

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الجبالي بونعامة – خميس مليانة-
Université Djilali Bounaama – Khemis-Miliana



**Faculté : FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET
DES
SCIENCES DE LA TERRE**

Département : Sciences de la Terre

Option : Hydrogéologie

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme de Master

Thème

**Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution à
l'aide d'une méthode spécifique SI : application sur l'aquifère
alluvial du Haut Cheliff**

Préparé par :

M^{me} : Attafi Soumia Née BenKada

Soutenue publiquement le 08 /07/2018, devant le jury composé de :

M. Sadoune. A	Président	MCB	UDBKM
M. Bouderbala. AEK	promoteur	MCB	UDBKM
M. Gharbi. B	Examineur	MCB	UDBKM
M. Guenfoud. A	Examineur	MAA	UDBKM

Année universitaire : 2017/2018

Remerciements

Louange à "ALLAH" "DIEU" "GOD" le tout puissant et le maître de l'univers, par sa grâce, sa bonté divine et sa miséricorde m'a permis d'avoir la force, le courage, la patience, pour réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mon immense respect à mon encadreur de mémoire **Dr. BOUDERBALA Aek** pour la qualité de son encadrement, son suivi attentif, sa précieuse assistance, sa disponibilité et ses hautes qualités morales et scientifiques qui ont facilité autant que possible la laborieuse finalisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes remerciements respectueux aux membres du jury : **Mr. SADOUNE A.** qui me fait l'honneur de présider ce jury, **Mr. GHARBI B.**, **Mr. GUENFOUD A.** de m'avoir fait l'honneur d'accepter de relire et d'évaluer mon modeste travail et d'avoir accepté d'être examinateur, et d'avoir participer à ce jury avec ma profonde reconnaissance pour cela.

Mes vifs remerciements pour **Mr. BOUCEFIANE A.**, pour son aide précieuse lors de l'apprentissage des logiciels, **Mr. GUENDOZ M.**, **Mr. SADEUK A.** et **Mr. Zedam M.** pour ses précieuses aides et conseils.

Je tiens également à remercier tous mes enseignants pour la qualité de l'enseignement qu'ils ont bien voulu me prodiguer durant mes études afin de me donner une formation de qualité, et tout le personnel de la faculté, pour les bonnes conditions d'étude qu'ils m'ont prodigué.

J'adresse ma reconnaissance à **Mr. BOURKIZA A.** pour sa disponibilité, sa précieuse aide et conseils dans le cadre de l'application du logiciel Arc Gis.

Je remercie aussi tous mes amis(e) qui ont partagé avec moi les moments d'espoir, de joies et qui ont toujours été présents lors de mon parcours universitaire et à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Enfin, mes remerciements, gratitude, reconnaissances et tendres affections à : mes très chers parents et mes chers frères pour leurs soutiens sans fin, disponibilité et encouragement, pour tout le soutien moral tant témoigné, ma belle-mère et mon beau-père, mon mari Slimane que je ne remercierai jamais assez pour son encouragement sans cesse, sa compréhension et son aide, ses hautes qualités ayant permis l'aboutissement de ce mémoire n'aurait jamais pu aboutir, et enfin mes chères princesses Kadidja, Djamila, pour les beaux moments, soutien et amour, que Dieu vous garde.

SOUMLA

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

Mes deux sources de lumière, celui qui m'a indiqué la bonne voie, mon très cher père ABDELKRIM, et à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, ma très chère mère YASMINA, pour leur soutien moral durant mes études, sa fatigue et ses sacrifices.

*Mon cher Trésor, mon mari SLIMANE,
Mes deux chers frères MUSTAPHA et MOHAMED ALI,
Mes chères grand-mères KALTOUM, FATMA et encore
BAHIA,*

*mes chers grand-pères BELKACEM ET BOUALEM,
Toute ma famille paternelle BENKADA et maternelle RAFA,
spécialement mes tantes, DJOUHAR, DAHBLA, MALIKA,
NABILA et HASSINA, mes oncles, mes cousins, AHLLEM,
AICHA, SARAH, ASMAA et MANEL.*

*Mes beaux-parents FELLA et RABAH, mes beaux-frères,
FATAH, DJAMEL et KARIM, mes belles-soeurs LAMYA,
FOUZIA et FATIMA.*

*Les petits Soheib, Haytham, Nidhal, Iyed, Adem, Obeida,
Rassim, Imad, Ismail et mes princesses Aya, Amira, Asma,
Sérine, Rimessa, Soulef; wissal, Maram, Mériem et Kholoud
Tous les étudiants de ma promotion, spécialement KHADIDJA,
DJAMILA, ASMAA, RIMA, CHAHRA, NAWEL et Mr.
GUENDOZ M'HAMED, ABDEFETTAH, ABDEALLAH,
HOCINE, ILIES et MOHAMED.*

*Mes amies de ma résidence, NABIL A, FERIEL, AMINA,
ASMA, les deux AICHA, SAMIRA, SALEMA et chacune par son
nom.*

*A toute personne qui a contribué à la réalisation de ce anuscrit
de près ou de loin.*

SOUMIA...

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Table de matière

Liste se tableaux

Liste des figures

Liste des annexes

Liste des abréviations

Résumé

Introduction générale 1

Chapitre 1: aperçu bibliographique

1.1 introduction.....3

1.2 Méthode d'évaluation de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution 4

1.3 les critères des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution 9

1.3.1 Critères de vulnérabilité intrinsèque 9

A /Critères relatifs aux conditions de surface 9

B/Critères relatifs à la zone non saturée 9

C/ Critères relatifs à la zone saturée 9

D/ Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone saturée 10

1.4 Méthode SI (susceptibility Index)..... 10

1.5 Origine de la pollution par les nitrates : 11

1.5.1. Pollution domestique 11

1.5.2. Pollution agricole.....	12
1.5.3. Pollution industrielle.....	12
1.6 Principaux types de pollution des eaux souterraines :	13
1.6.1. Pollution temporaire et chronique :	13
1.6.2. Pollution ponctuelle et diffuse :	13
1.6.3. Pollution linéaire :.....	13
1.6.4. Pollution historique.....	14
1.7. les mécanismes de transfert des polluants :	14
1.8. Effets de certains paramètres chimiques sur la santé humaine.....	15
1.9. Cycle de l'Azote:	16
1.10. Les conséquences des nitrates sur :t	18
➤ La santé.....	18
➤ L'environnement.....	19
Eutrophisation.....	19
Fuites des nitrates et pollution nitrique des nappes souterraines.....	20
1.11. La réglementation :	21
Conclusion	21

Chapitre2 : présentation de la zone d'étude

2. 1. Situation géographique	22
2.2. Contexte géomorphologique.....	23
2.3. Occupation du sol	24
2.4. Cadre pédologique	26
2.5. RESEAU HYROGRAPHIQUE	28
2.6.Hydroclimatologie	29
2.6.1. Régime pluviométrique.....	29
2.6.2.Précipitations moyennes mensuelles:	29

2.6.3. Précipitations moyenne annuelles.....	30
2.6.4. Analyse des températures	32
2.6.5. Le diagramme de Gaussen.....	33
2.7. Evaporation.....	34
2.8. Evapotranspiration	34
2.9. Bilan hydrologique selon la formule de Thornthwaite	35
2.10. Cadre géologique	38
2.11. Lithologie du Haut Chélif.....	40
2.12. Contexte Hydrogéologique	43
2.12.1 Géométrie des aquifères (Apport de la géophysique).....	43
2.13. Identification des principaux aquifères	43
2.13.1 L'aquifère alluvionnaire du Quaternaire.....	44
2.13.2 l'aquifère du Miocène	44
2.13.3 Les calcaires du Jurassique	44
2.14. Hydrodynamique de l'aquifère	44
2.14.1 Inventaire des points d'eau	44
2.14.2 Piézométrie	44
2.14.3 Interprétation de la carte piézométrique juin 2013	45
2.14.4. Carte piézométrique novembre 2013.....	45
2.14.5. Alimentation de la nappe	46
Conclusion	46

Chapitre 3 : matériel et méthodes

Introduction.....	49
3.1. Aspect théorique de la méthode SI	49
3.2. Hypothèses de la méthode	50

3.3. Description des paramètres SI	51
3.4. Détermination de l'indice SI.....	54
3. 5. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution.....	55
Conclusion	56

Chapitre 4 : résultats et discussion

Introduction.....	57
4.1. Méthodologie.....	57
4.2 Elaboration des couches thématiques des cinq paramètres SI.....	58
4.2.1 <i>Profondeur de la nappe</i>	58
4.2.2. Recharge efficace de l'aquifère (R).....	61
4.2.3. Paramètre des matériaux de l'aquifère (A)	62
4.2.4. Paramètre Topographie (pente) (T)	64
4.2.5 Paramètre d'occupation des sols.....	66
4.3 Carte finale de la vulnérabilité selon la méthode SI.....	68
4.4 : l'incohérence entre la vulnérabilité et les concentrations des nitrates.....	69
Conclusion	72
Conclusion générale.....	73
Références bibliographiques	

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Aperçu Bibliographique	
: Attributs de la vulnérabilité de l'eau souterraine et paramètre associé modifié	8
Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude	
Tableau 2.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques (ANRH-Blida).....	29
Tableau 2.2 : précipitations moyennes annuelles, période1984-2015 (ANRH-Blida).....	32
Tableau 2.3 : Moyenne mensuelle de l'évaporation pour une période d'observation de 10 ans (2003-2014).....	34
Tableau 2.4 : Bilan hydrique selon la méthode Thornthwaite de la plaine du Haut Chélif.....	35
Tableau 2.5 : Valeurs des résistivités pour les différentes formations géologiques (ohm.m) ...	43
Chapitre 3 : Matériels et Méthodes	
Tableau 3.1 : Principales classes d'occupation des sols et valeurs correspondantes.....	50
Tableau 3.2 : Poids attribués aux paramètres SI.....	50
Tableau 3.3 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI.....	50
Tableau 3.4 : Données utilisées pour le calcul de la vulnérabilité	54

Liste des figures

Chapitre 2	: Présentation de la zone d'étude	
Figure 2.1	: Situation géographique de la zone d'étude (Gharbi.B, 2014)	22
Figure 2.2	: Représentation topographique de la plaine alluviale de Khemis Miliana sous forme numérique (Sahraoui.N, 2015)	23
Figure 2.3	: la carte d'occupation du sol de la plaine du Haut Chélif (SOURCE : ONID, 2012)	25
Figure 2.4	: La carte des sols de la région du Haut-chélif (BOULAIN, 1957)...	27
Figure 2.5	: Carte du réseau hydrographique du haut Chélif (SOURCE : ABH-CZ)	28
Figure 2.6	: Variation temporelle des précipitations moyennes mensuelles (2000-2015)	30
Figure 2.7	: Variation des précipitations annuelles (1984-1985 à 2014-2015) ..	31
Figure 2.8	: Variation des précipitations annuelles (1984 -2015).....	31
Figure 2.9	: Variation de la température moyenne mensuelle de la station du barrage Harreza pour la période (2003-2014)	32
Figure 2.10	: Diagramme ombrothermique de la zone d'étude (2003-2011).....	33
Figure 2.11	: Carte géologique schématisée vectorisée de la plaine du Haut Chélif (Sahraoui, 2015)	39
Figure 2.12	: Coupe géologique de la plaine de haut Chélif (Carte géologique du Nord d'Algérie, Pradins ,2002)	40
Figure 2.13	: Carte piézométrique de la nappe alluviale Haut-Chélif (Période des hautes eaux : juin 2013)	45
Figure 2.14	: Carte piézométrique de la nappe alluviale du Haut-Chélif (Richa. 2016) (Période des basses eaux : novembre 2013)	46
Chapitre 4	: Résultats et discussions	
Figure 4.1.a	: Répartition Spatiale des profondeurs des eaux souterraine dans la plaine alluviale de Khemis Miliana.....	59
Figure 4.1.b	: Répartition Spatiale des profondeurs des eaux souterraine et leurs scores.	60
Figure 4.2.a	: Répartition Spatiale de la recharge des eaux souterraines	61
Figure 4.2.b	: Répartition spatiale de la recharge des eaux souterraines assignée par scores.....	62
Figure 4.3.a	: Répartition spatiale du paramètre du milieu -aquifère de la plaine du Khemis Miliana.....	63
Figure 4.3.b	: Répartition spatiale du paramètre du milieu -aquifère assigné aux scores.....	64
Figure 4.4.a	: Répartition spatiale des degrés de la pente de la plaine alluviale de Khemis Miliana.....	65

Figure 4.4.b	: Répartition spatiale des degrés de la pente de la plaine alluviale assignée à leurs scores.....	66
Figure 4.5a.	: Répartition spatiale d'occupation des sols de la plaine alluviale de Khemis Miliana.....	67
Figure 4.5b.	: Répartition spatiale d'occupation des sols de la plaine alluviale assignée à leurs scores.....	68
Figure 4.6.	: la carte finale de la vulnérabilité de plaine de Khemis Miliana...	69
Figure 4.7	: la répartition spatiale des nitrates dans la plaine de Khemis Miliana (Haute Eaux)	70
Figure 4.8	: la répartition spatiale des nitrates dans la plaine de Khemis Miliana (Basses Eaux).....	71

Liste des Annexes

ANNEXE 01 : Comblement des lacunes de la station de Harreza Barrage

ANNEXE 02 : Comblement des lacunes de la station de Gherib Barrage

ANNEXE 03 : Comblement des lacunes de la station de Tarek Ibnou Ziad

ANNEXE 04: Comblement des lacunes de la station du Marabout blanc

ANNEXE 05 : Comblement des lacunes de la station de l'Abbabsa Chélif

ANNEXE 06 : Comblement des lacunes de la station de l'Arib Chélif

ANNEXE 07 : Les valeurs des précipitations et recharge moyenne annuelle des stations pluviométriques du HC

ANNEXE 08 : Concentrations des nitrates de la plaine du HC la période (HE 2013)

ANNEXE 09 : Concentrations des nitrates de la plaine du HC la période (BE 2013)

ANNEXE 10 : Profondeurs mesurées de la nappe du HC durant la période de (2013-2014-2015-2016)

Abréviation

ARNH : Agence National des Ressources Hydrauliques.

BE : Basses Eaux.

BRGM : Bureau des Recherches géologiques et Minières.

CE : Conductivité électrique.

CGG : Compagne Générale de Géophysique.

DA : Déficit Agricole.

ETP : Evapotranspiration Potentielle.

ETR : Evapotranspiration Réelle.

HE : Hautes Eaux.

I : Infiltration.

K_c : Indice de compacité de Gravillus.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

R : Ruissellement.

SI : Indice de Susceptibilité.

SIG : Système d'Information Géographique.

ملخص

إن نوعية مياه السهل الغربي في منطقة الشلف الأعلى ، الواقعة في شمال غرب الجزائر ، تدهورت في السنوات الأخيرة تدهورا خطيرا بسبب تصريف مياه الصرف الصحي غير المعالجة ، والاستخدام المكثف للأسمدة الكيماوية في الزراعة فضلا عن عناصر أخرى.

تحديد الضعف في المناطق المتأثرة بالتلوثات البشرية هو عنصر مهم جدا لإدارة موارد المياه. في الواقع، خرائط حساسية المياه الجوفية هي أداة تساهم في حماية المياه الجوفية ضد احتمال أي تلوث. لذلك تعتبر ثمينة لأي قرار مستقبلي.

في دراستنا قمنا بتحديد الضعف في طبقة المياه الجوفية الخاصة بسهل الشلف الاعلى عن طريق تطبيق طريقة SI مرفوقا بنظام المعلومات الجغرافية (GIS) ، باعتبار منطقتنا ذات طابع زراعي على نطاق واسع.

لقد تم الحصول على الخريطة النهائية لحساسية المياه الجوفية بحيث بينت أن المنطقة بها طبقة ضعف متوسطة مع 3.85% طبقة ثانية ذات مؤشر عالي و هذا 83.11% والذي يحتل تقريبا مساحة كل السهل والفئة الثالثة ذات الحساسية العالية جداً مع 12.42% و لهذا يجب أخذ التدابير اللازمة لتجنب أي تلوث محتمل.

الكلمات الدالة: حساسية المياه الجوفية ، SI ، نظام المعلومات الجغرافية ، سهل الشلف الاعلى ، التلوث الزراعي.

Abstract

The quality of the waters of the alluvial plain of Upper Cheliff, located in northwestern Algeria, has a serious deterioration in the last years due to uncontrolled discharges of urban wastewater, and the intensive use of chemical fertilizers used in agriculture.

Determining the vulnerability of the alluvial aquifer in this region by pollution of an anthropogenic nature is a very important element for the management of water resources. In fact, aquifer vulnerability maps contribute mainly to the protection of groundwater against a possible pollution. They are recommended for any future decision.

In our study, we have determined the vulnerability of the Upper Cheliff alluvial aquifer by applying the SI method, combined with a geographic information system (GIS), being our region with a largely developed agriculture, we obtained maps of vulnerabilities which show that the zone presents a class of moderate vulnerability with percentage of 3.85%, a high class vulnerability represents a percentage of 83.71% which occupies almost the whole part of the plain and the very high class vulnerability have a percentage of 12.42%. This results can be taken an account and used for any management activity in this plain

Key words: Aquifer vulnerability, SI, GIS, Upper Cheliff , alluvial plain, agricultural pollution.

Résumé

La qualité des eaux de la plaine alluviale du Haut Cheliff, située au Nord- Ouest de l'Algérie, a connu ces dernières années une grave détérioration due aux rejets non contrôlés des eaux usées urbaines, l'utilisation intensive d'engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que à la surexploitation.

La détermination de la vulnérabilité dans les régions affectées par la pollution de nature anthropique est un élément très important pour la gestion des ressources en eau. En effet, les cartes de vulnérabilité des aquifère sont des outils qui contribue à la protection des eaux souterraines contre une éventuelle pollution. Elles sont recommandées pour toute décision future. Sur notre étude on a déterminé la vulnérabilité de la nappe alluviale du Haut Chéiff en appliquant la méthode SI à un système d'information géographique (SIG), étant que l' agriculture dans notre région est très développée.

La carte de vulnérabilité selon le modèle SI montre que la zone présente trois classes : une classe de vulnérabilité moyenne a un pourcentage de 3.85% à la surface totale, une classe de vulnérabilité élevée est représentée par 83.11% qui occupe la quasi-totalité de la plaine et la classe de vulnérabilité très élevée avec un purcentage de 12.42%. Cette carte montre que notre nappe est vraiment sensible à la polltion d' où il est important de prendre les mesures nécessaire pour éviter toute pollution probable.

Mots clés : Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine, Méthode SI, SIG, Plaine alluviale, Haut Chéiff, la pollution agricole.



Introduction générale

Introduction générale

Les eaux souterraines constituent une source primordiale pour la vie humaine , elles sont pratiquement les seules sources d'eau d'approvisionnement pour la plupart des pays.

En milieu urbain ou industriel, les nappes d'eau souterraines peuvent devenir rapidement fragiles à la surexploitation et à la contamination. Certains chercheurs ont développé des outils pour leur protection et préservation.

Depuis quelques années, la protection et la conservation des milieux naturels, en particulier la qualité des eaux, est devenue une préoccupation majeure et un objectif principal dans les programmes de développement (Boughrara, 2009). En effet, la détérioration de la qualité des ressources en eau, souterraines en particulier, constitue une menace aussi importante que celle liée au déséquilibre quantitatif (Rahoui, 2000). Les paramètres en cause sont nombreux, mais les nitrates constituent l'acteur principal. Les eaux souterraines sont donc exposées aux pollutions diffusées, notamment d'origine agricole, On en cite tout particulièrement celle liée à la présence des nitrates et dont l'origine revient pour 70 % aux pratiques agricoles. Environ 70% des fertilisants azotés utilisés en agriculture sont perdus dans l'environnement sous forme de nitrate que l'on retrouve dans les eaux de surface et souterraines (Yapo et al., 2009).

L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution est un processus important pour comprendre la fragilité intrinsèque qu'une certaine région s'oppose à une menace donnée, si ce danger est d'origine naturelle ou anthropique. Souvent, les évaluations de vulnérabilité sont effectuées dans des zones où les ressources en eau sont en situation de stress qui proviennent d'activités industrielles ou agricoles. Par conséquent, les études de vulnérabilité peuvent fournir des informations précieuses pour les intervenants qui travaillent sur la prévention contre la détérioration de l'environnement.

