que des fragments de calcaires, et occupe une grande surface de la nappe.

Tableau 11 : Codification des classes de la zone saturée

Nature de l'aquifère « A »	
Nature de l'aquifère	Cotes
Calcaire	5
Argile gravier	4
Argile marneuse, gravier	3
Marno-calcaire	2
Argile	1

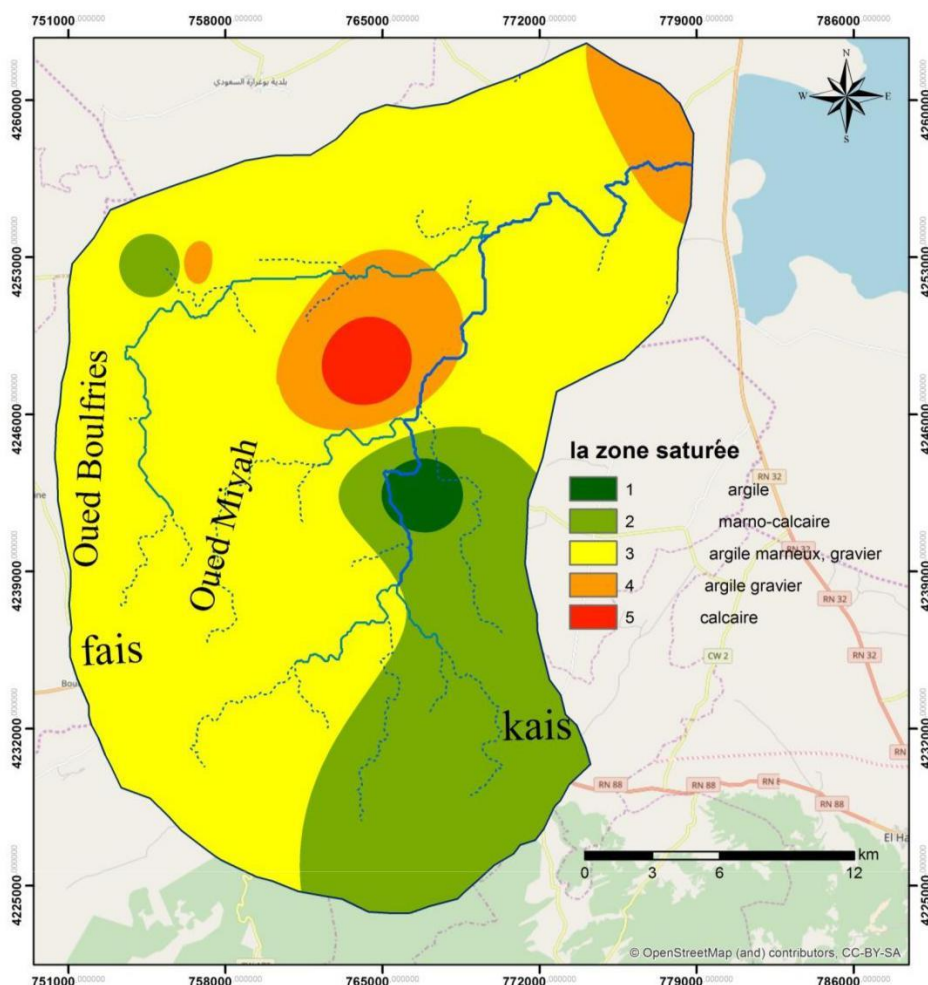


Fig. 15 : Carte lithologique de la zone saturée.

IV-3-4 Type du sol (S₂) (figure 16 et tableau 12) :

Le sol a un impact considérable sur la quantité et la qualité de l’eau susceptible de s’infiltrer pour atteindre la nappe et par conséquent sur la migration verticale des polluants à travers la zone non saturée (Sener et al, 2009). Le sol influence ainsi, le temps de migration des contaminants vers la nappe (Al Hallaq et Elaish, 2011).

La présence des matériaux fine réduit l’infiltration et par conséquent réduit le pouvoir polluant. Les sols riches en argile et limon ont une grande capacité de rétention d’eau et donc diminue le temps de migration des polluants à travers la zone non saturée (Ben Kabbour et al, 2006).

Dans la plaine de Remila, la carte des sols est obtenue à partir de la carte générale des sols de Tebessa (1 : 500 000). Les notes attribuées pour chaque profil

oscillent généralement entre 3 et 10. La carte de la répartition spatiale des notes accordées montre que les sols caractérisés par l'indice 10 (sol calcaire fissuré) et occupent généralement le Sud et Nord de la plaine. Les (argiles agrégat) prennent un indice de 7, et occupent le Nord, et le Sud aussi. Pour les sols limoneux sableux et limoneux argileux, elles recouvrent la majeure partie centrale de la plaine ou un indice entre 3 et 6 est attribué.

Tableau 12 : Codification des classes types de sol.