L'aquifère alluvial de la plaine de Haut Cheliff présente des propriétés intrinsèques, il est devant un risque potentiel de pollution depuis la surface par des contaminants générés par l'activité humaine. Le présent travail concerne l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à l'aide d'une méthode de vulnérabilité spécifique SI, en utilisant une approche indicielle et une analyse statistique. La cartographie de la vulnérabilité sera mise en œuvre via la méthodologie indicielle. Ces méthodes peuvent constituer des outils pour la gestion des eaux souterraines.

Par ailleurs, une étude basée sur une approche indicielle et statistique pour faire ressortir des correspondances qui existent entre les zones les plus vulnérables et les plus contaminées et inversement sera appliquée.

L'Objectif de cette étude consiste à réaliser une carte de vulnérabilité des eaux souterraines de la nappe Alluviale du Haut Chéiff à la pollution agricole, ce qui sert après comme un outil de gestion des eaux de cette nappe à leur protection.

Le travail est subdivisé en deux phases, une phase de collecte et analyse des données relatives à la méthode d'évaluation de la vulnérabilité spécifique, et une autre phase consiste à la réalisation des cartes des différents indices de la méthode de vulnérabilité, ce qui abouti à la fin à l'établissement de la carte de l'indice de sensibilité SI .

Chapitre 1 : Aperçu Bibliographique

1.1 Introduction

L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution est un processus important pour comprendre la fragilité intrinsèque qu'une certaine région s'oppose à une menace donnée, si ce danger est d'origine naturelle ou anthropique. Souvent, les évaluations de vulnérabilité sont effectuées dans des zones où les ressources en eau sont en situation de stress qui proviennent d'activités industrielles ou agricoles. Par conséquent, les études de vulnérabilité peuvent fournir des informations précieuses pour les intervenants qui travaillent sur la prévention contre la détérioration de l'environnement.

L'aquifère alluvial de la plaine de Khemis Miliana présente des propriétés intrinsèques, comme la vulnérabilité, qui est définie comme le risque potentiel de pollution des eaux souterraines par des contaminants générés par l'activité humaine. Dans le cas de sources de pollution superficielles, il existe généralement une relation directe entre vulnérabilité forte et qualité dégradée des eaux. Cependant cette relation n'est pas observée dans tous les aquifères, et l'origine des ces incohérences entre vulnérabilité et qualité des eaux souterraines va être étudiée. Le présent travail concerne l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana, Algérie, et procéder a une comparaison avec la qualité de celles-ci, en utilisant l'approche indicielle et une analyse statistique.

L'application de cette approche de comparaison entre vulnérabilité/qualité des eaux souterraines permet d'évaluer l'impact des activités anthropiques et naturelles sur la qualité des eaux souterraines, La cartographie de la vulnérabilité sera mise en œuvre via la méthodologie indicielle. Ces méthodes peuvent constituer des outils de management des eaux souterraines, la détermination de nouvelles zones de vulnérabilité sera discutée. Par ailleurs, une étude basée sur une approche indicielle et statistique pour faire ressortir des correspondances qui existent entre les zones les plus vulnérables et les plus contaminées et inversement sera appliquée.

Pour atteindre les objectifs de cette recherche, diverses méthodes et techniques vont être utilisées : méthodes d'analyse cartographique et de la cartographie numérique, méthodes de traitement d'analyse spatiale et de visualisation, méthodes de modélisation géospatiale, pour la conception et l'analyse des modèles spatiaux, méthodes de conception et développement

d'une Géodatabase relationnelle, methods de statistique-Raster comparaison.

D'année en année, quelques centaines de milliers de tonnes d'azote s'infiltrant dans les eaux sous forme de nitrate ou d'ammonium. Une grande part provenant des transports, des ménages, de l'industrie et de l'artisanat est lessivée dans les plans et cours d'eau. Une autre part est lessivée avant tout sous forme de nitrate de l'agriculture dans les eaux souterraines. Le reste provient des forêts, des jardins, des installations sportives etc.

Aujourd'hui, la qualité de l'eau dont on dispose se dégrade. Dans certaines régions l'eau peut être injectée directement dans le réseau public d'alimentation en eau potable après une simple désinfection. Cependant ces régions se font de plus en plus rares avec notamment pour cause l'azote dans l'eau qui atteint parfois ses seuils inquiétants. Dans ce cas les traitements de l'eau sont beaucoup plus lourds, il nécessite donc des installations modernes et des capitaux importants (*Goudot, 1996*).

Aujourd'hui, cette pollution pose un sérieux problème pour un grand nombre de pays, quel que soit leur niveau de développement ; elle devient menaçante dans les pays où la population augmente rapidement, où les demandes de développement sont considérables et où les gouvernements ont d'autres priorités d'investissement (*Chiclomonov, 1997*).

1.2 Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Les premières cartes de vulnérabilité furent élaborées par des chercheurs français au début des années 70 (*Albinet et Margat, 1970*). Elles ont été ensuite expérimentées dans d'autres pays du monde. Le principe de leur élaboration consistait à réaliser la synthèse de quelques paramètres ayant une influence majeure dans la vulnérabilité des aquifères.

Depuis une vingtaine d'années, plusieurs méthodes ont été proposées et expérimentées, afin d'aboutir à une caractérisation simple et précise de la vulnérabilité. La littérature montre l'existence de plusieurs méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des nappes aux risques de pollution.

Parmi les nombreux outils cartographiques à la disposition de l'hydrogéologue ou de toute autre personne responsable de la gestion de ressources en eaux souterraines, la carte de vulnérabilité est ainsi l'un des éléments-clé pour la protection et la gestion des ressources en eau. Les cartes de vulnérabilité ont toutefois la particularité de ne pas représenter directement les ressources en eaux et leurs éléments associés (niveau piézométriques, source, etc.), mais plutôt un ensemble de paramètres dérivés de ces éléments, voire non-affiliés directement à

l'eau souterraine (pente, type de sols, etc.). Elles 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. Ces cartes sont également dépendantes du temps (à l'inverse des cartes géologiques, par exemple), dans le sens où les paramètres utilisés (profondeur du niveau piézométrique, intensité de la recharge, etc.) peuvent varier temporellement. 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.

Une carte de vulnérabilité subdivise ainsi une portion de territoire en unités spatiales homogènes (polygones ou cellules) montrant un même indice de vulnérabilité, basé sur plusieurs paramètres de l'unité spatiale considérée (paramètres géologiques, pédologiques) (Romain Ducommun, 2010).

1.3.1 Concept de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Le concept d'évaluation de vulnérabilité est basé sur l'hypothèse que le système, impliquant les sols, les roches et les eaux souterraines, peut offrir un degré de protection contre la contamination des eaux souterraines par atténuation naturelle. La vulnérabilité est une propriété intrinsèque selon la sensibilité du système aux impacts, à la fois naturelles et humaines (UNESCO, 2002).

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité ; la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique (Schnebelen et al, 2002) :

- La vulnérabilité intrinsèque : est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines ;

La vulnérabilité spécifique : 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

Les différentes méthodes utilisées sont :

- ✚ A.V.I (Canada) **Aquifer Vulnerability Index**, Cette méthode cherche à évaluer le temps de transport d'éventuels contaminants en fonction de l'épaisseur de la zone non saturée (Z.N.S). Elle est développée par l'Institut de Recherche National d'Hydrologie (National Hydrology Research Institute –NHRI) à Saskatoon, Saskatchewan (Canada),

la méthode de l'index de vulnérabilité des couches aquifères détermine un critère de protection des eaux souterraines. AVI mesure la vulnérabilité selon la résistance hydraulique (C) à l'écoulement vertical de l'eau opposée par les formations géologiques situées au-dessus de la couche de l'aquifère.

- ✚ C.O.P (**Espagne**) **C**oncentration of flow, **O**verlying layers, **P**recipitation regim, cette méthode a été appliquée dans le Sud de l'Espagne dans la région de Torremolinos (*Vias*). *J.M., 2009*).
- ✚ D.R.A.S.T.I.C (**U.S.A**) **D**epth to water, net **R**echarge, **A**quifer media, **S**oil media, **T**opography, **I**mpact of vadose and hydraulic **C**oductivity, est une méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque verticale à la pollution des aquifères par systèmes paramétriques; le principe commun de ces systèmes consiste à sélectionner préalablement les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. Chaque paramètre est subdivisé en intervalles de valeurs significatives et affecté d'une cotation numérique croissante en fonction de son importance dans la vulnérabilité.
- ✚ E.P.I.K (**Suisse**) **E**pikarst, **P**rotective cover, **I**nfiltration conditions, **K**arst network. Cette méthode largement employée en Suisse est devenue obligatoire dans ce pays pour définir la vulnérabilité des bassins karstiques captés pour l'AEP suite à la loi fédérale sur protection des eaux de 1991. Elle a été développée dans le but de délimiter les périmètres de protection des captages, conformément à la législation Suisse. L'un des avantages de cette méthode est de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis de tout type de contaminant. La méthode est systématique puisqu'elle propose une analyse détaillée du bassin d'alimentation de la source karstique découpé en un maillage régulier. La méthode a été testée sur le site de St-Imier dans le Jura Suisse (*Doerfliger. N et Zwahlen, 1998*).
- ✚ G.O.D (**Pays-Bas**) **G**roundwater occurrence, **O**verlying lithology, **D**epth to groundwater. Ce système a été développé par Foster en 1987 et a pour but l'estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère. Il est basé sur l'identification de trois critères :
 - Type de nappe (Ground water occurrence)
 - Type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques (Overall aquifer class) ;
 - Profondeur de la nappe (Depth to ground water table).

- ✚ **GLA-method (Allemagne)** Geologisches Landesamt (méthode dont les principes sont repris deans PI-method).
- ✚ **L.E.A (Angleterre et Pays de Galles)** Localisation European Approach.
- ✚ **P.I-method (Allemagne)** Protective cover, Infiltration condition. Récemment appliquée dans une zone de Sud-Ouest de l'Allemagne.
- ✚ **R.E.K.S (Slovaquie)** Rock type, Epikarst, Karst network, Soils. Cette méthode a été testée en Slovaquie sur le plateau de Muranka ([Malik et Svasta, 2005](#))
- ✚ **R.I.S.K.2 (France)** Roche, Infiltration, Sol, Karstification, Epikarst. Récemment appliquée dans le Sud de la France sur plusieurs systèmes du Larzac ([PUSKAS, 2003](#) ; [FONTAINAL, 2004](#) ; [PLAGNES et Al, 2006](#)).
- ✚ **S.I.N.T.A.C.S. et S.I.N.T.A.C.S. Pro Karst (Italie)** Soggiacenza (profondeur de la nappe), Infiltrazione (Infiltration), Azione del Non Saturo (fonction de la zone non saturée), Tipologia della Copertura (Sol), Caratteri Idrogeologici dell'Acquifero (caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère), Conducibilità Idraulica (conductivité hydraulique), Acclività della Superficie Topografica (pente moyenne de la topographique). L'évolution de cette méthode au milieu karstique préconise d'intégrer les morphologies karstiques de surface et données hydrogéologiques ainsi que l'adaptation du critère C pour le karst. Récemment appliquée en Italie dans la région de Veneto, sur le plateau karstique de la combe de Setter ([CUCCI et Al, 2007](#)).

Tableau 1.1 : Attributs de la vulnérabilité de l'eau souterraine et paramètre associé modifié d'après (VRBA, 1991 ; Romain Ducommun, 2010)

Supplémentaire	Principaux	Vulnérabilité intrinsèque				Vulnérabilité spécifique
		Importance premier		Importance secondaire		
		Paramètre	Attributs			
Capacité d'échange cationique	Texture structure	Soil				
Capacité de sorption et réduction	Epaisseur					
Densité totale, Teneur Maximale en eau. Paramètre de	Epaisseur, Lithologie (consolidation et stratification Inklus) . Temps de Transit de l'eau	Zone non saturée				
Taux d'altération perméabilité	Epaisseur, Lithologie (consolidation et stratification Inklus). Conductivité hydraulique, Direction D'écoulement. Age et temps de Résidence de l'eau	Zone saturée				
Accessibilité hydraulique (non confinées semi confine coefficient	Recharge annuelle nette					
Transmissivité, coefficient d'emmagasinement	Précipitation annuelle					
Evapotranspiration. Evaporation	Pente. Variabilité topographique de la surface					
Température moyennes de l'air	Perméabilité, Structuration et Tectonique					
Couvert végétal	Zone de recharge et exutoire					
Aquifères confinés : même paramètres pour les formations au toit de l'aquifère	Débit d'échange, Nappe-rivière					
	Perméabilité des zones de contact interface eau					
Temps de Résidence des Contaminants	Capacité d'atténuation du sol de la zone non saturée et l'aquifère par type de contaminant					
Dans l'aquifère caractéristique du Transport de contaminant (demi-vie Recharge artificielle Irrigation et Drainage	temps de transit pour le transport du type de contaminant					

1.3 Les critères des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution

La notion de vulnérabilité des nappes souterraines à la pollution intègre les différents facteurs physiques déterminant l'état dans lequel ces nappes se trouvent, dans les conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. Ces facteurs, d'ordre hydrogéologique pour l'essentiel, sont en général appréciables à priori en se basant sur les connaissances géologiques et hydrogéologiques générales.

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (GOG ET DASSARGUES, 1998)..

1.3.1 Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert. Elle est évaluée en prenant en compte les caractéristiques du sol, de la zone non saturée et de la zone saturée qui contrôlent le comportement des polluants. L'ensemble des critères de vulnérabilité rencontrés dans la littérature sont exposées ci-dessous :

A / Critères relatifs aux conditions de surface

Les critères de pédologie comme la nature des sols, leur texture, la perméabilité verticale des sols, vont réguler la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la zone non saturée (ZNS).

B/ Critères relatifs à la zone non saturée

La profondeur de la nappe libre (l'épaisseur de la Zone Non Saturée) conditionne le temps de transfert d'un polluant de la surface du sol jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interaction physico-chimiques avec l'encaissement) et donc son éventuelle dégradation en cours de transfert. La perméabilité verticale de la ZNS dicte le temps de transfert ou même peut empêcher le transfert vertical d'un polluant vers la nappe. La structure de la ZNS (variation de faciès, épaisseur de discontinuités de faciès, position dans le profil vertical, texture, teneur en matières organiques et argile) conditionne la migration de fluides vers la nappe.

C/ Critères relatifs à la zone saturée

Ces critères ne sont pas toujours pris en compte dans la détermination de la vulnérabilité. Certains auteurs considèrent uniquement la facilité et la rapidité suivant lesquelles

des matières polluants d'origine superficielle peuvent atteindre l'eau souterraine, et ne prennent pas en compte les conditions hydrodynamiques de la zone saturée. La nappe est alors considérée comme vulnérable, dès l'instant où le polluant l'a atteint.

Les critères relatifs à la zone saturée sont les suivants :

- le type de nappe (libre ou captive) joue un rôle important : l'absence d'horizon imperméable entre la surface et le toit d'une nappe libre lui confère un caractère plus vulnérable qu'une nappe captive protégée par des formations imperméables.
- La transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emménagement et le gradient hydraulique déterminent la vitesse de migration des polluants dans la nappe.
- La piézométrie et le type de relation entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (drainage ou alimentation) conditionnent la possibilité de contamination des eaux souterraines. Entre les hautes eaux et les basses eaux, les relations eaux superficielles/eaux souterraines peuvent s'inverser.
- Les directions et sens d'écoulement de la nappe déterminent les espaces susceptibles d'être atteints par un polluant une fois que celui-ci atteint la nappe.
- Le type de système hydrogéologie (transmissif ou inertiel) joue sur les temps de transfert de séjour dans la nappe.
- La recharge, c'est-à-dire la quantité d'eau atteignant la Zone Saturée sur une période donnée (Recharge annuelle nette) constitue aussi un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines. La quantité d'eau en réserve détermine les conditions de dilution d'un polluant ayant atteint la nappe.

D/ Critères communs au sol, à la Zone Non Saturée et à la Zone saturée

Le système de fracturation, les discontinuités verticales telles que les failles peuvent augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe. Le bilan hydrique détermine l'infiltration efficace et donc la potentialité d'un polluant à pénétrer dans le sous-sol. Les principaux facteurs sont : le climat, l'ETP (Evapotranspiration) et la précipitation.

1.4 Méthode SI (susceptibility Index)

La méthode SI (susceptibility Index ou méthode d'Index de Susceptibilité), qui estime la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides), a été développée au Portugal par RIBEIRO (2000). Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont

identiques aux quatre paramètres déjà utilisés dans la méthode DRASTIC (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la pente topographique du terrain). Un cinquième nouveau paramètre a été introduit : le paramètre occupation des sols (OS). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Lande Cover (European Community, 1993). Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU (Land Use), variant de 0 à 100 (allant du moins vulnérable au plus vulnérable), est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité. La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices obtenues. Il est à signaler que les paramètres, qui ne sont pas pris en compte dans la méthode SI par rapport à la méthode DRASTIC sont les suivants : conductivité hydraulique de l'aquifère, impact de la zone vadose et type de sol. En effet, la méthode SI considère que le paramètre conductivité hydraulique de l'aquifère est difficile à évaluer dans l'espace. RIBEIRO(2000) minimise également le rôle de la zone vadose en se basant sur les travaux de FOSTER (1987), et ceux de VRBA et ZOPOROZEC (1994) qui considère également que les processus d'atténuation relatifs au paramètre type de sol sont sans grand effet sur la vulnérabilité, bien que ce paramètre soit indirectement pris en considération à travers le paramètre d'occupation des sols. Plusieurs applications de cette méthode ont été effectuées à travers le monde (Batista, 2004 ; frances et al, 2002 ; oliveira et lobo ferreira, 2005 ; stigter et al. 2006). Ces études ont montré une bonne corrélation entre les zones considérées comme vulnérables par cette méthode et les zones réellement contaminées.

1.5 Origines de la pollution par les nitrates :

On trouve trois principales sources de pollution d'eau par les nitrates : Domestique, agricole et industrielle (BRGM., 2004).

1.5.1. Pollution domestique :

Dans le cas d'un assainissement, collectif ou individuel, défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannes et les eaux ménagères peuvent être transférées à la nappe (matières organiques, détergentes, solvants, antibiotiques, micro-organismes...). Le cas se produit avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol

mal conçu ou mal dimensionné, les stations d'épurations urbaines surchargées... (Faurie et al.,2003).

Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou non mises à la norme libèrent également des lixiviats riches en polluants.

1.5.2. Pollution agricole :

La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps ; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. En effet, les pratiques actuelles des cultures et de l'élevage influencent fortement le régime et la qualité des eaux. L'utilisation massive des engrais et des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropres à la consommation humaine, et parfois animale, les eaux superficielles et souterraines (Faurie et al.,2003), alors que les professionnels agricoles ont longtemps nié l'impact de leur activité sur la qualité de l'eau et refusé la moindre contrainte.

Le transfert des engrais et pesticides à la nappe se fait soit par infiltration sur l'ensemble de la surface cultivée, soit par rejet dans des puits perdus, des gouffres et bétoires. La pratique de l'irrigation accélère le transfert. Une pollution ponctuelle commune est fournie par les eaux de rinçages des récipients et appareils d'épandage. L'épandage des boues de stations d'épuration pose problème par leur charge possible en métaux lourds et germes, en plus de leur richesse en azote résiduelle après culture (Chekroud, 2007).

Les élevages intensifs de bovins et volailles produisent une grande quantité de déjections azotées qui doit être stockées en réservoirs étanches avant d'être utilisée comme engrais (ou comme aliments...) (Beaux, 2003).

1.5.3. Pollution industrielle :

Elle constitue la deuxième source de pollution des eaux de surface et souterraines et peut avoir des causes variées. Les plus fréquentes sont les dépôts de déchets, les bassins d'eau de lavage ou de traitement de l'industrie minière, métallurgique ou chimique, qui ont été placés sans précautions, à même le sol, sur des terrains trop perméables. Les installations de stockage ou de transport des produits et déchets des complexes chimiques, raffineries, papeteries, industries alimentaires, peuvent aussi donner lieu à des pollutions chroniques ou accidentelles (Gaujous,1995).

Cette pollution est caractérisée par :

- des matières organiques et graisses (industries agro-alimentaires)
- des hydrocarbures (raffineries)
- des métaux (traitement de surface métallurgique)
- des acides, bases et produits chimiques divers (industries chimiques)
- de l'eau chaude (circuits de refroidissement des centrales thermiques)
- des matières radioactives (centrales nucléaires)

1.6 Principaux types de pollution des eaux souterraines

1.6.1. Pollution temporaire et chronique

L'émission exceptionnelle de matière polluante à la suite d'un incident (mauvaise manoeuvre en usine, accident de la circulation...) peut entraîner un transfert à la nappe et sa pollution dont la durée dépend de son pouvoir d'auto-épuration et de sa vitesse de percolation. Les pollutions chroniques sont plus insidieuses et dommageables ; moins spectaculaires, elles peuvent passer inaperçues (pollution agricole par les nitrates ; contaminations par les hydrocarbures à partir de sols pollués) (Kankou, 2004).

1.6.2. Pollution ponctuelle et diffuse

Le polluant émis sur une faible surface n'affectera qu'un secteur limité de la nappe, qui pourra s'étendre par diffusion. Seuls les captages à proximité de la zone polluée et en aval seront affectés (Chekroud, 2007).

Selon la densité et la solubilité du polluant, la zone polluée sera circonscrite ou diffuse, à la surface ou à l'intérieur de la nappe.

L'épandage de produits polluants sur une grande surface en revanche affecte l'ensemble de la nappe; elles sont de plus souvent chroniques et décline l'ensemble de la nappe pour la production d'eau potable, à moins de traitements adaptés (cas des pollutions agricoles par pesticides) (Kankou, 2004).

1.6.3. Pollution linéaire

Elle accompagne le trajet des routes et autoroutes, des canaux, des cours d'eau, des voies ferrées (Chekroud, 2007).

1.6.4. *Pollutions historiques*

De nombreuses zones polluées l'ont été à une époque où les préoccupations environnementales étaient inconnues ou sommaires : pollution par les terrils de mines, les décharges non contrôlées (Chekroud, 2007).

1.7 Les mécanismes de transfert des polluants

De nombreux facteurs environnementaux interviennent dans le devenir et le transfert des pollutions :

- **les propriétés et les caractéristiques physico-chimiques intrinsèques des contaminants.** Ces informations sont généralement bien connues et portent sur de nombreuses caractéristiques comme la solubilité, la densité, le temps de demi-vie ou la capacité d'adsorption de la matière organique ;
- **les propriétés physico-chimiques des milieux et les interactions « milieux–contaminants ».** Par exemple, les processus physiques et/ou chimiques qui déterminent la répartition des polluants dans les différentes phases des milieux environnementaux ;
- **les propriétés biologiques des milieux** (activité microbienne et fongique, rhizosphère, etc.), qui jouent un rôle essentiel, direct ou indirect, dans le cycle biogéochimique des polluants inorganiques et dans les mécanismes de dégradation des polluants organiques ;
- **les voies de transfert concernées et leurs vecteurs**, comme le transport des polluants par les eaux de ruissellement (eaux de pluie, eaux de surface) ; le transport des polluants par infiltration gravitaire directe et/ou par des eaux de pluie ou des eaux de surface (transfert vers ou au sein de la zone non saturée, transfert vers la zone saturée) ; le transport des polluants par les eaux souterraines ; la volatilisation des polluants des eaux souterraines vers les sols puis des sols vers l'air intérieur ; la dispersion aérienne des polluants par envol des particules et poussières, suivie de retombées aux sols ; le transfert des contaminants vers la biosphère et leur devenir dans les chaînes trophiques/alimentaire.

1.8 Effets de certains paramètres chimiques sur la santé humaine

Nous présentons ici quelques effets négatifs des taux élevés des éléments chimiques majeurs sur la santé humaine :

❖ *Effets du Calcium et Magnésium*

La présence de ces éléments à des taux élevés c'est la base des maladies néphrétiques. Dépassant un certain seuil le magnésium provoque des troubles digestifs chez l'adulte. Néanmoins, ces deux éléments présentent des avantages pour la santé, le calcium constitue un fortifiant des os et le magnésium favorise les réactions métaboliques (Chekroud, 2007).

❖ *Effet du Sodium et potassium*

Le sodium peut causer des crises d'hypertension et de cardiopathies, quand il est présent en concentrations importantes. Le potassium a un effet laxatif, mais il donne un léger goût. Généralement il ne présente pas d'inconvénients.

❖ *Effets des sulfates*

Les fortes concentrations des sulfates provoquent des irritations gastro-intestinales.

❖ *Effets des chlorures*

Les eaux riches en chlorures sont agressifs et de mauvais goût. Elles sont nocives pour les plantes.

❖ *Effets des nitrates*

La concentration des eaux ayant des teneurs élevés de nitrate provoque l'irritation des muqueuses. L'ingestion de qualité plus élevée entraîne des nausées, des vomissements et des selles sanguinolentes (Kankou, 2004).

❖ *L'ammonium*

Il s'agit d'un produit intermédiaire entre l'urée et les protéines. Son identification indique la pollution. Cet élément se transforme en ammonium toxique. L'ammonium dans certaines réactions, en présence d'hypochlorite donne la monochloramine qui est cancérogène (Kankou, 2004).

1.9 Cycle de l'azote

Le cycle de l'azote dans les sols est marqué par différents processus dont les effets cumulés conduisent ou non à maintenir un excès d'azote dans les sols, et à le rendre disponible pour le lessivage. L'azote dans les sols provient principalement :

1. De la fixation de l'azote atmosphérique ;
2. De la déposition de l'azote contenu dans les précipitations ;
3. Des amendements organiques ;
4. Des apports d'engrais de synthèse.

La fixation libre par les bactéries aérobies ou anaérobies contribue à maintenir un stock d'azote de 10 à 30 kg/ha, l'apport d'azote par la fixation symbiotique des espèces légumineuses variant entre quelques dizaines à plusieurs centaines de kg/ha, selon les conditions de pH, d'humidité, de teneurs en nitrate et de souches de *Rhizobium* (Recours et al., 1997).

Les apports d'azote sous forme organique dans les sols se font par amendements anthropiques (fumiers, lisier), restitution au sol des résidus de culture et /ou restitution des déjections animales. La constitution du stock d'azote minéral dans le sol est issue des apports d'engrais de synthèse, sous forme d'ammonium, de nitrate et d'urée.

L'effet des processus internes au cycle de l'azote peut être dominant par rapport aux modifications induites par les processus extrêmes (Webb and Walling, 1985).

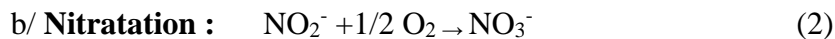
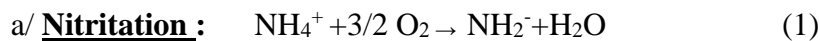
Les processus internes interagissent avec les processus externes au cycle de l'azote, contrôlant le stock et les formes de l'azote contenu dans le sol, quelle que soit l'origine de ce dernier (Recours et al., 1997) :

A. **La minéralisation ou ammonification** : correspond à la dégradation de la matière organique, conduisant à la production d'ammonium (NH_4^+). La minéralisation est d'autant plus forte que les apports sont importants, elle est maximale au printemps et à l'automne lorsque les températures sont douces et le sol humide.

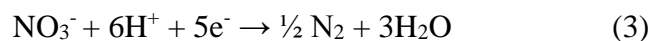
B. **L'organisation ou immobilisation** : correspond à l'assimilation d'azote. Préférentiellement sous forme ammoniacale par les micro-organismes.

C. **La nitrification** : correspond à l'oxydation biologique de l'azote ammoniacal en azote nitrique (NO_3^-). Les étapes successives de la nitrification se font par l'intermédiaire de deux familles de bactéries principalement présentes dans les sols : *Nitrosomonas* pour la nitrification (transformation de NH_4^+ en NO_2^-) et *Nitrobacter* pour la nitrification (transformation de NO_2^- en NO_3^-).

Ces transformations sont illustrées dans les équations chimiques suivantes :



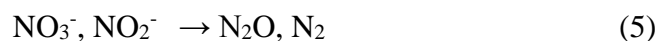
D. La dénitrification : est la transformation de l'azote nitrique en azote gazeux (N_2). La dénitrification fait intervenir de nombreuses espèces bactériennes (dont *Pseudo mas*, *Agrobacterium*) dont l'action est maximale dans des conditions d'anoxite, de présence de nitrate et d'une source de carbone assimilable. L'ion NH_3^- est utilisé comme accepteur final d'électrons à la place de l'oxygène. La dénitrification conduit principalement à la libération d'azote gazeux N_2 comme le montre l'équation chimique suivante :



La dénitrification peut être d'origine chimique ou biologique. La première a lieu dans cas de pertes d'azote nitrique en sols acides ; ce processus est régi par la réaction suivante :



Cette dénitrification est peu importante lorsqu'on la compare avec la dénitrification biologique, produite par les microbes dénitrificateurs ; processus est régi par la réaction suivante :



E. La volatilisation :

Le processus qui transforme l'ammonium (NH_4^+) en ammoniac (NH_3) s'appelle la volatilisation comme le montre l'équation chimique suivante :



L'ammonium se transforme rapidement en ammoniac lorsque les températures du sol et de l'air sont élevées et que le temps est sec. Les possibilités que l'ammonium se transforme en ammoniac augmentent de façon exponentielle à mesure que le pH s'accroît, de sorte qu'il faudrait éviter les engrais ammoniacaux lorsque le pH du sol est supérieur à 7,0.

Dans des conditions favorables à la volatilisation, jusqu'à 50 % de l'azote appliqué peut être éliminé par ce processus. Pour être utilement entraîné dans le sol, l'ammonium doit se dissoudre rapidement dans l'eau du sol. Le meilleur moyen d'y arriver consiste à incorporer l'ammonium dans un sol humide et frais. Si les conditions sont propices à la volatilisation, il

faudra éviter d'épandre des engrais à teneur élevée en ammonium (urée, fumier) (NICOLAS. T., 2001).

F. La lixiviation ou lessivage : est le processus correspondant au transfert de l'azote via les eaux de percolation du sol vers la nappe. La lixiviation concerne principalement l'azote sous forme NO_3^- , du fait de sa forte solubilité, et de faible capacité, contrairement à l'ion NH_4^+ , à être retenu par le complexe argilo humique.

1.10 Les conséquences des nitrates sur

➤ la santé :

Les nitrates (NO_3^-) et les nitrites (NO_2^-), sont toxiques pour les êtres vivants.

Ils transforment l'hémoglobine du sang en une substance proche à la méthémoglobine qui ne joue plus son rôle dans l'oxygénation des tissus. L'excès de nitrites et de nitrates peut donc entraîner une anémie grave, surtout chez les nourrissons. Les femmes enceintes consommant de l'eau chargée en nitrates peuvent indirectement entraîner une anémie de l'enfant en cours de développement.

Les nitrites peuvent aussi se combiner au cours de la digestion avec des dérivés de protides et former des substances soupçonnées d'être cancérigènes : les nitrosamines.

Pour éviter les intoxications, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a fixé la dose de nitrates journalière admissible (DJA) à 3,65 mg/kg de poids corporel (soit 255 mg pour un homme de 70 kg). En tenant compte de l'ensemble des apports (aliments + boissons), les normes et recommandations pour les eaux d'alimentations sont :

- Une eau contenant moins de 50 mg/l peut être consommée sans restriction et ne doit pas être consommée par les femmes enceintes et les nourrissons si elle est très proche ou égale à 50 mg/l ;
- plus de 100 mg/l, l'eau doit être considérée comme non potable pour l'ensemble de la population.

La consommation de légumes et de fruits, qui en contiennent toujours des nitrates quel que soit leur mode de culture, entraîne une ingestion chez l'adulte. Chez les nourrissons, c'est la consommation d'eau qui est la principale source de nitrates.

Environ 20% des nitrates sont transformés par la flore buccale en nitrites. Ces derniers sont considérés néfaste et toxique en présence dans l'organisme humain à des teneurs élevées .mais la toxicité des nitrates reste toujours à discuter. Il n'y a toutefois aucune certitude à ce sujet à ce jour, que les interactions entre le nitrite et les amides et amines susceptibles de former des composés azotés cancérigènes.

✓ Contrairement, certains scientifiques avancent les effets bénéfiques des nitrates, notamment contre les infections, les carcinomes et les maladies cardio-vasculaires.

✓ Les nitrates (NO_3^-) ne sont pas toxiques pour l'homme. Le problème provient de leur transformation en nitrites (NO_2^-), dont l'estomac contient encore des bactéries actives, les nitrates peuvent réagir avec les amines secondaires apportés par l'alimentation pour former des nitrosamines (Dab, 1990). Dans l'intestin des adultes, on suspecte les nitrates de favoriser ainsi l'accroissement des cas de cancers du côlon causé par la présence de fortes teneurs de nitrites qui réagissent avec les matières organiques formant ainsi des nitrosamines qui ont le caractère cancérigène.

✓ Dans le sang : Les nitrates peuvent transformer l'hémoglobine en méthémoglobine non fonctionnelle par des bactéries présentes dans le tube digestif. Tout particulièrement pour les nouveau nés ce qui les rendent vulnérables à une forme d'anémie qui bloque le transfert d'oxygène : c'est la méthémoglobine qui touche essentiellement les nourrissons ce qu'on l'appelle (syndrome du bébé bleu) (EEC, 2001).

➤ L'environnement

Plusieurs études et recherches ont confirmé que les activités agricoles avec des conditions bien spécifiques peuvent avoir une influence négative sur l'environnement (Dewes, 1995 ;Sapek, 1997). En effet, les ions nitrates avec les ions phosphates, sont aujourd'hui la cause majeure de l'eutrophisation des eaux. Ces ions, très solubles dans l'eau, sont donc facilement drainés par les eaux de pluie, de ruissellement et d'infiltration.

✓ . Eutrophisation

L'eutrophisation d'un milieu aquatique désigne son caractère eutrophie (du grec eu « bien,vrai» et trop hein« nourri ») c'est à dire riche en éléments nutritifs, initialement sans caractère négatif, mais souvent employé pour désigner le déséquilibre qui résulte d'un apport excessif de nutriments. L'eutrophisation se définit comme la manifestation, en termes de

métabolisme général (production et respiration) d'un écosystème, d'apports exogènes de nutriments qu'il reçoit. Ces manifestations peuvent revêtir des formes extrêmement diverses selon les secteurs concernés du réseau hydrographique (Es-Salhi, 2007). Cet enrichissement en nutriments dans les systèmes aquatiques, appelé eutrophisation, est responsable de nombreux problèmes tels que la mort d'espèces marines, l'éclosion de cyanobactéries toxiques et l'anoxie des cours d'eau, ce qui résulte une perte de la biodiversité.

La présence de concentrations excessives d'ion nitrate et de phosphate dans les écosystèmes d'eau douce conduit à la prolifération non contrôlée des algues et des plantes qui se traduit par une augmentation des dépôts de matière organique au fond des cours d'eau.

Les bactéries et autres espèces hétérotrophes dégradent cette matière organique en utilisant de grandes quantités d'oxygène. Il s'en suit une hypoxie qui peut parfois engendrer l'asphyxie des poissons dans les systèmes très productifs ou hyper-eutrophies (Adriano, 1992). Aussi, des examens effectués par Ménesguen (2003) sur un site atteint du phénomène de marées vertes prouvent que la biomasse maximale atteinte annuellement est contrôlée par les apports d'azote et non par ceux de phosphore, il en déduit alors que l'azote est l'élément nutritif limitant de la croissance algale en fin de printemps et en été.

✓ . *Fuites des nitrates et pollution nitrique des nappes souterraines*

Les fuites des nitrates vers les eaux souterraines, que l'on peut également nommer lixiviation, se produisent en période d'excès hydrique lorsque la réserve en eau du sol est remplie. La lixiviation des nitrates est un processus physique naturel, qui peut être augmenté lorsque le cycle de l'azote est perturbé par certaines pratiques agricoles et certains changements d'occupation du territoire. Les processus du sol qui contrôlent le cycle de l'azote dans le sol, et donc la quantité d'azote, sont nombreux, mais les plus importants sont : L'absorption d'azote par les plantes, les apports d'engrais azotés (minéraux et organiques), la minéralisation, ainsi que la nitrification et la dénitrification. La concentration en nitrates du sol à un moment donné est le résultat de l'ensemble de ces processus (Guillaume, 2008). Nombreuses études concernant la lixiviation des ions nitrate ont été réalisées à l'échelle de la parcelle (Gaury, 1992 ; Arregui et Quemada, 2006). Ces études ont montré que la lixiviation des ions nitrate était dépendante du système de culture (type de culture, rotations, irrigation, fertilisation) et du contexte pédoclimatique.

1.11 La réglementation

La norme de concentration maximale en nitrates de l'eau potable admise par l'Organisation Mondiale de la Santé est de 50 mg de nitrates par litre d'eau.

L'Europe recommande une norme guide à 25 mg de NO_3^-/l d'après le Programme Interdisciplinaire de Recherche 2009 sur l'Environnement.

Selon l'institut National de normalisation la norme Algérienne de potabilité des eaux de consommation est de 50mg/l (Norme homologuée NA6360). Qui est proche aux normes américaines et canadiennes qui sont respectivement 45 mg/l et 44,5 mg/l.

Conclusion

Une eau souterraine est considérée comme polluée si elle contient des substances autres que celles liées à la structure des terrains où elle a séjourné. Ces contaminants soient physiques, chimiques, organiques ou micro biologique sont le plus souvent issus des activités humaines (agricoles, industrielles, et domestiques).

La restauration d'un aquifère polluée par des sources diffuses ou ponctuelles est irréalisable à l'échelle régionale, l'approche préventive face à la contamination des aquifères depuis la surface apparaît comme la seule option envisageable.

L'estimation du niveau de vulnérabilité des aquifères est un outil indispensable pour la gestion durable de la ressource en eau souterraine.

L'estimation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution fait appel à l'ensemble des processus impliqués dans un système hydrogéologique, depuis l'estimation de la recharge jusqu'à la dynamique de l'écoulement souterrain et au transport de soluté. L'estimation de la vulnérabilité à la pollution de l'eau souterraine rencontre encore un certain nombre de difficultés, spécialement pour avoir des résultats quantitatifs. Ceci est dû au fait qu'à chacun des paramètres impliqués est associé à un niveau d'incertitude, que les processus mis en jeu sont complexes et qu'ils se combinent.

Chapitre 2: Présentation de la zone d'étude

2. 1 Situation géographique

La zone d'étude est située dans la plaine du haut Cheliff. Cette dernière se trouve à 120Km au sud ouest de la capitale, Alger et appartient au bassin versant dit Haut Cheliff. Le bassin versant du haut Cheliff est une dépression intra-montagneuse de 500 km de longueur d'Est en Ouest et de 30 à 80 km de largeur. La plaine du Haut-Chéiff est connue aussi sous le nom de la plaine de Khemis Miliana.

La région d'étude couvre une superficie d'environ 360 Km², limitée au Nord par les monts du Zaccar (1576 m), au Sud par les contreforts de l'Ouarsenis (1700m), à l'Ouest par le massif de Doui et à l'Est par le seuil de Djendel.

La plaine est caractérisée par une pente relativement faible (< 10%) pour la majorité de la surface. Elle est comprise entre les coordonnées géographiques 36°12' - 36°17' de latitude Nord, et 2°12' - 2°17' de longitude Est. La plaine alluviale de khemis Miliana est marquée comme une zone à vocation agricole située dans la vallée de l'oued Cheliff, avec un nombre d'habitant d'environ 450.000 en 2015 dont 80 % de cette polpulation est concentrée dans les sept villes (Djendel, Ain Soltane, Khemis Miliana, Bir Ould Khelifa, Djelida, Sid Lakhdar et Arib) et le reste de la population est dispersé dans la plaine.