Type de sol « S »	
Texture	Cotes
Sol calcaire fissuré	10
Argile agrégat	7
Limon sableux	6
Limon argileux	3

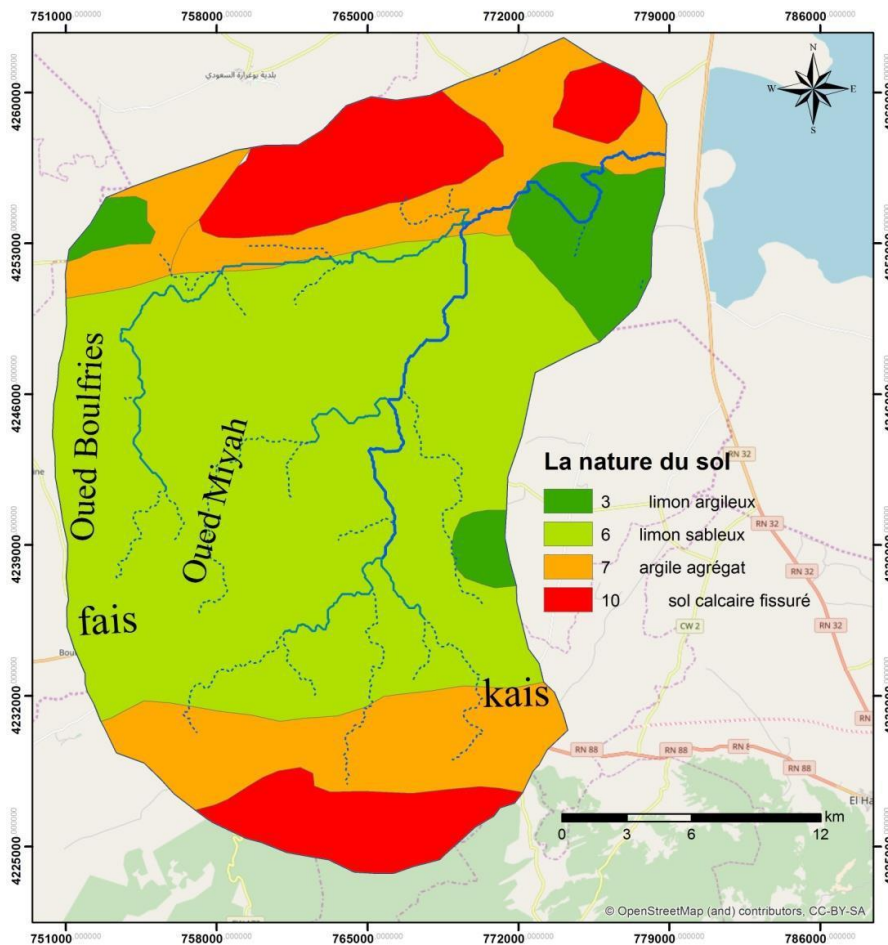


Fig.16 : Types de sol dans la région de Remila

IV-3-5 Topographie (T) (figure 17) (tableau 13)

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. En utilisant l'extension « slope » dans « Spatial Analyst tools » la carte de pente a été générée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT), téléchargé librement du site (<http://earthexplorer.usgs.gov>) avec un maillage de 30 m X 30 m.

La définition des classes de pente (T) a été basée selon la notation accordée par Lallemand Barrés, 1994. Les classes ainsi retenues pour le paramètre pente « T » sont récapitulées dans le tableau 13.

La carte des pentes obtenue montre deux zones topographiques, la première couvre le nord et le Sud de la plaine ou la pente varie entre 12 à >18 %, la deuxième zone couvre le reste de terrain avec une pente entre 0 à 12 % avec une dominance des pentes de 0-2 %.

Tableau 13 : Codification des classes de la topographie.

Topographie « T »	
Pente (%)	Cotes
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

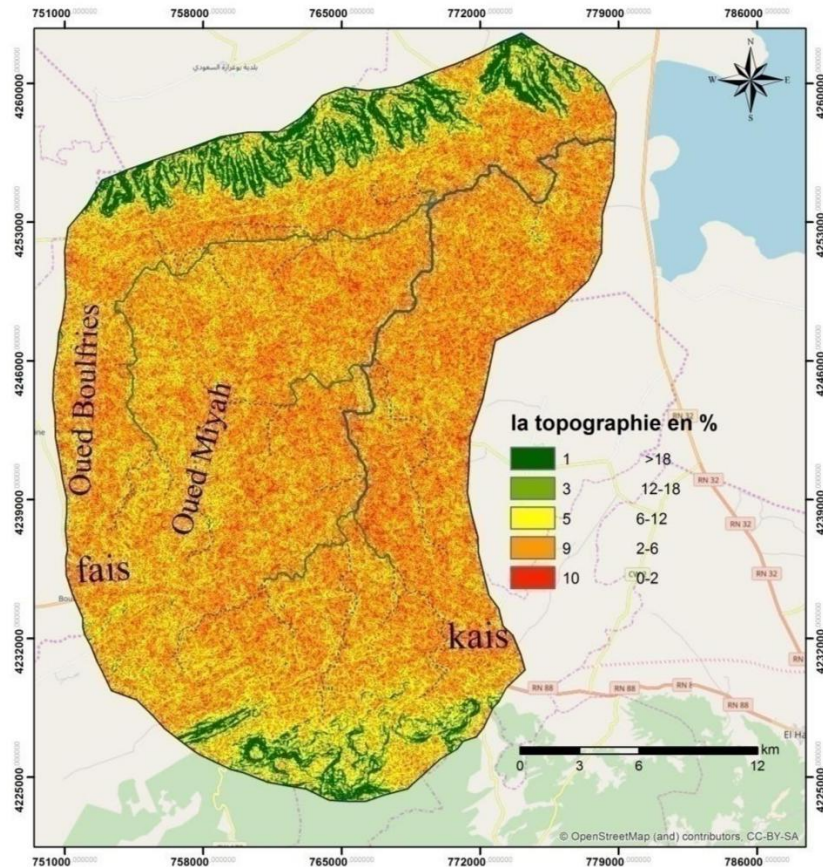


Fig.17 : Carte de pente de la région de Remila

IV-3-6 La zone non saturée (I) (figure 18 et tableau 14) :

La zone vadose est une zone non saturée située entre la couche de sol et la nappe phréatique (Kabera, T. et Zhaohui, L., 2008). La nature de cette zone constitue un paramètre important dans l'estimation de la vulnérabilité, car elle influe sur la vitesse de propagation des polluants vers l'aquifère (similaire à celle des médias aquifères [A]). Son impact est déterminé à partir de la lithologie des terrains qui la constituent. Il est obtenu par interpolation et corrélation des données de forages (logs).