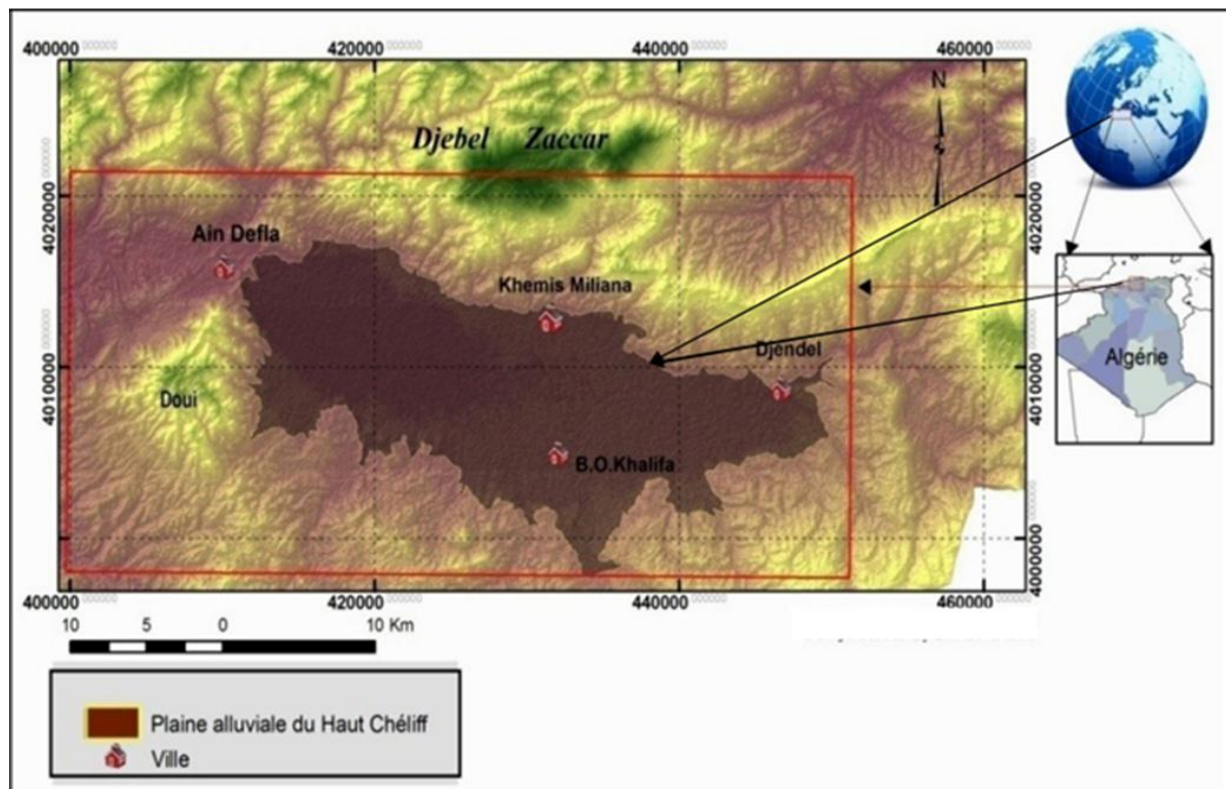


Figure 2.1 : Situation géographique de la zone d'étude (Gharbi.B,2014)

2.2 Contexte géomorphologique

Les paramètres géomorphologiques influencent sur l'écoulement des eaux superficielles, notamment le régime d'écoulement. La plaine est caractérisée par une altitude moyenne de 300m, avec une altitude maximale de 450m et une minimale de 207m.

Plus on s'éloigne de la plaine vers le Nord et vers le Sud plus l'altitude augmente, aussi elle diminue d'Est en Ouest.

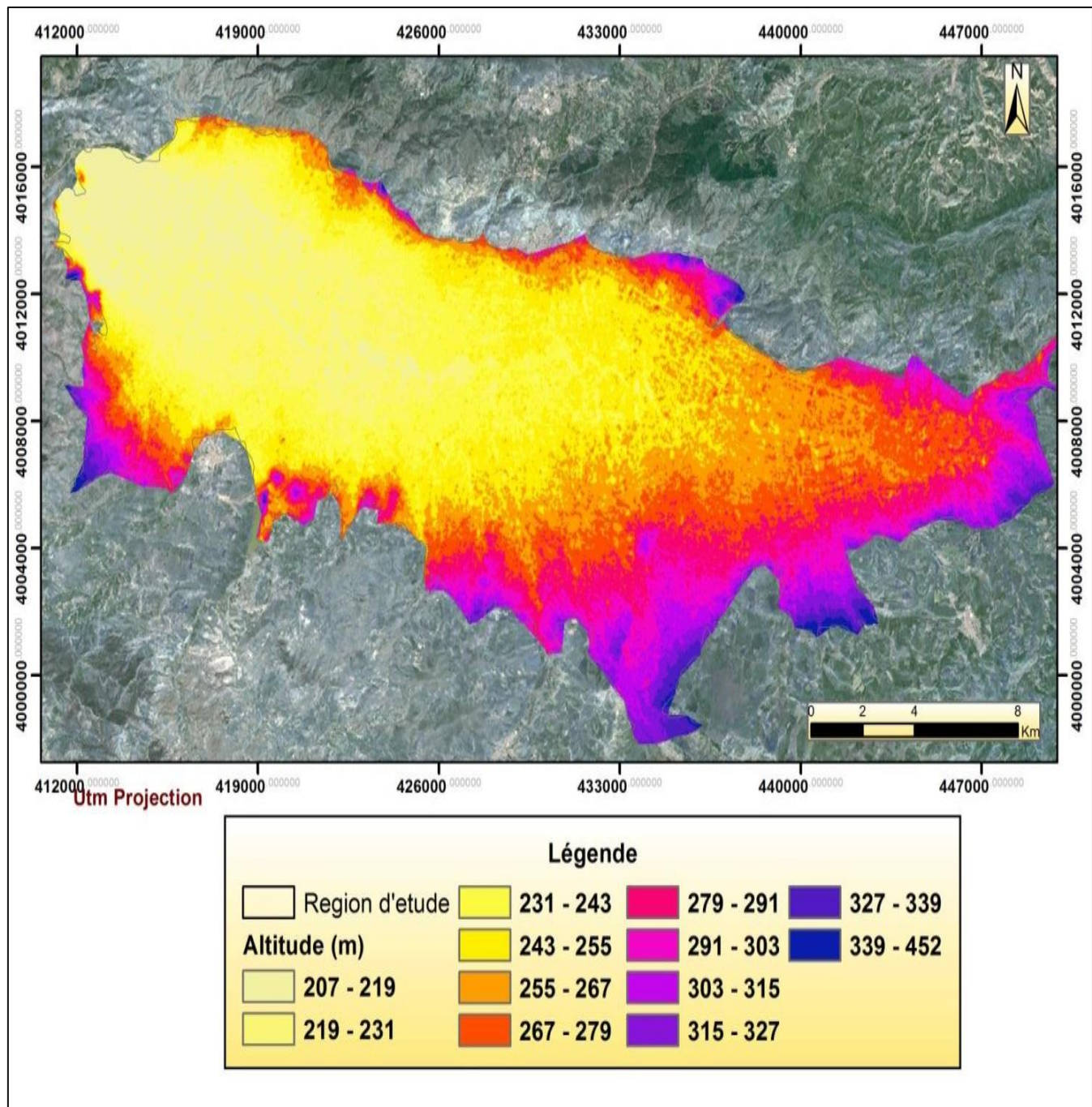


Figure 2.2 : Représentation topographique de la plaine alluviale de Khemis Miliana sous forme numérique (Sahraoui.N,2015).

2.3 Occupation du sol

D'après la carte d'occupation du sol (fig 2.3), on constate que les cultures maraichères occupent la première position en s'étalant sur toute la plaine et sont beaucoup plus concentrés dans la partie Est de la plaine du Haut Chélif près de la ville de Djendel.

Les cultures pratiquées durant les dernières années montrent que les superficies irriguées ne dépassent pas 6000 ha/compagne sur une totale de la surface agricole utile de 16300 ha.

Le périmètre du Haut Chélif est devisé selon l'axe de l'oued Cheliff en deux rives :

- La rive gauche d'une superficie agricole utile de 9523 ha qui est subdivisée en trois zones (Est, Ouest et Centrale).
- La rive droite découpée en cinq zones 1,2, 3,4 et 5.

La compagne d'irrigation commence à partir du mois d'avril, elle devient plus nécessaire à partir du mois de juin et indispensable pour le mois de juillet et août jusqu'au mois d'octobre, période durant laquelle la réserve est épuisée.

Une irrigation intensive est nécessaire pendant six mois de l'année (du mois de mars au mois d'août), elle se fait en arboriculture par la méthode de l'irrigation localisée (goutte à goutte), et en culture maraichère par aspersion. La culture de la pomme de terre est prédominante dans la région Est du périmètre.

La carte ci-dessous montre que 65 % de la surface de la plaine est occupée par des cultures annuelles (pomme de terre, tomate, oignon, melon, pastèque, carotte,...), 26 % est occupée par des cultures pérennes (agrumes, vergers,...), alors que les emprises urbaines et le réseau hydrographique occupent 4 % chacun.

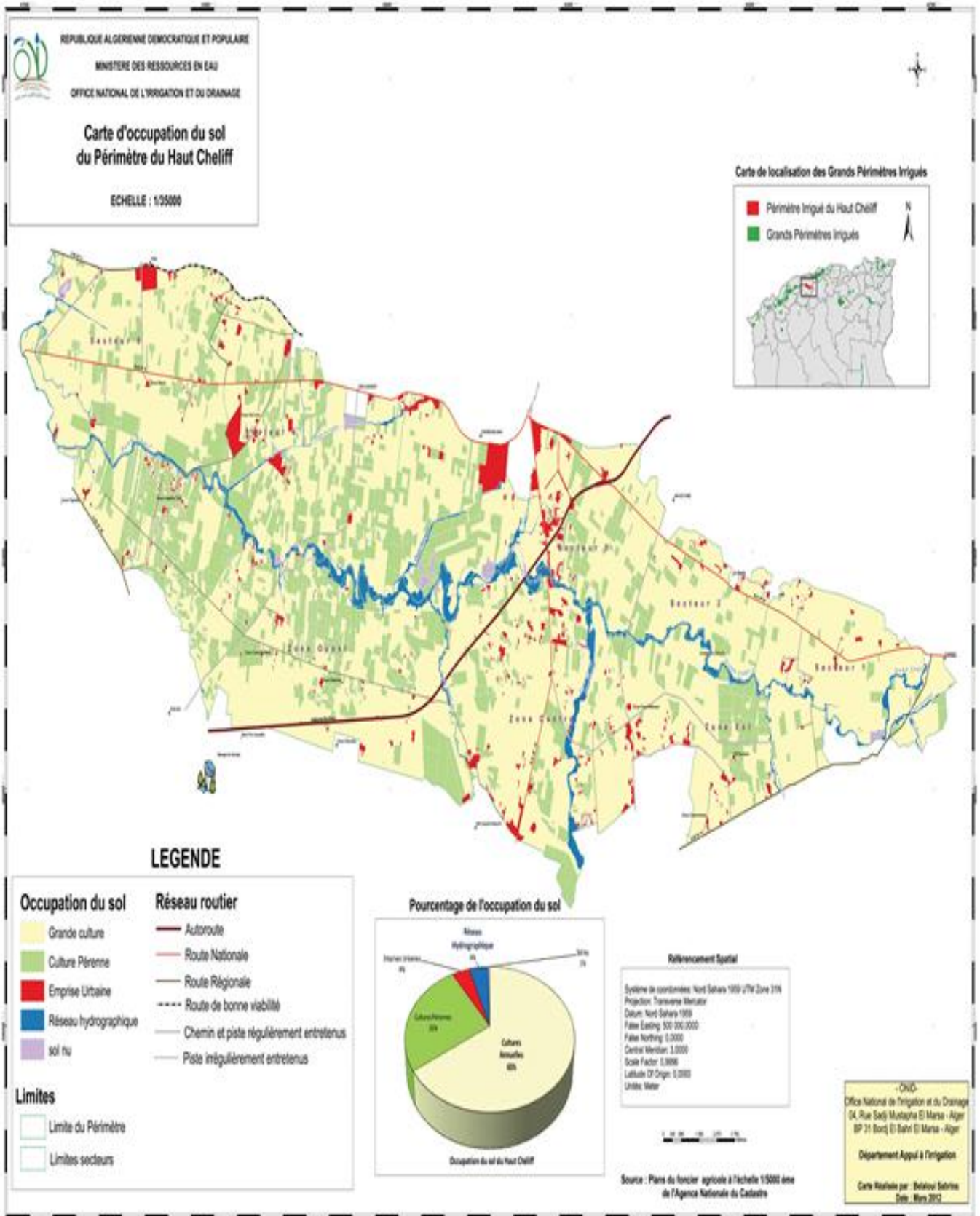


Figure 2.3 : la carte d'occupation du sol de la plaine du Haut Chélif (SOURCE : ONID,2012)

2.4 Cadre pédologique

Selon la carte des sols établie par BOULAINÉ (1957) et celle établie par MCDONALD ET BNEIDER (BUREAU NATIONAL D'ETUDE POUR LE DEVELOPPEMENT RURAL) (1990), deux grandes divisions des sols peuvent être distinguées :

✓ Les sols des bordures des plaines

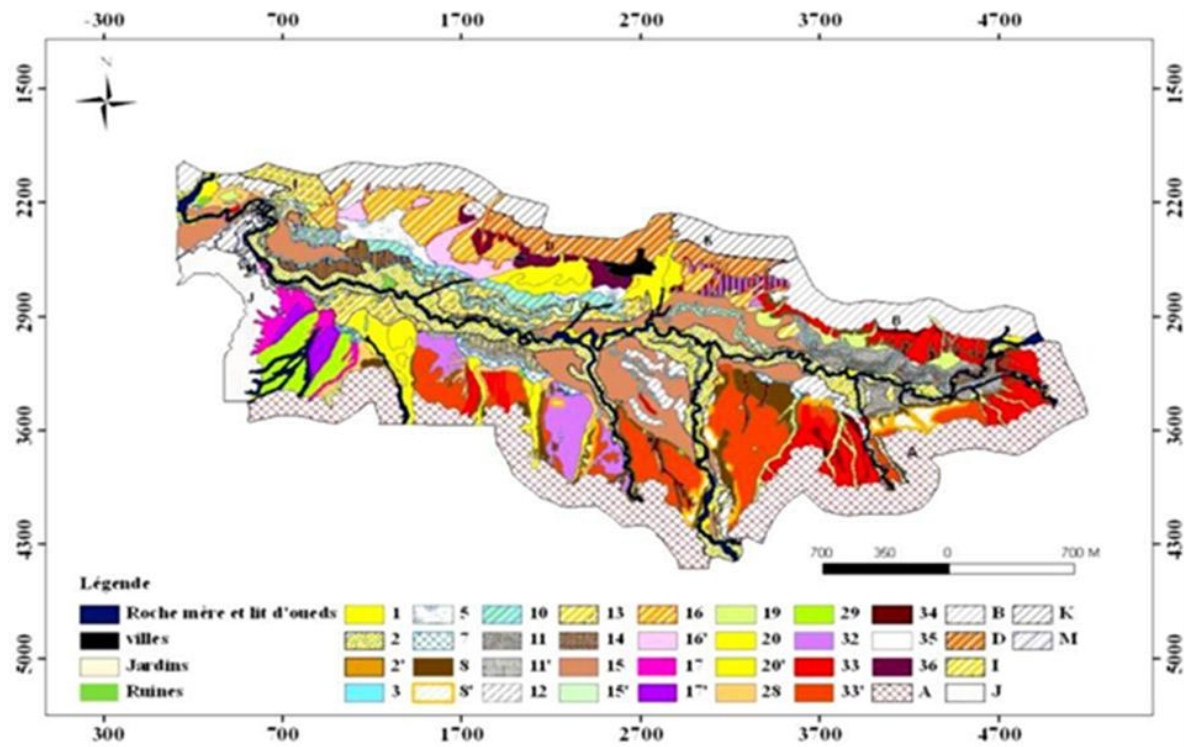
Ces sols sont formés par des associations suivantes :

- Association des sols à carapaces calcaires.
- Association des sols décalcifiés des sols jeunes formés sur les roches perméables et calcaire.
- Association des sols jeunes formés sur les grés et les marnes et de ces roches-mères.
- Association des sols formés sur les calcaires massifs et de ces roches-mères.
- Association des sols formés sur roches-mères siliceuses.
- Association des sols formés sur roches-mères schisteuses.
- Association des sols jeunes des glacis d'accumulation récents.

✓ Les sols de la plaine proprement dite

D'après la carte de Boulainé (Fig 2.4), huit classes ont été décrites :

Les sols alluviaux non évolués, les sols engorgés par l'eau (appelés aussi hydro morphes), les sols calciques, les sols alluviaux évolués, les sols colluviaux et sols alluviaux des affluents mineurs, les sols très évolués (qui sont divisés en sols partiellement décalcifiés et sols décalcifiés lessivés) et mélange de sol.



- 1- Sols alluviaux non évolués des dépôts sableux du lit majeur des oueds
- 2- Sols alluviaux non évolués des dépôts sableux du bourrelet des oueds.
- 2'- peu épais, recouvrant le sol figuré latéralement.
- 3- Sols engorgés par l'eau des réseaux d'écoulement des eaux superficielles des plaines
- 5- Sols engorgés par l'eau à couvert d'eau temporaire et à nappe phréatiques non salés.
- 7- Sols engorgés par l'eau à inondation temporaire hivernale.
- 8- Sols calciques formés sur carapaces calcaires.
- 8'- sols calciques humifères (sols rendziniformes).
- 10- Sols alluviaux tirsifiés ou sols alluviaux solonchiques.
- 11- Sols alluviaux présentant un début de décalcification et une accumulation progressive du calcaire ;
- 11'- avec tendance à la tirsification.
- 12- Sols alluviaux en voie de décalcification.
- 13- Sols alluviaux complexes à horizons d'accumulation des sulfates.
- 14- Sols alluviaux présentant un début de décalcification et une accumulation brusque du calcaire.
- 15- Sols alluviaux complexe.
- 16- Sols colluviaux et alluviaux provenant des massifs schisteux.
- 16'- en voie d'évolution par lessivage.
- 17- Sols colluviaux et alluviaux provenant des massifs siliceux.
- 17'- en voie d'évolution par lessivage.
- 19- Sols colluviaux provenant des massifs gréseux et des formations quaternaires anciennes
- 20- Sols colluviaux et alluviaux provenant des massifs marneux et argileux.
- 20'- voie d'évolution par lessivage.
- 28- Sols partiellement décalcifiés avec accumulation progressive du calcaire.
- 29- Sols insaturés à accumulation progressive du calcaire.
- 32- Sols décalcifiés, rubéfiés et lessivés, à accumulation progressive du calcaire.

- 33- Sols décalcifiés, rubéfiés et lessivés, à accumulation brusque du calcaire.
- 33'- sur carapace calcaire.
- 34- Colluviaux des sols rouges lessivés.
- 35- Daya des zones à carapace calcaire.
- 36- Pseudo-solonchiques rouges.
- 32+36- Association de sols.
- A- Association des sols à carapace calcaire.
- B- Association des sols décalcifiés et des sols jeunes formés sur les roches perméables et calcaire.
- D- Association des sols jeunes formés sur les grés et les marnes et de ces roches-mères.
- I- Association des sols formés sur les calcaires massifs et de ces roches -mères.
- J- Association des sols formés sur roches-mères siliceuses.
- K- Association des sols formés sur roches-mères schisteuses.
- M- Association des sols jeunes des glaciaires d'accumulation récents.

Figure 2.4 : La carte des sols de la région du Haut-chéiff (BOULAINÉ, 1957)

2.5 Réseau Hydrographique

L'oued de Chélif occupe le fond de la vallée laquelle il s'écoule d'Est vers l'ouest. Il est alimenté surtout par les précipitations. Les affluents de l'oued Chélif sont :

Oued souffay : il collecte les eaux provenant des précipitations qui ont lieu sur le mont du Zaccar dans la partie nord du secteur d'étude, il reçoit les eaux usées de la partie Est de la ville de Khemis Miliana.

Oued Boutane : cet Oued collecte dans sa partie nord l'ensemble des eaux provenant des monts de Zaccar et les eaux usées de la partie centrale de la ville de Khemis Miliana puis s'écoule vers la plaine.

Oued Deurdeur : il prend sa source dans les monts d'Ouarsenis dans la partie sud du secteur d'étude, ensuite il rejoint l'Oued Chélif.

Oued Harraza : il prend sa naissance dans la partie sud dans les monts de l'Ouarsenis, il est caractérisé de son débit plus élevé par rapport aux Oueds de la région du fait de l'importance de la surface de son impluvium, pour qu'il rejoigne après l'Oued Chélif.

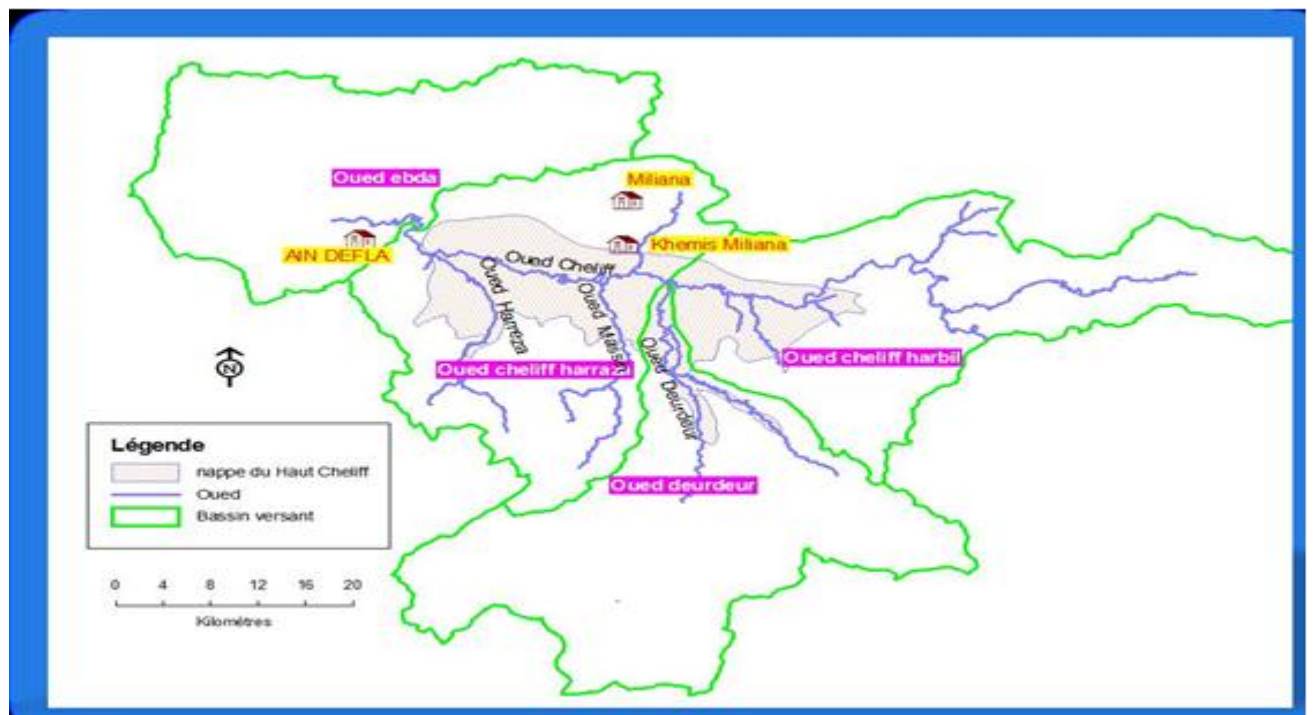


Figure 2. 5 : Carte du réseau hydrographique du haut Chélif (SOURCE : ABH-CZ)

2.6 Hydroclimatologie

La zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride de type méditerranéen avec des étés chauds et secs, des printemps écourtés (avril-mai), des automnes très brefs en octobre et des hivers pluvieux et frais (CLAUS ET LEGOUPIL, 1972).

2.6.1. Régime pluviométrique

Dans notre étude nous sommes basés sur les données de six stations pluviométriques existant au niveau de la plaine ou proche de la plaine. Le nombre d'année d'observation est de 31 ans (1984-2015) pour les précipitations moyennes annuelles, et 15 ans (2000-2015) pour les précipitation moyennes mensuelles, et les données sont récoltées de l'ANRH de Blida et de celui de Khemis-Miliana.

Tableau n°2 .1 : Caractéristiques des stations pluviométriques(ANRH-Blida)

Nom des stations	Code	Coordonnées en UTM		Z(m)
		X(m)	Y(m)	
Ababssa	011715	414166,16	4002034,5	317
Arib Chélif	011701	412561,16	4016440,25	230
Khemis Miliana	011717	431848,16	4012029,25	285
Barrage Harreza	011718	428376,88	4005240,25	315
Barrage Gherib	011407	460267,69	4002141,5	460
Marabout blanc	011601	433048,68	3999335,31	368

2.6.2. Précipitations moyennes mensuelles:

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles observées dans les différentes stations nous a permis de distinguer deux saisons bien distinctes:

- Une saison pluvieuse allant de Novembre jusqu'au Janvier
- Une saison sèche allant de Juin jusqu'au Août.

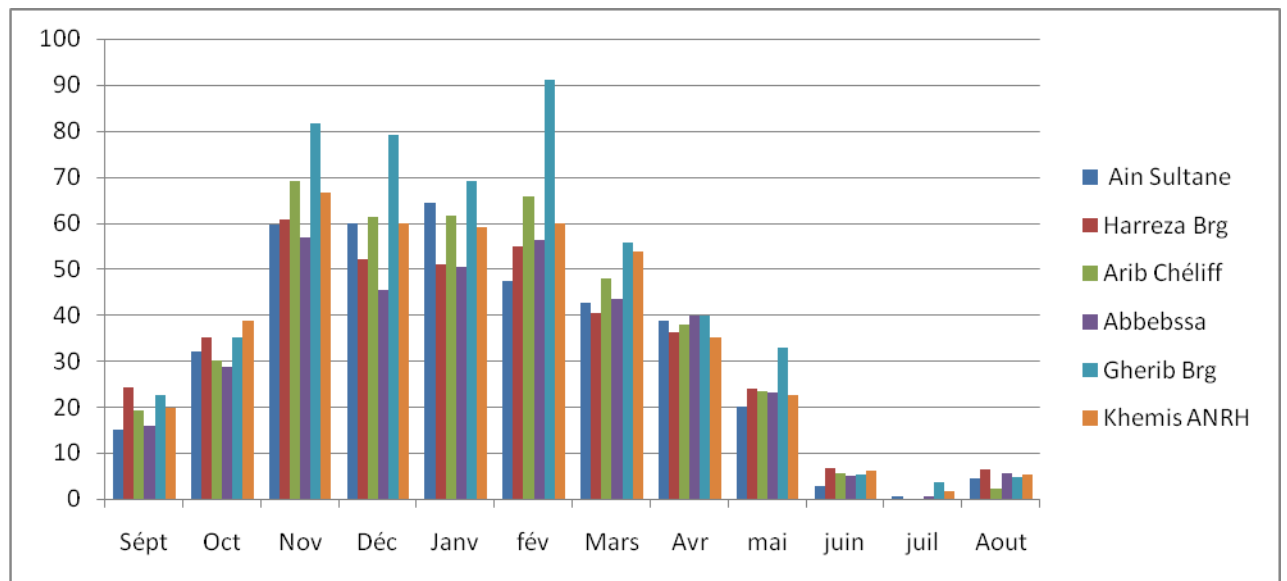


Figure 2.6 : Variation des précipitations moyennes mensuelles (2000-2015)

2.6.3. Précipitation smoyennes annuelles

L'analyse des précipitations annuelles des stations pluviométriques de Marabout Blanc, nous montre, que les années (1992-1993) sont les plus sèches, tandis que celles de (2008-2009) sont les plus humides avec une précipitation annuelle de 311,06 mm pour une période qui s'étale de 1984 à 2015.

Pour celle de la station de Khemis-Miliana, les années (1992-1993) sont considérées comme les plus sèches pour la même station, les années (2008-2009) sont plus humides avec des précipitations annuelles de 411,76 mm. La station des Arib Chélif nous révélait aussi que les années (1992-1993) sont les plus sèches, celles de (1994-1995) et (2010-2011) sont les plus humides avec des précipitations de 535,10 mm et 548,35 mm. Et enfin la station d'El Ababsa, l'année (1992-1993) est considérée la plus sèche, par contre, et pour la même station, les années (1985-1986); (2007-2008) et (2008-2009) ont été identifiées comme humides avec des précipitations annuelles de 460,45 mm; 472,8 et 468,6 mm. La station de Gherib Chélif, l'année (1992-1993) est considérée la plus sèche dont la même station les années 2010 et 2011 ont été identifiées comme humides avec des précipitations annuelles de 751,2 mm et 623,3 mm.

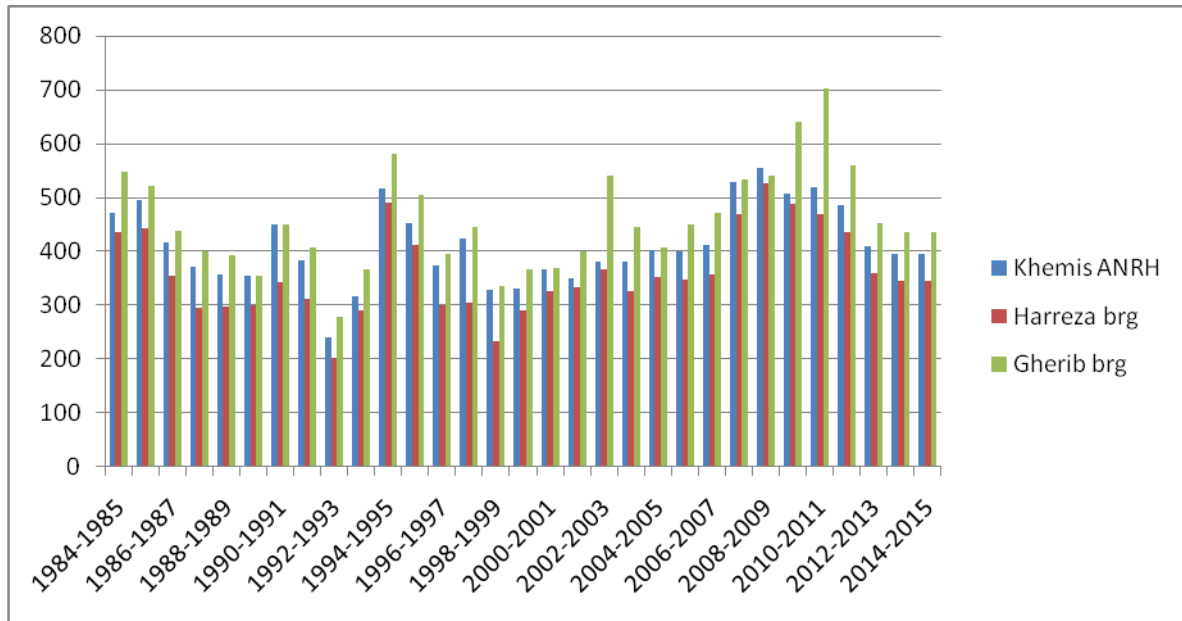


Figure 2.7 : Variation des précipitations annuelles(1984-1985 à 2014-2015).

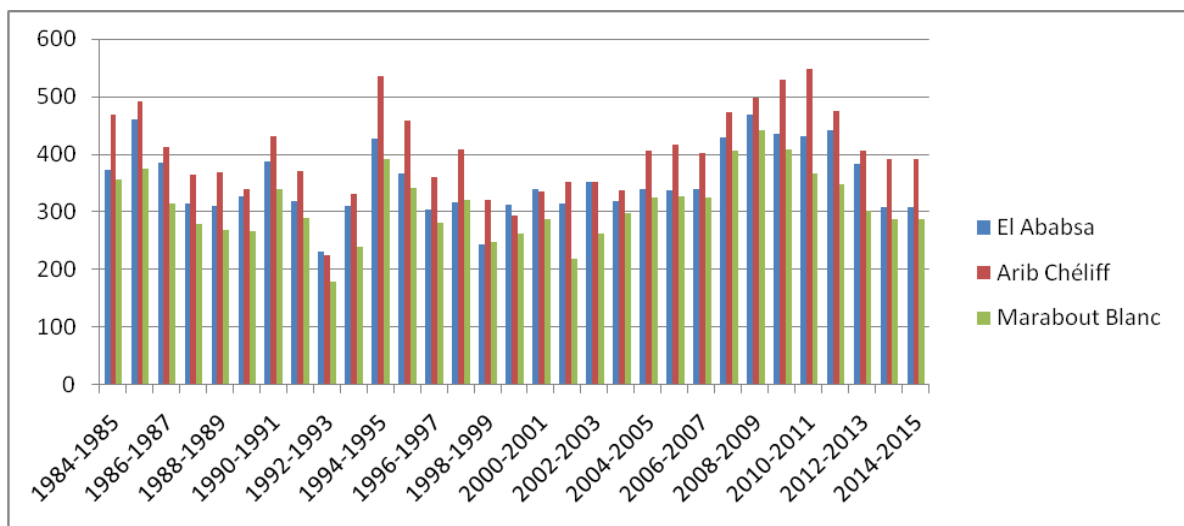


Figure 2.8: Variation des précipitations annuelles(1984 -2015).

Les précipitations moyennes annuelles dans les six stations pluviométriques pour la période 1984/2015 sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 .2: précipitations moyennes annuelles, période 1984-2015 (ANRH-Blida)

Station	Code	X(m)	Y(m)	Z(m)	Pm (mm)
Ababssa	01-17-15	414166,16	4002034,5	317	352,88
AribChellif	01-17-02	412561,16	4016440,25	230	403
KhemisMiliana	01-17-17	431848,16	4012029,25	285	411,76
Barrage de Harraza	01-17-18	428376,88	4005240,25	315	359,76
Ghribchellif	01-14-07	460267,69	4002141,5	460	456,9
marabout blanc	01-16-01	433048,68	3999335,31	368	311,06

La détermination de la lame d'eau moyenne précipitée dans la région d'étude a été effectuée par la méthode des moyennes arithmétique :

$$P_{\text{moy}} = \frac{\sum p_i}{n}$$

p_i : pluie moyenne au niveau de la station i

n : Nombre total des postes pluviométriques

$$P_{\text{moy}} = \frac{\sum (352,88 + 403,00 + 411,76 + 359,76 + 311,06 + 456,90)}{6}$$

$$P_{\text{moy}} = 382,56 \text{ mm}$$

2.6.4. Analyse des températures

Les données existantes sont celles de la station de Harreza, avec des enregistrements durant la période 2003-2014.

✓ *Variation des températures moyennes mensuelles*

La figure 2.9 montre la variation de la température moyenne mensuelle d'une période de 10 ans (2003-2014) montrant ainsi que la valeur la plus élevée est observée en été du mois d'Août avec une moyenne de 28,92°C tandis que la plus basse valeur est observée en mois de Janvier avec une moyenne de 9,60°C.

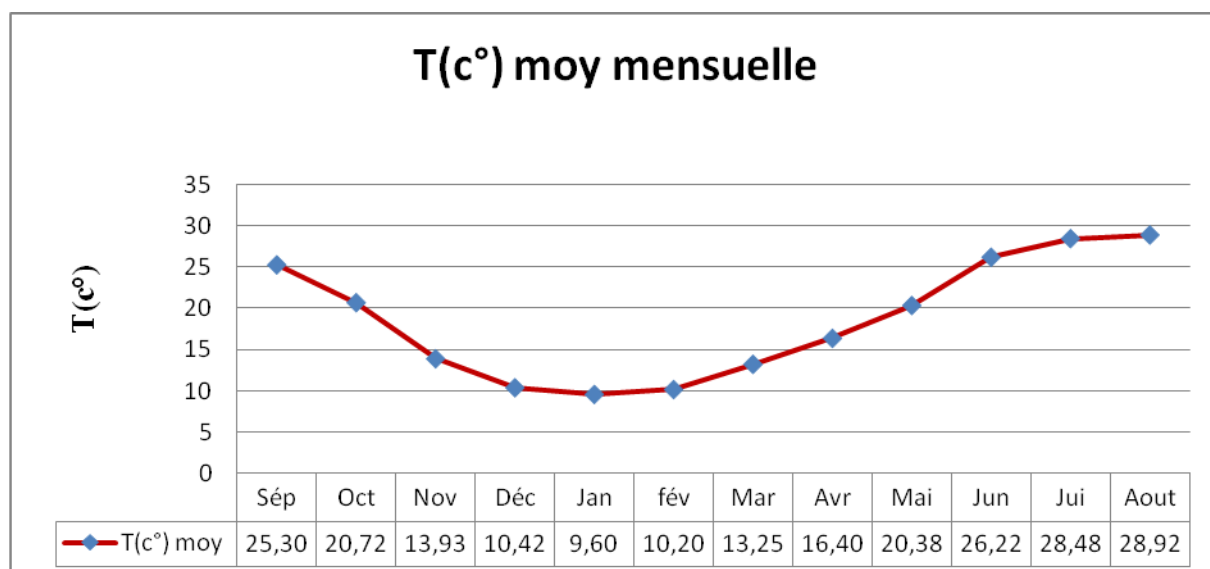


Figure 2.9 : Variation de la température moyenne mensuelle de la station du barrage Harreza pour la période (2003-2014)

2.6.5. Le diagramme de Gaussen

Un mois sec se définit, selon (BAGNOULS ET GAUSSEN, 1957), comme celui ayant un total pluviométrique (en mm) égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T^\circ$).

La période sèche, d'après ce diagramme, s'étale du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre, et la période humide s'étale du mois d'octobre jusqu'au mois d'Avril (Fig.2.10).

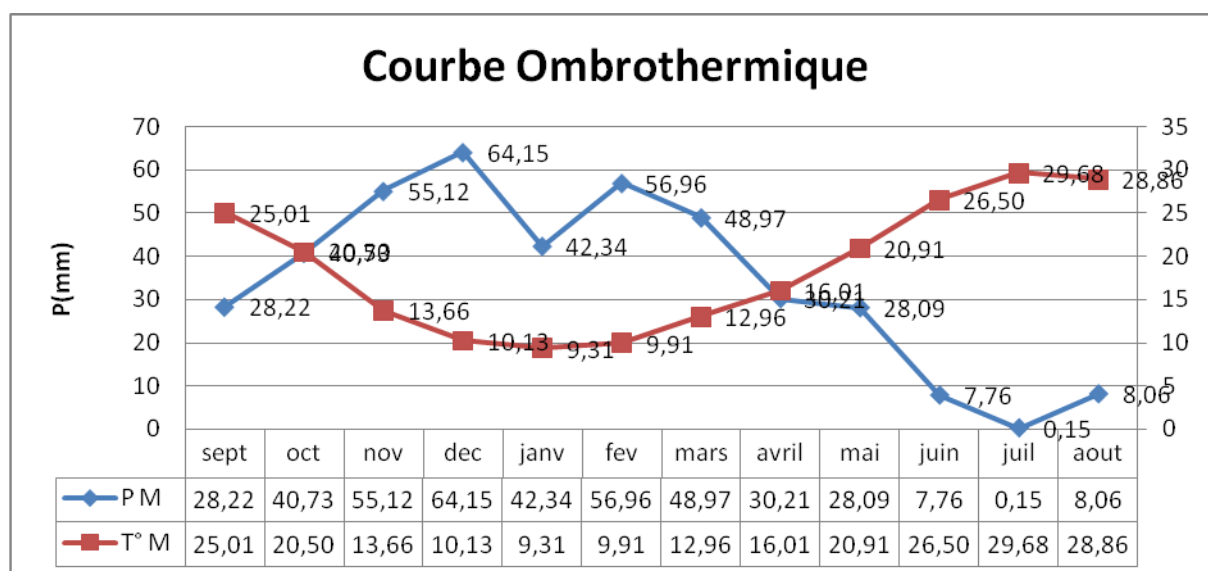


Figure 2.10 : Diagramme ombrothermique de la zone d'étude (2003-2011).

2.7 Evaporation

Plusieurs méthodes de mesure de l'évaporation sont utilisées au niveau de la station d'El Khemis. Nous signalons qu'il s'agit de l'évaporomètre du piche, du Bac Colorado et du bac classe A. A la station expérimentale, on préconise l'utilisation du bac classe A (Tab.2.3).

Tableau 2.3 : Moyenne mensuelle de l'évaporation pour une période d'observation de 10 ans (2003-2014).

Année	Sép	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Evap (mm)	163,8	112,15	59,81	39,24	36,83	48,95	86,11	79,11	119,98	173,63	224,49	263,09

(SOURCE: ANRH D'EL KHEMIS)

2.8 Evapotranspiration



Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Constitue la quantité d'eau qui pourrait être évapotranspirée si le sol est constamment saturé en eau.

✓ Formule de Thornthwaite

Cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride, et vu les caractéristiques intermédiaires du climat méditerranéen, cette formule a été appliquée. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). On admet que la hauteur d'eau stockée dans le sol qui est reprise par l'évapotranspiration est de 100 mm au maximum (Debiech 2002 et Ikhlef,2006).

L'estimation de ce paramètre a été faite à l'aide de la formule de Thornthwaite.