L'interpolation des notations relatives à ce paramètre a permis de distinguer deux classes de zones, à degrés de vulnérabilité différents

Dans la zone d'étude, la zone non saturée est essentiellement composée par argile, argile gravie et marne, et argile sableuse couvrant la majorité de la plaine, représentée par les indices 1,2 et 3.

constituant l'aquifère et plus un réservoir est constitué de détritiques grossiers, plus sa perméabilité est élevée et par conséquent la pollution peut se propager plus facilement dans l'aquifère (Alassane, 2004). L'importance de la conductivité hydraulique est particulièrement soulignée et l'obtention de données représentatives sur les paramètres de l'aquifère est plus coûteuse en comparaison avec les données sur le sol et la zone non saturée.

Vu de l'absence de données sur les essais par pompage dans la région, la conductivité hydraulique a été estimée partir de l'étude antérieure réalisée par Houha, B (2007). La variabilité spatiale de la conductivité hydraulique dans la nappe de Remila montre trois classes de perméabilité, indexées d'après le modèle DRASTIC

Une classe de valeurs élevées ($9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s) située au Nord Est du bassin, deuxième classe de valeurs comprises entre $32,9$ et $4,7 \cdot 10^{-5}$ m/s située au Sud Ouest. La troisième classe la perméabilité est comprise entre $4,7$ à $14,7 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Tableau 15 : Codification des classes la perméabilité :

Paramètre de perméabilité (C)	
Conductivité hydraulique (m/s)	Cotes
$9,4 \cdot 10^{-4}$	10
$32,9 \cdot 10^{-5}$ - $4,7 \cdot 10^{-5}$	6
$4,7 \cdot 10^{-5}$ - $14,7 \cdot 10^{-5}$	2

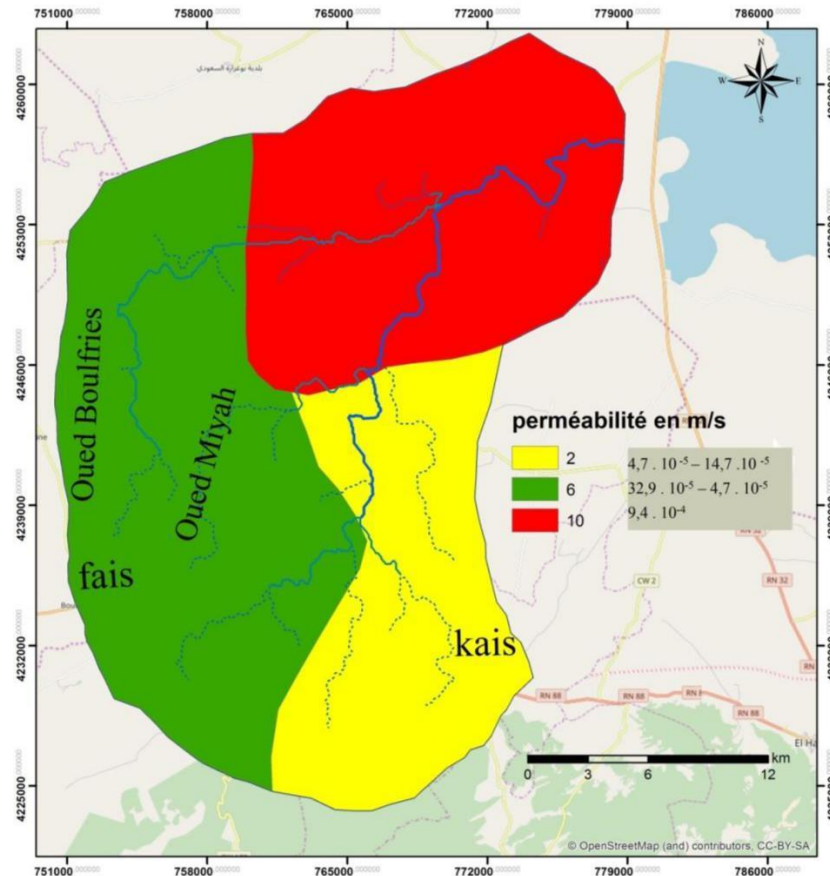


Fig.19 : Carte de perméabilité de la plaine de Remila

IV-3 L'indice DRASTIC : (figure 20 et tableau 16)

Les valeurs de l'indice de vulnérabilité sont calculées en utilisant la formule DRASTIC décrite précédemment. Chaque paramètre y compris dans l'indice doit avoir une valeur numérique affectée. Les couches de différentes cartes thématiques attribuent des valeurs de notation comme informations d'attribut dans l'environnement SIG. Chaque carte d'attribut est ensuite multipliée par le poids de DRASTIC typique, et ensuite additionnée pour donner des valeurs de l'indice DRASTIC.

L'indice DRASTIC (ID) de notre région d'étude s'échelonne de 23 à 175 divisé en quatre classes de forte à très faible. Les cartes DRASTIC permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index.