La méthode de Thornthwaite nous permet à partir des données de base (précipitation, température T (°C), le coefficient thermique mensuel (K) et l'indice thermique mensuel (i) de calculer l'évapotranspiration potentielle selon la relation suivante :

$$ETP_{(\text{mois, corrigée})} = 1,6 \cdot (10 \cdot T / I)^a \cdot K$$

Où :

$$I = \sum i \text{ et } i = (T/5)^{1,514}$$

$$a = (1,6 / 100) I + 0,5$$

$R = P^3 / (3 \text{ ETP}^2)$formule empirique de TixerontBarkaloff

avec:

ETP: Évapotranspiration potentielle (mm).

K : Coefficient de correction mensuel qui dépend de la latitude du bassin et de la durée moyenned'ensoleillement du jour.

I: Indice thermique annuel.

i: Indice thermique mensuel.

T: Température moyenne mensuel en °C.

-Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

si pour un mois $P \geq \text{ETP}$ on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste (P-ETR) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès (WS) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.

si $P < \text{ETP}$, On évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit : La valeur de $\text{ETR} = P + \min(\text{RFU}, \text{ETP}-P)$. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $\text{Da} = \text{ETP} - \text{ETR}$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation, c'est à dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Les résultats de l'ETP obtenus par la formule de Thornthwaite sont représentés dans le tableau 2.4 Les températures et les précipitations moyennes mensuelles sont calculées sur une période de 15 ans (2000 à 2015) de la station du barrage Harrezza.

2.9 Bilan hydrologique selon la formule de Thornthwaite

Tableau 2 .4 : Bilan hydrique selon la méthode Thornthwaite de la plaine du Haut Chélif.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc	annuel
P(mm)	50,91	54,97	40,46	36,21	24,19	6,77	0,15	6,49	24,45	35,27	60,74	52,17	392,78
T°C	9,60	10,20	13,25	16,40	20,38	26,22	28,48	28,92	25,30	20,72	13,93	10,42	
I	2,66	2,91	4,31	5,94	8,22	12	13,59	13,91	11,38	8,43	4,65	3	63,54
K	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	0,97	0,85	0,84	
ETP(mm)	15,46	17	34,42	55,32	94,02	155,34	185,66	178,99	122,28	77,86	31,33	17,53	985,21
ETR(mm)	15,46	17	34,42	55,32	94,02	17,84	0,15	6,49	24,45	35,27	31,33	17,53	349,28
RFU(mm)	99,49	100,00	100,00	80,89	11,07	0,00	0	0	0	0	29,41	64,04	
Da(mm)	0	0	0	0	0	148,57	185,51	172,50	97,83	42,59	0	0	647,00
exc(mm)	35,45	37,97	6,04	0	0	0	0	0	0	0	29,41	34,64	143,51

-Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

si pour un mois $P \geq ETP$ on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste (P-ETR) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès (WS) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.

Si $P < ETP$, On évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit : La valeur de $ETR = P + \min(RFU, ETP - P)$. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $Da = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation, c'est à dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Les résultats de l'ETP obtenus par la formule de Thornthwaite sont représentés dans le tableau.

Les températures et les précipitations moyennes mensuelles sont calculées sur une période de 15 ans (2000 à 2015) de la station du barrage Harrezza.

Ainsi, l'évapotranspiration réelle annuelle est donc de 349,28 mm pour une pluie moyenne annuelle de 392,78 mm, elle correspond donc à 88,92 % des précipitations, le reste constitue l'excédent (143,51 mm) qui représente la quantité d'eau qui s'infiltré et/ou s'écoule dans les oueds selon la formule suivante:

$$WS = R + I$$

Où: WS: Excédent (mm).

R: Ruissellement (mm).

I: Infiltration moyenne annuelle (mm).

Pour déterminer l'infiltration on calcul d'abord le ruissellement

➤ **Détermination du ruissellement (R)**

Se produit lorsque la lame d'eau précipitée est supérieure à l'infiltration et que le sol récepteur des eaux météoriques aura atteint la saturation. Il est estimé à partir de la formule Tixeront-Berkaloff suivante :

$$R = P^3 / (3 ETP^2) \dots \dots \dots \text{formule empirique de Tixeront Barkaloff}$$

Avec :

R : Ruissellement (mm)

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

I : Infiltration (mm)

A partir du bilan hydrologique, on trouve que la lame d'eau ruisselée est de : $R = 20,81$ mm.

Elle correspond donc à 5,30 % des précipitations.

➤ **Infiltration**

Après avoir calculé l'évapotranspiration et le ruissellement, on peut déduire l'infiltration selon la formule du bilan hydrologique :

$$P = ETR + R + I \pm \Delta S$$

L'application de cette formule nous a permis d'obtenir une infiltration estimée à 22,70 mm.

Elle correspond donc à 5,78 % des précipitations.

D'après ces résultats, on constate que la région d'étude présente deux périodes à savoir :

1. la période sèche:

Cette période débute du mois d'Avril et s'étale jusqu'au mois d'octobre dans laquelle se présente un déficit agricole, avec un maximum observé en juillet, d'où l'ETP est supérieure par rapport aux valeurs des précipitations (Tab.2.4), ce déficit manifeste essentiellement en été.

2. la période humide:

Cette période débute en de novembre jusqu'au mois de mars, dont laquelle on note un excédent pluviométrique. Dans cette période commence l'épisode du lessivage des terrains, ce phénomène pose aussi un grand risque de pollution pour l'environnement surtout sur les terrains agricoles recevant de la surfertilisation et garde toujours des reliquats d'engrais pouvons après des épisodes de ruissellement migrés vers les profondeurs, et contaminer les eaux de la nappe alluviale du Haut-Chélif.

2.10 Cadre géologique

du haut Chéouiff est une dépression à remplissage alluvionnaire formée de deux compartiments La plaine séparés par un seuil dont l'axe passe à côté d'Oued Souffay dans la partie sud-est. Ce seuil dû à une remontée du substratum crétaé traduit l'avancement des terrains crétaés vers le centre de la plaine. A l'ouest de l'Oued Deurdeur, le comportement Est appartient au bassin miocène de Médéa dans lequel les formations grésu-conglomératiques du Miocène sont bien développées.

2.11 Lithologie du Haut Chélif

La coupe lithologique transversale (Fig.2.14) effectuée dans la plaine fait apparaître la dépression subsidente et l'allure en synclinal des différentes formations constituant le sous-sol. On peut observer de bas en haut:

- le Crétacé inférieur, imperméable et s'étalant sur toute la largeur de la plaine. Il a servi comme un fond étanche lors de la réalisation du barrage de Ghrib,
- les dépôts alluvionnaires de l'oued Chélif, en premier lieu; étant en contact avec la formation argileuse du Miocène, ils forment une couche d'alluvions argileuses d'une épaisseur de 32m,
- les dépôts alluvionnaires grossiers de l'oued Chélif proprement dit; avec des épaisseurs pouvant dépasser les 70m, ils forment l'aquifère le plus important de la région,
- à la bordure de l'oued, le contact argileux du Miocène et les dépôts alluvionnaires forment des lentilles d'alluvions argileuses,
- finalement, un couverture limoneux surmonte le tout; observé essentiellement au centre de la plaine, il rend l'aquifère captif dans quelques endroits.

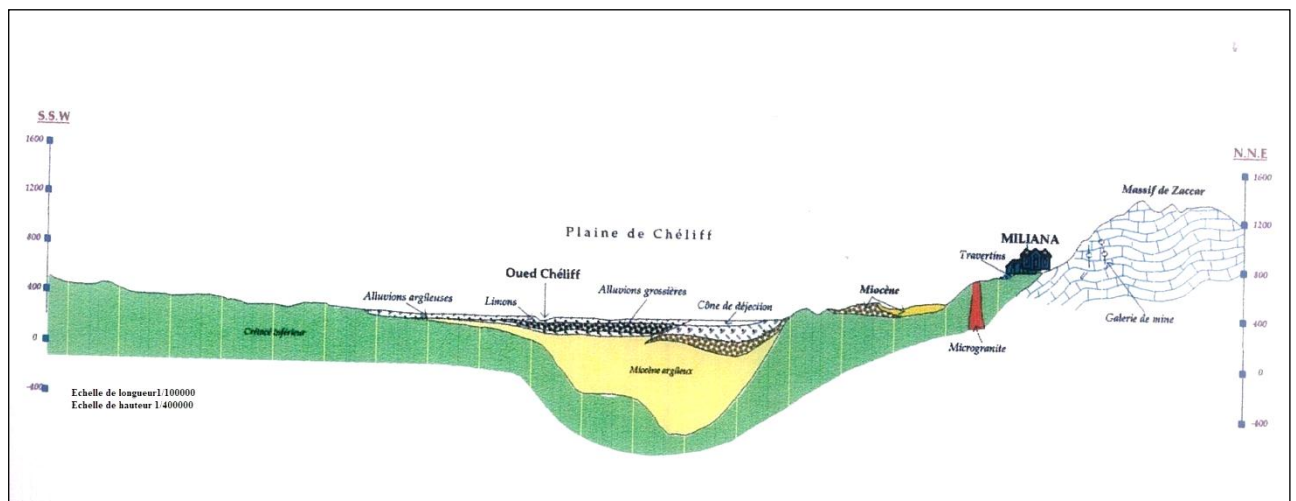


Figure 2.12 : Coupe géologique de la plaine de haut Chélif

(Carte géologique du Nord d'Algerie , Pradins ,2002)

De point de vue lithostratigraphique, les terrains affleurant au niveau de la région étudiée sont constitués de la base au sommet par la succession des étages suivants :

❖ Crétacé:

Le Crétacé affleure sur les pourtours de la dépression du Cheliff où il est formé la base au sommet par:

- **Le Néocomien:** qui affleure au niveau des flancs Nord et Ouest du Zaccar, où il est formé par une puissante série d'argile de schistes et grés schisteux d'une épaisseur de 800 à 1000 mètres. Dans la région de Bou Maad , cette série est surmontée par les calcaire zoogénies d'une épaisseur de 10 à 30 mètres.
- **L'Albo- Aptien :** est formé par des terrains à faciès flysch affleurant au Nord de la zone d'étude. Il est constitué par une série de 1000 mètres d'épaisseur, représentée par des schistes plissés alternant avec des bancs de quartzites.
- **Le Cénomaniens- Vraconien:** d'une épaisseur de 20 à 60 mètres constitué par une série de calcaires noirs alternant avec des marno-calcaires. Au Sud de la région étudiée , le Cénomaniens -Vraconien montre à la base des calcaires et des schistes phosphatés.
- **Le Sénonien:** qui a été décrit au Nord Est du col des Righas où il est représenté par des marnes à rognons e calcaires et es intercalations de bancs de calcaires et marnes.
- **L'Oligo-Eocène :** il est formé par une série nummulitique affleurant au Nord de la vallée du Chélif, constituée essentiellement par 100 mètres des schistes bariolés à nodules siliceux, de grés et de quartzites (BATRAN.S, MAZAINI.B, 2008).

❖ Miocène :

Il est constitué de la base au sommet par :

- **Le Burdigalien :** qui est constitué par des calcaires à polypiers dont les affleurements est bien visibles à l'Est de Levacher où l'épaisseur atteint les 1000 mètres environ. Le toit du Burdigalien est constitué par des marnes dites cartésiennes d'une épaisseur de 100 à 300 mètres.
- **Le Vindobonien :** comprend de bas en haut :
 - ✓ Une série de calcaires à lithothamnium rognon eux affleurant à l'Est de la région d'étude ;

- ✓ Des grès et poudingues constitués de sables friables bien développés à l'Est e la plaine ;
- ✓ Des argiles dites helvétiques, d'une épaisseur de 200 mètres affleurent dans la partie nord-ouest du secteur et passant dans la partie supérieur aux grés de Gontas par l'intermédiaire d'assises gréseuses.
- ✓ Des grés et poudingues du Gontas composés de grés sableux et de bancs de poudingues, discordant sur le Crétacé et peut être sur le Burdigalien. Au Nord d'Ain Soltan ,cette série montre une épaisseur de 100 mètres (BATRAN.S, MAZAINI.B, 2008).

❖ Mio-Pliocène :

Il est formé par :

- ✓ Des grès, des poudingues, des argiles détritiques discordant sur le Vindobonien. Entre El-Khemis et Littré, cette série s'enfouit sous les alluvions anciennes de la plaine de Chélif où elle a été traversée sur plus de 100 mètres d'épaisseur par des sondages ;
- ✓ Des travertins déposés par un écoulement ancien des sources du Zaccar et montrant des épaisseurs dans les environs de la localité de Miliana (BATRAN.S, MAZIANI.B, 2008).
- ✓ Quaternaire : généralement représenté par :

❖ Quaternaire ancien :

Il est formé par :

- ✓ Une carapace calcaire, compacte recouvrant indifféremment tous les terrains, et bien développée au niveau de la bordure Sud de la plaine de Chélif.
- ✓ Des alluvions anciennes correspondant aux niveaux supérieurs de la terrasse qui domine de plus de 20 m la vallée de l'oued Ebda, et aux niveaux inférieurs mieux cimentés 'une épaisseur de 50 mètres dominants les cônes de déjection(BATRAN.S, MAZIANI.B, 2008).

❖ Quaternaire récent :

Il est essentiellement constitué par :

- ✓ Des alluvions récentes constituées par de cailloutis avec des bancs d'argiles et de limons, couverts par un sol organique.
- ✓ Les éléments des cônes de déjection des vallées atlastiques mélangés aux limons provenant par l'intermédiaire des apports du Chélif.

- ✓ Des alluvions et limons, en partie Eoliens, occupant les hautes vallées dans la dépression située au sommet di Zaccar Gharbi.
- ✓ Les éboulis de pente, en grande partie constitués de calcaires ou schistoquartziteux de la série de Zaccar contenant des fragments de taille variable plus ou moins consolidés. Ils formaient d'épaisses carapaces masquant le substratum (BATRAN.S. MAZAINI.B, 2008).

2.12 Contexte Hydrogéologique

2.12.1 Géométrie des aquifères (Apport de la géophysique)

L'étude géophysique réalisée par la compagnie générale de géophysique (CGG) en 1969 par la méthode de prospection électrique avait pour but principal la détermination de la géométrie et la nature des aquifères. L'échelle de résistivité retenue pour les différentes formations géologiques explorées est la suivante (tableau) :

Tabl 2.5 : Valeurs des résistivités pour les différentes formations géologiques (ohm.m)

Etage	Nature géologique	Résistivité (ohm.m)
Quaternaire	Alluvions	50 à 100
	Alluvions peu perméables	5 à 30
Pliocène	Calcaires gréseux	60 à 80
	Marnes	3 à 20
Miocène	Argiles quartzitiques	10 à 20
	Marnes	40 à 50

D'après l'échelle présentée sur la (Fig.) l'aquifère qui fait objet de notre étude correspond aux formations perméables du Mio-Plio-Quaternaire et son substratum représenté par des argiles et marnes du Miocène. Les caractéristiques hydrogéologiques de chacune d'elles y sont représentées.

2.13 Identification des principaux aquifères

D'après l'étude de la série stratigraphique et de ses caractéristiques lithologiques et structurales, on distingue une nappe phréatique représentée par les alluvions du Quaternaire, l'aquifère du Miocène et l'aquifère des calcaires de Zaccar ; mais les aquifères qui intéressent

la plaine étudiée sont représentés par les alluvions quaternaires et les grès mio-pliocènes. Cet ensemble renferme une nappe très exploitée dans la plaine.

Son substratum imperméable est représenté par les marnes et argiles du Miocène.

2.13.1 L'aquifère alluvionnaire du Quaternaire

Les formations alluvionnaires du Quaternaire constitue l'aquifère le plus exploité dans toute la plaine du haut Chélif. Les descriptions lithologiques des forages montrent que plus de 20 % des matériaux traversés sont des sables et des graviers ou des grés et une gamme de profondeur de forage qui va de 2 à 150 m.

2.13.2 L'aquifère du Miocène

Il se présente sous forme de conglomérats plus ou moins argileux et sableux.

Les calcaires du Miocène affleurent le long de la limite sud de la vallée, avec la présence d'espaces vides et des fissures internes ouvertes, dus à la dissolution des carbonates sous l'influence de l'infiltration de l'eau de pluie, particulièrement le long des surfaces de contact.

2.13.3 Les calcaires du Jurassique

Il s'agit d'un aquifère fracturé et karstifié. Cette formation repose sur un substratum formé de schistes, de quartzites et argiles du Paléozoïque et il est entouré à l'affleurement par des couches imperméables. Le contact entre les parties perméables et imperméables sur le flanc sud du massif du Zaccar est jalonné par des sources souvent captées. Sur les piémonts du massif du Zaccar, les cônes de déjection peuvent avoir un intérêt aquifère non certain.

2.14 Hydrodynamique de l'aquifère

2.14.1 Inventaire des points d'eau

L'inventaire réalisé par l'ANRH en collaboration avec la DRE de Ain Défla recense un réseau assez dense réparti sur toute la plaine du Haut Chélif. Il comporte 40 puits domestiques, 49 forages pour l'alimentation en eau potable et 4 piézométriques.

2.14.2 Piézométrie

Le suivi de l'évolution piézométrique de la nappe dans le temps et dans l'espace permet de reconnaître d'une part, la direction générale de l'écoulement et les zones d'alimentation et de depressions, et permet d'avoir aussi une idée sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère et par conséquent nous informe sur le degré des échanges géochimiques entre l'eau et la roche. Comme les eaux souterraines représentent un moyen de transport des substances

minérales et organiques, la détermination de leur itinéraire renseigne sur leur minéralisation et l'origine de leur pollution. La cartographie piézométrique a été illustrée à base des relevés piézométriques des différentes campagnes, par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 7.0.

2.14.3 Interprétation de la carte piézométrique juin 2013

L'analyse de la carte piézométrique des hautes eaux (Juin 2013) montre que la circulation des eaux souterraines dans la nappe alluviale de Khémis-Miliana se fait d'Est vers l'Ouest. Les courbes hydro-isohypses se resserrent à l'amont avec un gradient hydraulique important de l'ordre de 0,09 et dans la partie sud-est avec un gradient hydraulique de l'ordre de 0,01. Dans la partie centrale les courbes sont plus espacées avec un gradient hydraulique de 0,008. En aval, les courbes convergent vers un même axe de drainage. (Fig 2.13)

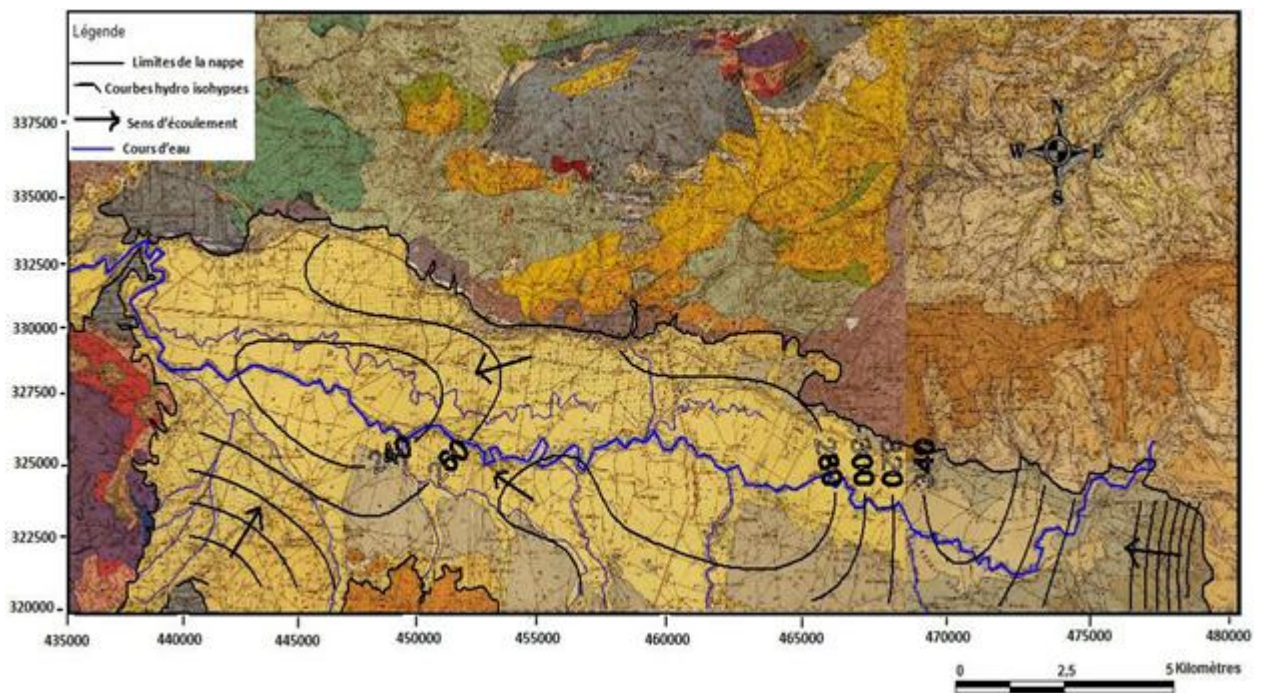


Figure 2.13 : Carte piézométrique de la nappe alluviale du Haut-Chélif

(Période des hautes eaux : juin 2013)

2.14.4. Carte piézométrique novembre 2013

Les observations sont les mêmes que celles faites sur la carte précédente, elles possèdent la même morphologie avec, néanmoins, une diminution des fluctuations dans l'ensemble de la

nappe traduisant la faible recharge durant cette période. (Fig 2.14).