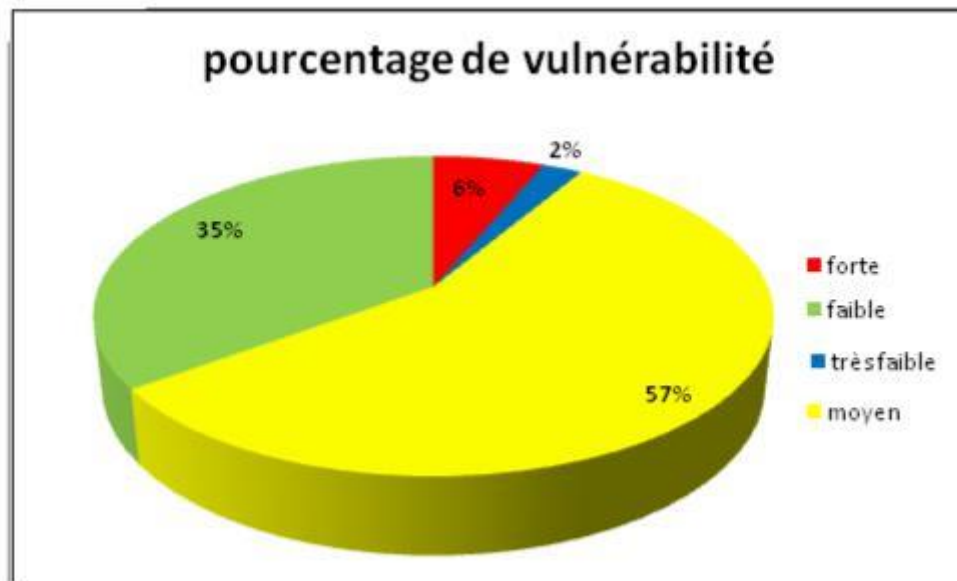


Fig.20 : Répartition de l'indice de vulnérabilité DRASTIC de la nappe de Remila

Vulnérabilité forte : localisé au centre du bassin et représente (6 %) de la superficie de la zone d'étude. Le degré de vulnérabilité forte peut s'expliquer la faible profondeur du plan d'eau souterraine, la forte recharge efficace et la perméabilité des formations lithologiques de la zone vadose, ces conditions favorisent l'infiltration des contaminants et doivent donc être surveillées.

Vulnérabilité moyenne : elle occupe la moitié de la zone d'étude (57 %). Cette vulnérabilité modérée peut être expliquée par la lithologie de la zone vadose formée essentiellement par des argiles et gravier et des fragments de calcaire, ce qui ralentit la propagation des contaminants vers les eaux souterraines.

Vulnérabilité faible et très faible : occupe les rives est et ouest de la région d'étude. Elle occupe (37 %) de la superficie totale. Ceci peut être expliqué par la faible perméabilité des formations lithologiques de la zone non saturée et la faible recharge.

Tableau 16 : Indices de degré de vulnérabilité.

L'indice DRASTIC	Degrée de vulnérabilité	%
23-83	Très faible	2,25 %
84-113	Faible	35,10 %
114-144	Moyen	56,32 %
145-174	Élevé	6,31 %

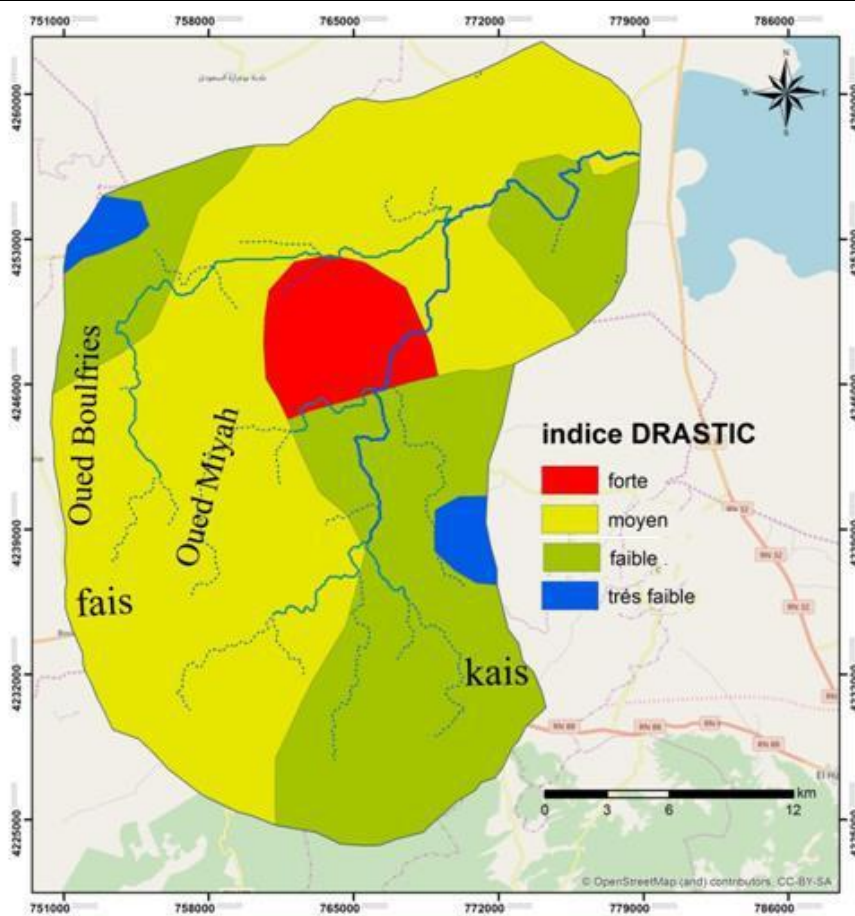


Fig. 21 : Carte de l'indice de vulnérabilité DRASTIC de la nappe de Remila

Conclusion

Dans cette étude, le modèle DRASTIC couplé à un SIG a été utilisé pour évaluer la vulnérabilité de la nappe de Remila à la pollution. La carte de vulnérabilité basée sur le modèle DRASTIC obtenue montre quatre degrés de vulnérabilité allant de forte dans la partie centrale de la plaine au faible à très faible sur les rives est et ouest de la plaine. Le degré de vulnérabilité modéré occupe la moitié qui reste de la plaine.