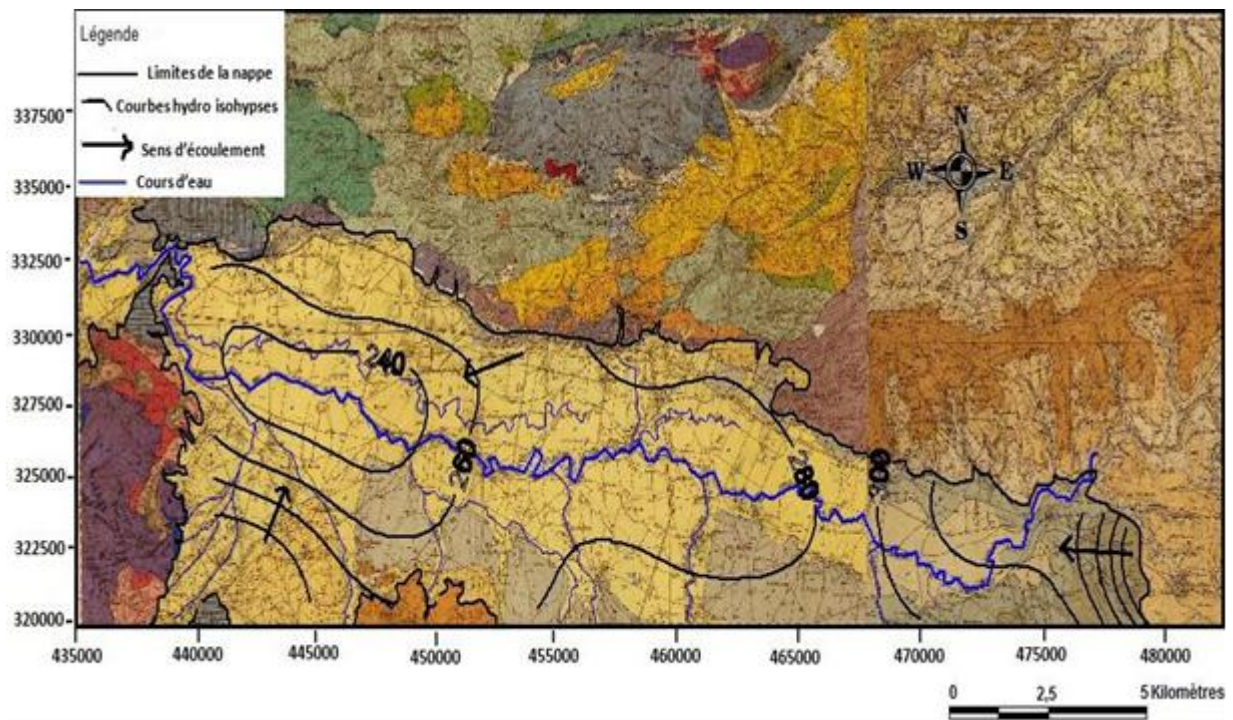


Figure 2.14 : Carte piézométrique de la nappe alluviale du Haut-Chélif (Richa. 2016)
(Période des basses eaux : novembre 2013)

2.14.5. Alimentation de la nappe

Des affleurements gréseux perméables du Mio-pliocène bordent la nappe au nord et au nord-est. Ils constituent un aquifère important qui plonge sous la terrasse alluviale quaternaire. La nappe est bordée au sud par des grès et poudingues. Le ruissellement dans la partie nord est favorisé par la forte pente du massif schisto-calcaire du Zaccar très raviné, qui provoque le débordement de nombreux oueds situés à la rive droite de l'oued principal.

L'alimentation de la nappe mio-plio-quaternaire est assurée par des eaux d'infiltration résultant des apports des eaux météoritiques tombant sur la plaine, des eaux d'irrigation excédentaires et des eaux de ruissellement de l'oued Chélif et de ses affluents.

Conclusion

L'étude géomorphologique et hydrologique a montré que le bassin versant du haut Chélif présente une forme allongée, ce qui donne un temps assez important pour le cheminement de l'eau jusqu'à l'exutoire et ceci, par conséquent, favorise l'infiltration.

Dans la série stratigraphique de la plaine alluviale du Haut Cheliff, ce sont les formations d'âge mio-plio-quadernaires qui forment le remplissage le plus important et constituent l'aquifère le plus sollicité.

La variation lithologique et le jeu des fractures font de ces formations un aquifère multicouches avec des intercalations argileuses plus ou moins épaisses. Le substratum est formé par les marnes bleues du Mioène supérieur et du Pliocène qui affleurent sur les bordures Nord et Sud de la plaine. Cette configuration est bien illustrée par les résultats de la prospection géophysique qui montre qu'au long du chenal résistant l'épaisseur des alluvions grossières est de 100 jusqu'à 140m au Nord, au Sud elle n'est que de 20 m.

La nappe alluviale est séparée de la nappe des grés par une couche relativement épaisse d'alluvions argileuses. Cette couche est continue sauf à l'Ouest où le contact entre les deux formations existe.

Au Nord de la plaine les grés du Mio-Pliocène atteignent les 200 m d'épaisseur, à la rive gauche, ils sont totalement absents et les alluvions quadernaires sont discordants sur le Mioène marneux. Ce dernier s'amincit dans la région de l'Oued Massine provoquant la remontée du substratum.

L'insuffisance des essais de pompages dans la plaine du Haut Cheliff n'a pas permis d'aboutir à un résultat plus réaliste des paramètres hydrodynamiques (transmissivité, perméabilité, coefficient emmagasinement, etc...) couvrant l'ensemble de cette zone.

Suite aux campagnes piézométriques effectuées en hautes et basses eaux de l'année 2013, nous avons constaté que les cartes piézométriques présentent la même morphologie et la même allure des courbes piézométriques. Les écoulements de la nappe se font des bordures vers l'axe central de la vallée avant de prendre une direction Est-Ouest parallèlement au cours d'eau principal de l'oued Cheliff. Mais avec une certaine augmentation du niveau piézométrique due à la recharge de la nappe suite à une forte pluviométrie annuelle durant l'année 2013.

Néanmoins, on remarque une certaine perturbation locale au niveau de la zone centrale et Sud de la plaine en 2008, due à la surexploitation de la nappe pour assurer l'irrigation.

La surface piézométrique n'est pas assez profonde ce qui augmente l'effet de l'évaporation

dans la zone septentrionale, où le gradient hydraulique diminue, donnant ainsi suffisamment de temps à l'interaction entre les eaux souterraines et la lithologie.

Chapitre 3 : Matériels et Méthodes

Introduction

La sensibilité d'une nappe à la pollution est une notion non mesurable dépendant des paramètres propres de la nappe, car elle est définie par rapport à une pollution qui a déjà atteint la nappe, à partir de la zone non saturée ou d'un ouvrage d'eau souterraine (puits, forage, etc.).

L'objectif d'une carte de vulnérabilité d'un système en eau souterraine à la contamination est de fournir le potentiel et le degré de risque de contamination, tant pour la prévention que pour les mesures mises en place à la suite d'une contamination. La cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère permet une meilleure gestion d'une nappe, avec des interventions rapides et appropriées en cas de pollution.

3.1 Aspect théorique de la méthode SI

La méthode SI (Susceptibility Index ou méthode d'Indice de Susceptibilité), qui estime la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides), a été développée au Portugal par RIBEIRO (2000).

Cette méthode prend en considération cinq paramètres. Les quatre premiers paramètres sont identiques à quatre paramètres déjà utilisés dans la méthode DRASTIC (D : la profondeur de la nappe, R : la recharge efficace de l'aquifère, A : la lithologie de l'aquifère, et T : la pente topographique du terrain). Les cotes correspondantes aux différentes classes de ces paramètres, dans la méthode DRASTIC, ont été également conservées. Un cinquième nouveau paramètre a été introduit, c'est le paramètre d'occupation des sols (OS). La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover (EUROPEAN COMMUNITY, 1993) (Tab 3.1). Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Ces valeurs varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité (Tab 3.2). La méthode SI présente quatre degrés de vulnérabilité selon les valeurs des indices obtenues (Tab 3.3).

Tableau 3.1 : Principales classes d'occupation des sols et valeurs correspondantes.

Occupation du sol selon la classification de CORINE Land Cover	Valeur du facteur d'occupation des sols LU (Land use factor)
Décharge industrielle, décharge d'ordures, mines	100
Périmètres irrigués, rizières	90
Carrière, chantier naval	80
Zones artificielles couvertes, zones vertes	75
Cultures permanentes (vignes, vergers, oliviers, etc.)	70
Zones urbaines discontinues	70
Pâturages et zones agro-forestières	50
Milieux aquatiques (marais, salines, etc.)	50
Forêts et zones semi-naturelles	0

Tableau 3.2 : Poids attribués aux paramètres SI.

PARAMETR	D	R	A	T	OS
POIDS	0,186	0,212	0,259	0,121	0,222

Tableau 3.3 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SI.

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 45
Moyen	45-64
Elevé	65-84
Très Elevé	85-100

3.2 Hypothèses de la méthode

Elle tient compte de quatre hypothèses principales :

1. Elle s'applique à des unités cartographiques de superficie supérieure à 40 ha.
2. La source de polluant est localisée à la surface du sol.
3. Les polluants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère par l'infiltration efficace.
4. Dans le cas où la source de pollution est située en profondeur dans le sol, la méthode reste valable à condition de modifier les paramètres affectés par la position de la source de pollution.

La méthode SI permet de déterminer le degré de vulnérabilité et le potentiel polluant des eaux souterraines. C'est une méthode paramétrique qui utilise la somme des produits des cinq paramètres.

D : profondeur d'eau (**D**ePTH of water)

R : la recharge efficace (net **R**echarge)

A : les matériaux de l'aquifère (**A**quifère media)

T : la topographie ou la pente (**T**opography)

OS : l'occupation des sols (**LU** : Land Uses)

3.3 Description des paramètres SI

a) Epaisseur de la zone non saturée (**D**ePTH) (**D**) :

L'épaisseur de la zone non saturée permet de prendre en compte l'impact de la zone vadose ou zone non saturée (ZNS) du sol qui correspond à la partie du sous-sol située entre la surface du sol et le toit de la nappe alluviale. C'est essentiellement dans cette zone où les pores du sol sont partiellement remplis d'eau et d'air que les phénomènes d'autoépuration ont lieu. Ce paramètre permet de représenter de façon indirecte le temps de propagation verticale d'un polluant dans la zone non saturée vers l'aquifère. Lors de la sélection des données à utiliser dans la méthode SI, nous avons pris des valeurs moyennes annuelles de la profondeur des eaux souterraines de 19 points d'eau, réparti d'une façon homogène dans la plaine pour la période de 2014 jusqu'au 2016, il nous a été nécessaire de tenir compte de la profondeur minimale des eaux souterraine qui a été prise pendant la campagne piézométrique antérieure, afin d'être dans les conditions les plus précises possibles lors de l'évaluation de la vulnérabilité sous principe : tant que la profondeur est grande dans l'aquifère, mieux l'aquifère est bien protégé et vice versa. Nous avons procédé à une méthode d'interpolation des valeurs de

profondeurs de 19 points d'eau par la méthode d'interpolation spatiale IDW, sous la plateforme Spatial Analyst, la carte issue des profondeurs d'eau souterraine a été générée sous forme rasterisée avec un pixel de 30 m de résolution spatiale (Voir Figure 4.1a)

b) Recharge efficace (Net Recharge) (R) :

Un lien particulier unit entre la quantification de la recharge de l'aquifère et l'estimation de sa vulnérabilité. En effet, la masse de polluant pouvant potentiellement atteindre l'aquifère est étroitement liée au débit de la vitesse de l'eau transitant dans la zone non saturée depuis la surface. A l'échelle d'un bassin versant, où les débits d'eau souterraine sortant sont en fonction de la recharge sur la surface du bassin, le transport et la masse restituée (temps de transit, dilution, etc.) d'un contaminant (diffus ou ponctuel) dépend également de la valeur de cette recharge. Il est donc raisonnable de lier proportionnellement la recharge et la vulnérabilité des eaux souterraines. L'évaluation de la recharge efficace des nappes est souvent très difficile à réaliser sans études hydrogéologiques et hydrologiques préalables. Pour la nappe étudiée, ce paramètre a été essentiellement déduit à partir des résultats des équations de bilans.

Il a déduit que la recharge nette de la nappe dépend de :

- L'infiltration directe à partir des eaux de pluie (Bilan Thornthwaite)
- L'alimentation continue et normale des oueds, en périodes de crues ou décrues (relation oueds nappes).

c) Les matériaux de l'aquifère (Aquifer Media) (A) :

Une nappe aquifère est une formation géologique, ou groupe de formations, contenant de l'eau libre. La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent de la texture et de la lithologie des couches de l'aquifère. Cela est toujours contrôlé par la granulométrie, la porosité, la perméabilité et la lithologie des formations géologiques. Ce paramètre est obtenu par corrélation lithostratigraphique. Pour déterminer la répartition spatiale de ce paramètre, nous étions obligé de passer par des consultations des logs lithostratigraphiques existants dans la région et de 18 logs de forages, en étudiant leurs variations lithologiques sous Excel, qui basée surtout sur la perméabilité équivalente suivant l'équation de Castany :

$$K_{mh} = K_{eq} = (h_1 k_1 + h_2 k_2 + \dots h_n k_n) / H$$

Avec :

K_{mh} = la moyenne de la perméabilité horizontale (m/s)

H = la profondeur totale de l'aquifère (m)

h_i et k_i sont la profondeur (m) et la perméabilité (m/s) de la couche i (m), respectivement (Castany 1967, 1982).

Les valeurs de la perméabilité ont été déterminées dans 18 points plus ou moins bien réparti dans notre zone d'étude, la cartographie de la répartition spatiale de la conductivité a été réalisée en se basant sur l'interpolation de ces valeurs par IDW, les passages lithologiques dans la région ont été extraits sous forme polygonale (Voir Figure).

d) La Topographie ou la Pente(Topography) (T) :

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 (HEMIDI, 2013). 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. Pour la détermination des degrés de pente de la plaine, nous avons passé par le traitement du Modèle Numérique du Terrain « DEM » extrait et clippé à partir du DEM NordAlgérie dont il est caractérisé par une résolution de 30 m, puis nous avons procédé à un reclassement en pourcentage de chaque grille de ce DEM dans la plateforme Spatial Analyst. (Voir Figure)

e) L'occupation des sols (Lund Uses) (OS) :

La classification utilisée pour ce paramètre est la classification CORINE Land Cover (EUROPEAN COMMUNITY, 1993) (Tableau 6). Une valeur appelée facteur d'occupation des sols et notée LU, variant de 0 à 100, est attribuée à chaque classe d'occupation des sols. Il est à signaler que les valeurs des cotes attribuées aux classes des différents paramètres ont été multipliées par 10 pour faciliter la lecture des résultats obtenus. Ces valeurs varient par conséquent de 0 à 100, allant du moins vulnérable au plus vulnérable. Les poids attribués aux paramètres SI varient de 0 à 1 selon l'importance du paramètre dans la vulnérabilité (Voir Figure 4.5a).

Occupation des sols dans la zone étudiée	LU adoptées
-Milieu aquatique	50
-Zones urbaines discontinues	70
-Zones culturelles	90

Les données utilisées pour le calcul et la cartographie de paramètre de la méthode SI sont illustrées dans le tableau.

Tableau 3.4 : Données utilisées pour le calcul de la vulnérabilité

Paramètres	Principales sources d'information
D -Profondeur de l'eau	- Coupes de forages - Compagne piézométrique
R -Recharge efficace	- Bilan hydrologique de Thorontwait
A -Matériaux de l'aquifère	- Cartes géologiques (84 feuilles au 1/50000ème) - notices explicatives - Coupes lithologiques des forages
T -Topographie	-DEM
OS - Occupation des sols	- Cartes d'occupation des sols (ONID, 2012)

3.4 Détermination de l'indice SI

Comme dans la méthode DRASTIC, l'équation fait intervenir les poids (dont le cumul atteint 1) attribués aux différents paramètres :

$$SI = 0,186D + 0,212R + 0,259A + 0,121T + 0,222OS$$

Différents chercheurs dans le monde ont trouvé une bonne corrélation entre la susceptibilité estimée et la réalité du terrain (BATISTA, 2004 ; FRANCÈS *et al.*, 2002 ; OLIVEIRA et LOBO-FERREIRA, 2005 ; STIGTER *et al.*, 2006), notamment en Afrique (HAMZA *et al.*, 2007, 2008 ; AKÉ *et al.*, 2010). La méthode SI est ici appliquée pour la première fois en Algérie. Du fait de l'introduction du paramètre OS, et donc de la prise en compte des apports

de produits polluants en surface, la méthode SI dépasse la notion de vulnérabilité pour se rapprocher de celle de risque. On notera toutefois que, l'une comme l'autre, ne prennent en compte que les mouvements verticaux, sans se préoccuper de la migration latérale des éléments. En ce sens, elles ont pour objet les sources de contamination des eaux, plus que l'état de pollution lui-même.

3. 5 Cartographie de la vulnérabilité à la pollution

Les données recueillies dans la plaine alluviale ont été traitées à l'aide de plusieurs plateformes géoinformatiques (ArcGIS 10.4.1., MapInfo, Surfer...etc).

Ces données ont été enregistrées dans la base de données à partir de laquelle, les couches d'information des paramètres telles que (l'unité hydrogéologique, carte pédologique, objets géomorphologiques, limites, répartition spatiale des précipitations ...etc) ont été générées dans le mode vectoriel, tandis que les entités telles que le Modèle Numérique de Terrain, profondeur des eaux souterraines...etc). Ont été elles-mêmes traitées séparément dans le mode Raster et complétés par des superpositions spatiales avec leurs attributs nécessaires.

Toutes les couches d'information des paramètres de la méthode SI ont été converties vers le mode Raster avec une résolution spatiale de pixel de 30m pour chaque paramètre distinct. Le résultat final sera obtenu par la cartographie algèbre en utilisant la calculatrice Raster incluse dans le module Spatial Analyst1 en se basant sur des requêtes mathématiques (Addition des Rasters pour chaque paramètre).

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines a été réalisée par la technique de superposition des couches représentant les différents paramètres dans la méthode SI. Théoriquement une superposition est nécessaire pour chaque paramètre, cependant certains de ces paramètres sont souvent associés.

Grâce à une fonction spécifique dans les logiciels Arc Gis dite fonction de superposition (Map Algebra), les différentes cartes pour chaque modèle paramétrique sont générées par la fonction Raster Calculator de l'extension Spatial Analyst. Après avoir cartographié tous les paramètres sous forme thématique, la carte de vulnérabilité a été obtenue en superposant les différentes cartes paramétriques et le calcul des indices de vulnérabilité selon la méthode SI, l'indice de la vulnérabilité a été calculé comme la somme pondérée des paramètres.

L'indice de vulnérabilité selon la méthode SI été calculé et la carte finale de la Vulnérabilité a été subdivisé en classes liées à des degrés selon la classification de RIBEIRO (2000)

Conclusion

La méthode SI permet de déterminer le degré de vulnérabilité et le potentiel polluant des eaux souterraines. C'est une méthode paramétrique qui utilise la somme des produits des cinq paramètres : profondeur de la nappe, recharge nette, lithologie de la zone saturée, topographie (pente), et la carte d'occupation des sols. Dans l'Arc Gis 10.4.1, chaque paramètre est noté sur une couche en lui affectant une valeur numérique correspondant à son poids, c'est à dire son influence sur la vulnérabilité de la nappe. Ensuite, ces couches sont superposé sur une couche résultat où sera calculé l'indice SI, qui est égal à la somme des produits (score * poids) des cinq paramètres SI. La cartographie de l'indice de vulnérabilité repose sur la superposition de ces paramètres.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Introduction

Le présent chapitre a pour but de réaliser une carte de vulnérabilité intrinsèque basée sur des paramètres pédoclimatiques de la zone et hydrodynamiques de la nappe. La méthode adoptée est la méthode SI précédemment décrite en chapitre 3.