L'identification de la vulnérabilité à la contamination de l'aquifère de Remila devrait contribuer à l'adoption de modes de gestion préventive. Ainsi, les formations très vulnérables et à grand potentiel aquifère pourraient être mises sous surveillance dans les secteurs présentant des risques élevés de contamination. Ceci dans le but de préserver la qualité de l'eau et de prévenir les coûts élevés liés à la décontamination.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right. The text is centered within this border.

CONCLUSION GÉNÉRALE

ET

RECOMMANDATION

CONCLUSION GÉNÉRALE

La région d'étude de Remila se situe dans un bassin versant endoréique au nord-est de l'Algérie sur une superficie de 250 km. Il est limité au sud par les versants nord des Aurès ; au Nord par la chaîne des montagnes du Djbel Fdjoudj et au Nord-est la dépression Sebka (Gareat et Tarf). Elle est classée dans l'étage bioclimatique semi-aride où la précipitation annuelle ne dépasse pas 440 mm avec une température moyenne annuelle est de 17 ° C. Le climat semi-aride de la région est caractérisé par un été chaud et sec et un hiver doux et humide. La géologie de la région forme une vaste dépression de 50 à 60 km de long sur 20 km de largeur moyenne, comblée de dépôts mio-plioquaternaires, et des Miocènes profonds.

Dans la plaine de Rémila comme ailleurs, l'intensification agricole a conduit à un état de pollution notoire des hydrosystèmes. L'augmentation croissante des teneurs en nitrate dans les eaux souterraines est une conséquence majeure. Comme cette plaine recèle un potentiel agricole non négligeable, la cartographie de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, apparaissent en tant que document indispensable pour la protection des ressources en eaux souterraines.

L'objectif de cette étude est d'élaborer une carte de vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine de Rémila à la pollution sur la base du modèle DRASTIC couplé à un système d'information géographique SIG.

Les résultats de la cartographie montrent quatre classes de vulnérabilité (très faible, faible, moyenne, et élevée) avec des variations des indices DRASTIC allant de 23 à 174.

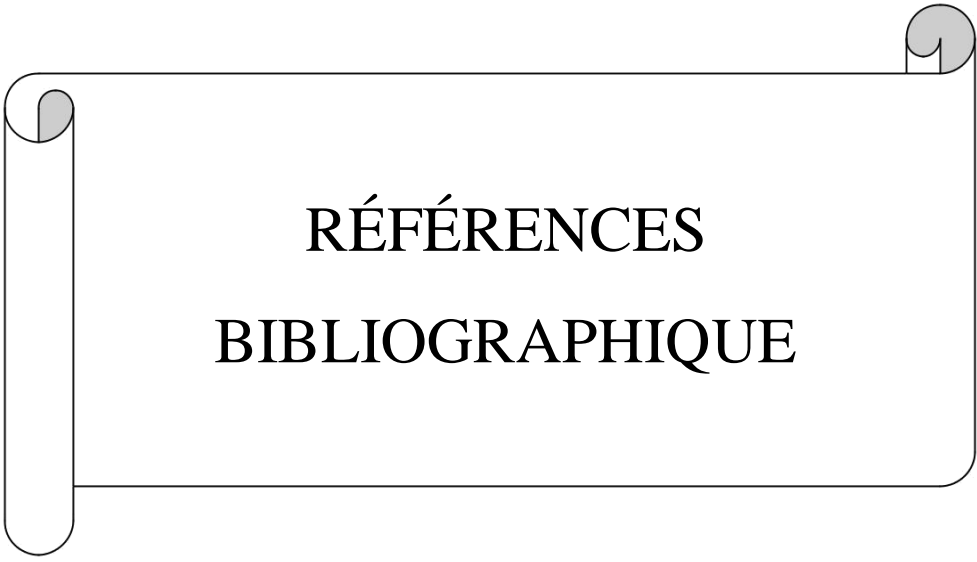
- **Les zones à forte vulnérabilité** : elles se caractérisent par la faible profondeur du plan d'eau, la forte recharge efficace et la perméabilité des formations lithologiques de la zone vadose (indice compris entre 145-174).
- **Les zones à vulnérabilité moyenne** : Couvre presque la moitié de la plaine. Expliqué par la lithologie de la zone vadose formé essentiellement par des argiles et gravier et des fragments de calcaire, ce qui ralentit la propagation des contaminants vers les eaux souterraines. (Indices entre 114-144).

•**Les zones à vulnérabilité faible** : elles se distinguent des autres zones par la faible perméabilité des formations lithologiques de la zone non saturée et la faible recharge (indice compris entre 84-113).

•**Les zones à vulnérabilité très faible** : elles sont localisées dans des petits endroits au Nord-ouest et Sud-est de la zone d'étude. (Indices compris entre 23-83).

RECOMMANDATIONS :

- Validation de la carte de vulnérabilité par des analyses chimiques et bactériologiques.
- Contrôle et suivi de la nappe (campagne piézométrique).
- Établir des périmètres de protection requise digérée les usages des ressources.
- Crée une banque de donnée et d'information centralisée ou tous les organismes verraient leur initiative volontaire comme une contribution directe au développement d'une politique efficace et rigoureuse de la gestion de l'aquifère.



RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- **Al-Adamat., R.A.N., Foster, I.D.L & Baban, S.M.J. (2003).** Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC, Applied Geography (magister memory). Department of Surveying and Land Information, University of the West Indies, Indie.
- **Alassane, A. (2004).** Étude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin) : identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle (Thèse de Doctorat). Université Dakar, Sénégal.
- **Albinet M. et Margat J. (1970)** cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine, Bulletin BRGM 2ème série. p P.13-22.
- **Al Hallaq et Elaish. (2011).** Assessment of aquifer vulnerability to contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip-Palestine, using the DRASTIC model within GIS environment. Arabian Journals of Geosciences, DOI 101,007/s12517-011-0284-9.
- **Aller, L., Benett, T., Lehr, JH, et coll. Drastic. (1987).** A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *National Water Well Association* 1987. Rapport EPA-600/2-87-035. 622 p.
- **Allirou, R et Quantinet, B. (2004).** Vulnérabilité une notion d'avenir. École supérieure des mines, Saint-Étienne, France.
- **Amharref, M., Assine, S., Bernoussi, A. et Haddouchi, B. (2007).** Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines : application au cas de la plaine du Gharb (thèse de doctorat). Faculté des Sciences et Techniques, Tanger, Maroc.
- **ANRH (Agence Nationale des Ressources hydriques). (2002).** Rapport technique.
- **Aubre, F (1992).** Développement d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec (thèse de doctorat). École des Gradués Université Laval, Canada.

- **Bencheikh, S. et Goudjil, M. (2011).** La pollution minérale et organique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla, Sud-Est algérien (diplôme de Master). Université de kasdi merbah Ouargla, Algérie.
- **Bézèlgues, S. et des Garets, E. (2002).** Avec la collaboration de **Mardhel V. et Dörfliger, N. (2002).** Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande-Terre et de Marie-Galante (Guadeloupe). Phase 1 - Définition de la méthode de détermination de la vulnérabilité. (Rapport BRGM-51783-FR).
- **Birech, S. et Messaoudi, I. (2006).** La contamination des eaux par les métaux cas de chott ainbaida de la région d'Ouargla (mémoire d'ingénieur). Université d'Ouargla, Algérie.
- **Bouafia, H. (2015).** Hydrodynamique souterraine et transfert des réservoirs profonds (couplage architecture stratigraphique vulnérabilité et risque de pollution) dans la région de Khenchela, (mémoire de magistère). Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie.
- **Boubelli, S. (2009).** Identification et mise en évidence des formations hydrogéologiques de la wilaya de Khenchela. Analyse et synthèse de données (Mémoire de Magister). Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie.
- **Bouguetit, K. et Benhamda, N. (2015).** Étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla (Cas de la nappe du Continental intercalaire) (mémoire d'ingénieur). Université d'Ouargla, Algérie.
- **Cazaux, M. (2007).** Les eaux souterraines en Gironde. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions des nappes éocènes dans le secteur du Blayais (Rapport de stage Master II). Départ. Des sciences de la terre et de l'Environnement de Montpellier, France.
- **C.G.G. (1969).** Prospection géophysique de la plaine de Remila (Khenchela). Coupes transversales. Compagne générale of Géologie. Direction Département des Travaux publics de Batna. 35 p.
- **Chaffai et coll. (2006).** Étude de la vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe alluviale de Skikda : Application de la méthode DRASTIC (Thèse doctorat). Université d'Annaba, Algérie.

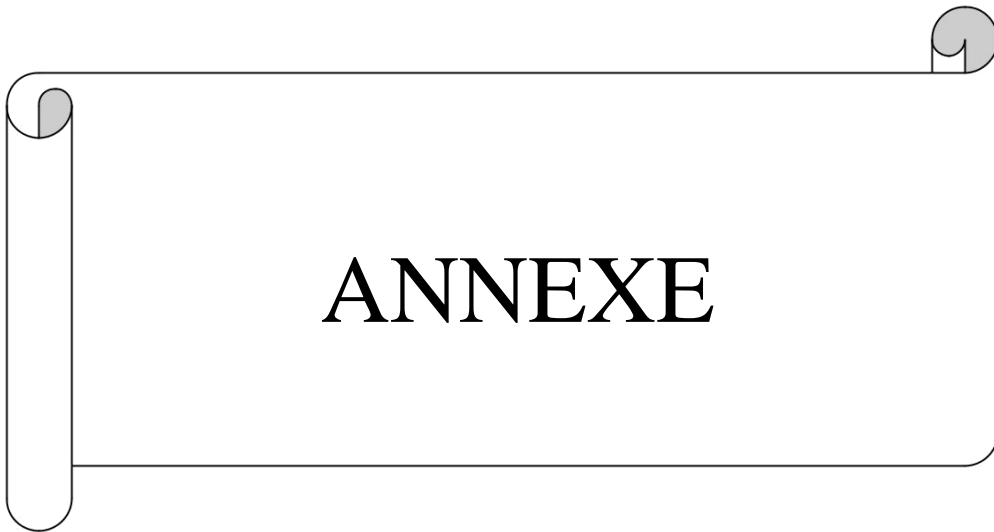
- **Charikh. (2015).** Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu aride : Application à la cuvette de Ouargla (Mémoire de magister). Université d’Ouargla, Algérie.
 - **Chloé, G. (2007).** Vulnérabilité et transport de matières dangereuses : une méthode d’aide à la décision issue de l’expertise de la Sécurité Civile. (Université de Sherbrooke). Québec, Canada.
 - **C.P.H. (1977).** Proposition de réalisation d’étude et projets d’aménagement Hydro agricole de la plaine de Rémila. Rapport de Consortium Projectum-HIDROESB, Rio de Janeiro. 100 p.
 - **Civita M. (1990).** La valutazione della vulnerabilità degli acquifere all’inquinamento (Assesment of aquifer vulnerability to contamination). Protezione e Gestione delle Acque Sotterrance : Metodologie, Technologie e Obiettivi, Marano sul Panaro, 3, 39-86.
 - **Civita, M. et De Maio, M. (1997).** Groundwater vulnerability assessment using SINTACS model. Geomatics, natural hazards and risk vol (60), pp. 12–22. <https://doi.org/10.1080/19475705.2012.732119>.
 - **Duchaine, D. (1998).** Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (par l’intégration d’un SIG, de la télédétection et d’un modèle mathématique) (Mémoire d’ingénieure). I.N.R.S-Eau. Université du Québec, Canada.
 - **Ducommun, R. (2010).** Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain (thèse de doctorat). L’Université de Neuchâtel. Suisse.
 - **Eastman, J.R. (1995).** Idrisi, un SIG en mode image. Clark labs for cartographic technology and geographic analysis. (Publication du CRIF).
 - **EPA. (2003).** Contaminated sediment transport and fate modeling. Athens, GA, p. 30,605, /<http://www.epa.gov/nerl/research/2003/g5-4.html>S.
 - **Foster, S.S.D. (1987).** Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of soil and Groundwater to pollutants. RIVM. TNO Comittee on Hydrological Research, volume (66), pp.10-18.
- Gaaloul, N. (2008).** Gestion intégrée des ressources en eaux souterraines : cas de la plaine du Cap Bon. La Houille Blanche. Revue Internationale de l’Eau, Publications SHF, N° 5, pp 38-44.

- **GOODCHILD, Michael F. (2000)** Part 1 - Spatial Analysts and GIS Practitioners. The Current Status of GIS and Spatial Analysis. *Journal of Geographical System*.
- **Guiraud, R. (1973)**. Évolution post-Triasique de l'Avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Science. Univ. Nice. p p 114 270.
- **Halitim, A. (1973)**. Étude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie (Thèse Doctorat). U.E.R des sciences biologiques. France.
- **Hentati, I., Zairi, M. et Ben Dhia, H. (2005)**. Utilisation des SIG pour l'évaluation de la vulnérabilité environnementale des aquifères phréatiques : Cas de la nappe de Sfax-Agareb (mémoire d'ingénieur). (Laboratoire Eau, Énergie et Environnement (LR3E). École Nationale d'Ingénieurs de Sfax. Conférence francophone ESRI. les- Moulinaux. Environnement-Eau, Tunisie.
- **Houha, B. (1997)**. Quantité et qualité des eaux souterraines de la région de Khenchela (Garât Tarf) (Mémoire de Magister). Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
- **Houha, B. (2007)**. Étude du fonctionnement hydrogéochimique et salin d'un bassin semi-aride. Remila. khanchela (Thèse de doctorat). universite badji mokhtar-Annaba, Algérie.
- **Kabera, T. et Zhaohui, L. (2008)**. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater in shallow aquifer in Yuncheng Basin, Shanxi, China. *Res J App Sci* 3 (3):195–205 p. 201.
- **Khemmoudj, K. (2009)**. Dynamique des systèmes et stratégie d'aménagement et gestion de la ressource en eau en zone semi-aride : Cas de la région d'El Eulma. Wilaya de Sétif (Thèse doctorat). Université d'Annaba, Algérie.
- **Kherici et coll. (2004)**. Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Abiod (Algérie). (mémoire de magistère). Université d'Annaba, Algérie.
- **Kouame. (2007)**. Application des méthodes DRASTIC et SI pour l'étude de la vulnérabilité à la pollution par les nitrates (NO₃⁻) de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). UFR des Sciences de la Terre et des Ressources minières, Université de Cocody, Côte d'Ivoire.

- **Laffitte, R. (1939).** Étude géologique de l'Aurès (Algérie). Bulletin de l'Association de Géographes français. Pp.34-40.doi : <https://doi.org/10.3406/bagf.1939.7028>
- **Lakhdari, B. (2008).** Étude de la pollution chimique des eaux souterraines (cas des Nitrates) de la nappe phréatique de la cuvette d'Ouargla (mémoire d'ingénieur). Université d'Ouargla, Algérie.
- **Lallemand, B. Lallemand, A. et Barres, A. (1994).** Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Larhyss Journal, Volume (14) 5 p. BRGM-R37928.
- **Landreau, A. (1996).** Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des eaux souterraines (Rapport BRGM).
- **Laour, M. (2012).** Étude du comportement des polluants dans les eaux souterraines (cas des eaux potables) de la région de Ouargla sud-est algérien (mémoire master Génie de l'environnement). Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie.
- **Manga, A. (2015).** Système D'information géographique, volume (42), p.14.
- **Margat, J. (1968).** Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine a la pollution. Base de la cartographie. Doc. BRGM, 68 SGL 198 HYD.
- **Mebarki, A. (1982).** le bassin du kebir, ressources en eaux et aménagement en Algérie (thèse doctorat 3ème cycle). Université de Nancy II, France.
- **Melloul. et coll. (2009).** Étude de la contamination des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité d'un aquifère resoumis au climat semi-aride méditerranéen : Cas de la plaine côtière de Saidia, Maroc.johan libbey eurotext, volume (20), 2 p.
- **Murat, V. (2000).** Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution. Université du Québec INRS –Géoressources, France.
- **Olmer, M. & Rezac, B. (1974).** Methodical principles of maps for protection of groundwater in Bohemia and Moravia, scale 1: 200 000. Intl. Assoc. Hydrogeologists, Memoires, Tome X, Congres de Montpollier, 1. Communications, pp. 105-107.

- **Saou, A. (2001).** Étude expérimentale de l'influence des caractéristiques d'un bassin versant sur son comportement hydrologique (Mémoire de magister). Université de Béjaia, Algérie.
- **Sener et coll. (2009).** Assessment of Aquifer Vulnerability in the Lake Basin Based on GIS and DRASTIC Method: A case study of Senirkent–Uluborlu (Isparta-Turkey) Basin. *Hydrogeology Journal*, volume (17) 8p.
- **Smida., al., Smida, H., Abdellaoui, C., Zairi, M. et Ben Dhia, H. (2010).** Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à un système d'information géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (Sud de Sfax, Tunisie).
- **Verba, J. et Zaporozec, A. (1994).** Guidebook on mapping groundwater vulnerability (thèse the doctorat). International Association of Hydrogeologists,. Guide sur la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines. v. (131) p16.
- **Verba, J & Civita, M. (1994).** The assessment of groundwater vulnerability ; In Vrba J. et Zaporozec A (Ed), *Guidbook on mapping groundwater vulnerability. International contributions to hydrogeology*, pp. 31–48.
- **Vernoux, J.F. et al (2007).** Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique. rapport BRGM/RP-55874- FR.
- **Viessmann, W., Knapp, J.W. et Lewis, G.L. (1977).** Introduction to hydrology. Haper and Row publishers, NY, pp. 618–625.
- **Vieville, JJ. (1988).** Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines aux polluants et conception assistée par ordinateur. Projet de recherche présente pour l'option conception et gestion.
- **Vila, J.M. (1977).** Notice explicative de la carte géologique, au 1/50. 000, Touffana (feuille n° 202). Editée par Sonatrach en 1977. 6 p.
- **Williams, J.R. and Kissel, D.E. (1991).** Water percolation: An indicator of nitrogen-leaching potential in managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability. pp. 59–83. Edited by R.F. Follett, D.R. Keeney and R.M. Cruse.

- **Zouaoui, A. (1990).** Contribution à l'étude de l'évaluation des terres de la plaine de Remila (Kais W. Khenchela) (Thèse de Magister en Sciences Agronomique). Université de Batna Institut d'Agronomie, Algérie.
- **Zouaoui, A. (2008).** Evaluation de l'aptitude culturale pour le blé dur et l'orage des terres des Hautes Plaines Constantinoises (thèse de doctoral). Institut Nationale d'Agronomie, Al harrach, Algérie.
- **Zwahlen, F. (2003).** Vulnerability and Risk mapping for the protection of carbonate (Karst) Aquifers (Final report). European comission COST action 620- directorate général science, and developemet.



ANNEXE

Les coupes lithologiques : À partir des fiches techniques des forages obtenus, de l'hydraulique a réalisé 9 forages de reconnaissance de profondeurs variant de 60 à 260 m qui ont alors apporté de nouvelles informations.

Coupe 1 : Est-West

Noms forages	Profondeur (m)	Description lithologique	Coupe lithologique
DT1	Zone non saturée 0-22 m	sol argileux, argile brune	<p>Legend Title</p> <ul style="list-style-type: none"> Calcaire noire argile brune calcaire gris compacté sol argileux
	Zone saturée 22-57 m	Calcaire noir, calcaire gris compacté	
FG24	Zone non saturée 0-22 m	Argile brune.	<p>Legend Title</p> <ul style="list-style-type: none"> Argile brune. calcaire gris et grés vert. calcaire gris noir conglomérats gris noir à ciments argile brune. gravier de calcaire et argile
	Zone saturée 22-150 m	gravier de calcaire et argile, conglomérats gris noir à ciments argile brune, calcaire gris noir, calcaire gris et grés verts.	
G 23	Zone non saturée 0-6 m	terre arable	<p>Legend Title</p> <ul style="list-style-type: none"> argile brune avec qlq passages de gravier de calcaire gris terre arable
	Zone saturée 6-100	argile brune avec quelque passage de gravier de calcaire gris	

M21	Zone non saturée 0-3 m	argile brune humide avec peu de sable fin	
	Zone saturée 3-100 m	argile marron, argile marron sèche avec sable fin, argile avec sables fins, argile brun silteuse avec gravier de calcaire faible	

Coupe 2 : Sud –Nord

Noms des fourrages	Profondeur	Description lithologique	Coupe lithologique
Bousaha	Zone non saturée 0-10 m	argile marron sableuse	
	Zone saturée 10-120 m	sable argileux, argile, graviers, graviers et sable, marne grise.	

F13	Zone non saturée 0-6 m	sable très fin argileux rougeâtre		<p>Legend Title</p> <ul style="list-style-type: none"> argile a sable très fin rougeatre sable argileux tres fin sable tres fin argileux rougeatre sable tres fin rougeatre
	Zone saturée 6-124 m	Argile a sable très fin rougeâtre, sable très fin argileux rougeâtre.		
HP02	Zone non saturée 0-19 m	terre noire, argiles jaunâtres.		<p>Legend Title</p> <ul style="list-style-type: none"> argiles avec des passages de graviers argiles jaunâtres grès marnes marnes bleuâtres sables très fins terre noire
	Zone saturée 19-103 m	Grès, marne, argiles avec des passages de graviers, sables très fins		
kais n2	Zone non saturée 0-4 m	Argile		<p>Legend Title</p> <ul style="list-style-type: none"> argiles grès et argiles grès gris marnes bleues et marno-calcaires marnes grises marno-calcaires et graviers et argiles rouges
	Zone saturée 6-260 m	Argile, marnes grises, grés gris, marno-calcaires et graviers et argiles rouges		