4.1 Méthodologie

Le calcul et la cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale du Haut Cheliff ont été réalisés par la méthode SI à l'aide du logiciel Arc Gis version 10.4 et l'extension Spatial Analyst. Le logiciel Arc Gis permet l'intégration et la répartition spatiale des scores, attribués aux sept paramètres de la méthode DRASTIC et leur représentation sous le format Raster. Avec l'extension « Spatial Analyst » les shapefiles ont été convertis en Raster.

Chaque Raster représente la variation spatiale des scores. Le calcul des indices de vulnérabilité selon la méthode SI se fait directement par un calcul d'addition appliqué sur les cinq Raster. Le résultat de ce calcul est l'élaboration d'une nouvelle couche d'information qui représente la variation de l'indice de vulnérabilité dans la zone d'étude.

Les étapes de l'élaboration de la carte de vulnérabilité sont les suivantes :

- Collecte des données ;
- Numérisation des données ;
- Calcul des scores ;
- Attribution des scores ;
- Classification, et reclassification des cinq paramètres spécifiques de la nappe ;
- Élaboration de la carte pour chaque paramètre spécifique de la nappe en mode Raster ;
- Calcul de l'indice de vulnérabilité global par la somme des cinq cartes Raster des paramètres spécifiques de la vulnérabilité de la nappe ;
- Classification et élaboration de la carte Vulnérabilité finale.

4.2 Elaboration des couches thématiques des cinq paramètres SI

4.2.1 Profondeur de la nappe (*Depth*) (*D*)

La profondeur de la nappe représente la distance verticale traversée par un contaminant à la surface du sol pour atteindre la nappe (rétention, stockage, interaction physicochimiques avec l'encaissant) et donc sa possible dégradation en cours de transfert.

Généralement, la protection de l'aquifère augmente avec la profondeur du niveau de la nappe.

Pour la détermination de ce paramètre, les niveaux statiques de 19 points d'eau à l'échelle de la zone d'étude ont été relevés. Une interpolation de ces données a permis d'élaborer la carte relative à la profondeur variant entre un minimum de 4 m et un maximum de 35 m. La carte des profondeurs de la nappe a été établie en utilisant la méthode d'interpolation IDW. Elle met en évidence une variabilité spatiale marquante et montrant cinq classes allant de 4 à plus de 32 m (Fig 4.1.a).

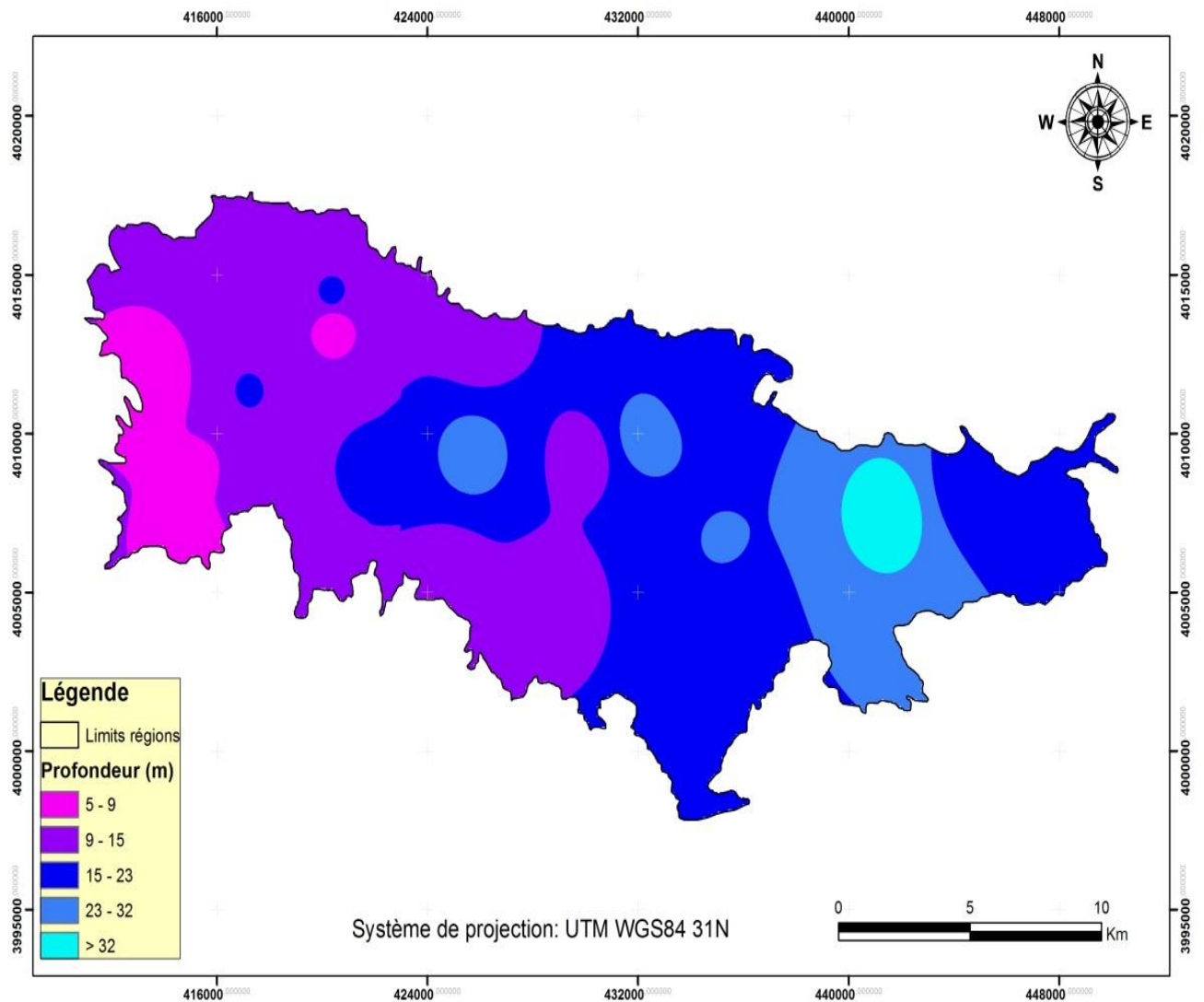


Figure 4.1.a : Répartition Spatiale des profondeurs des eaux souterraine dans la plaine alluviale de Khemis Miliana.

Un reclassement de la carte des profondeurs a été effectué par l'attribution des scores pour les cinq classes.

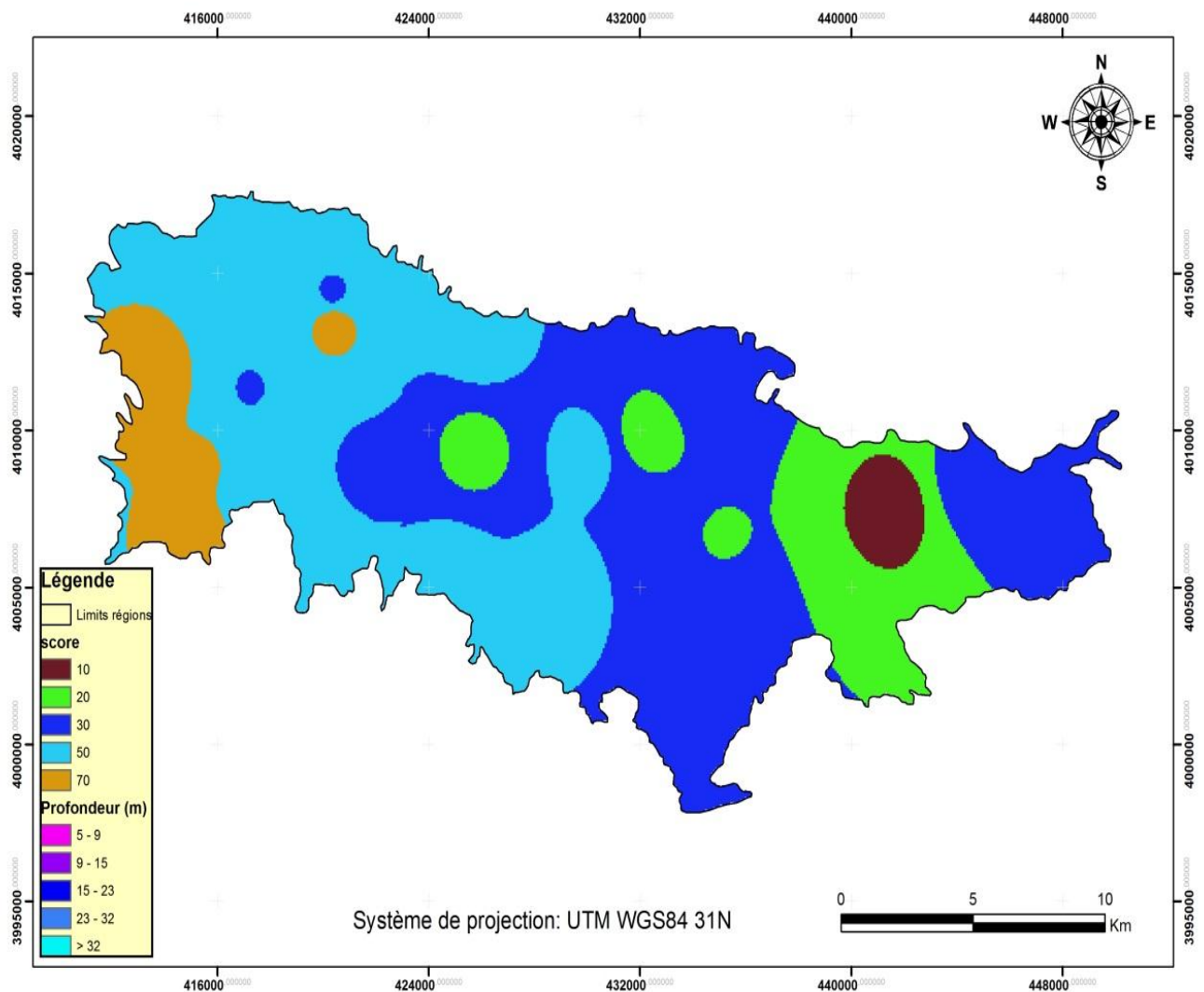


Figure 4.1.b : Répartition Spatiale des profondeurs des eaux souterraine et leurs scores.

La partie extrême Est de la plaine, les profondeurs d'eau sont variés entre 15 – 23m où un score de 30 a été attribué, ce même score a été donnée pour le secteur entre Ain Soltane et Khemis. Les profondeurs élevées ont été observées autour de la ville de Djendel (23 -35m), où les scores de 10 et 20 ont été attribués.

La partie ouest de la plaine est caractérisée par des profondeurs variant entre 9 à 15m, soit un score de 50 a été donné. Alors que le secteur près de la ville de Djelida montre des faibles profondeurs (< 9 m) où un score maximale de 70 a été affecté.

L'analyse de la carte de son ensemble montre que les scores de 30 et 50 sont les plus dominants dans cette plaine à plus de 80%.

4.2.2. Recharge efficace de l'aquifère (Net Recharge) (R)

La recharge dans notre zone, est répartie en deux classes comme suit : une valeur supérieure à (20 mm/an) qui occupe presque la totalité de la plaine à 95% de la surface, et le reste de la plaine montre une recharge inférieure 20 mm/an (voir figure 4.2.a). Puisque, les variations de la recharge dans toute la zone d'étude sont subdivisées en deux classes, nous avons leurs assignées deux scores, de 30 pour la recharge < 20 mm/an et 50 pour la recharge qui > 20 mm/an (voir figure 4.2. b).

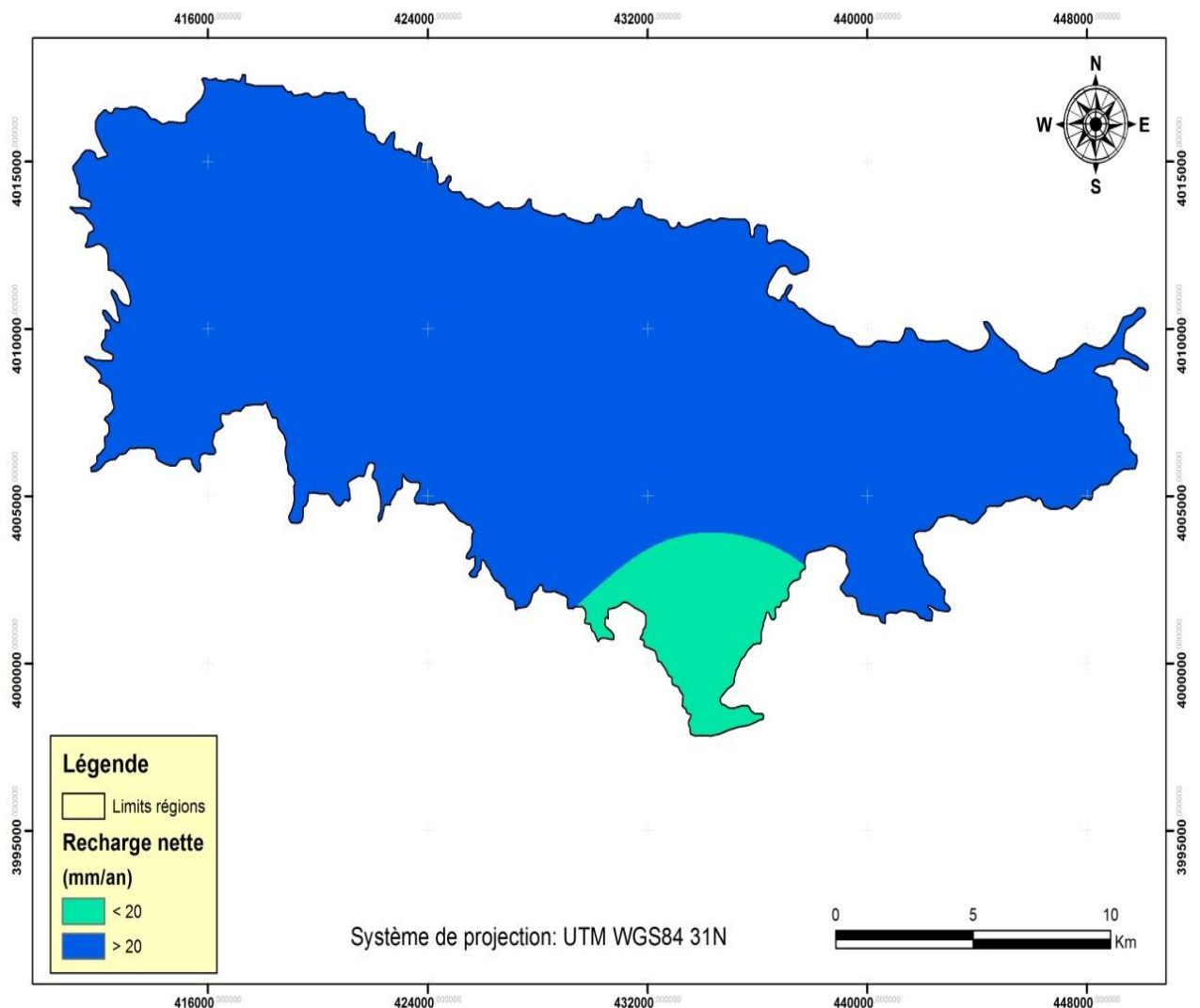


Figure 4 .2.a : Répartition spatiale de la recharge des eaux souterraines.

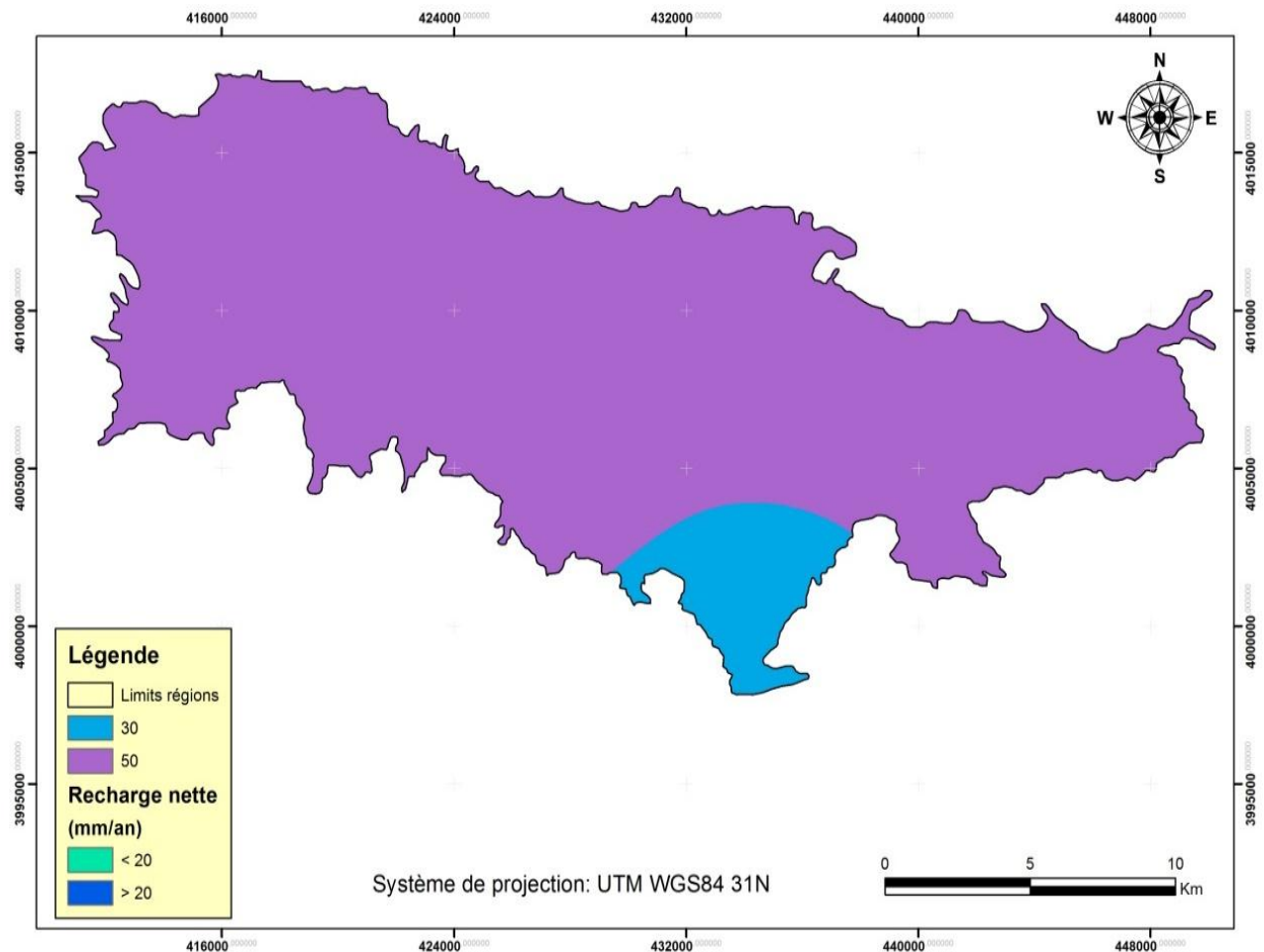


Figure 4 .2.b : Répartition spatiale de la recharge des eaux souterraines assignée par scores.

4.2.3. Paramètre des matériaux de l'aquifère (Aquifer media) (A)

La description du matériel constituant les zones saturées et non saturées de l'aquifère du Haut Cheliff a été réalisée sur une base descriptive des 18 coupes de forages qui captent cet aquifère.

Les matériaux lithologiques constituant la nappe sont essentiellement des Graviers, Galets et Sables, où cinq classes de perméabilités ont été établies: (0,02-0,16) (0,16-0,21) (0,21-0,30) (0,30-0,40) et (> 0,40), alors que pour les scores de ce type lithologique, nous avons les subdivisés en 2 classes, un score de 80 a été attribué pour les sables gros et les graviers, qui sont très développées surtout dans la partie Est de la région.

On note que la partie ouest de l'aquifère est surtout caractérisé par des terrains de forte perméabilité (graviers et galets), où un score de 90 a été attribué (figure 2.3.b).

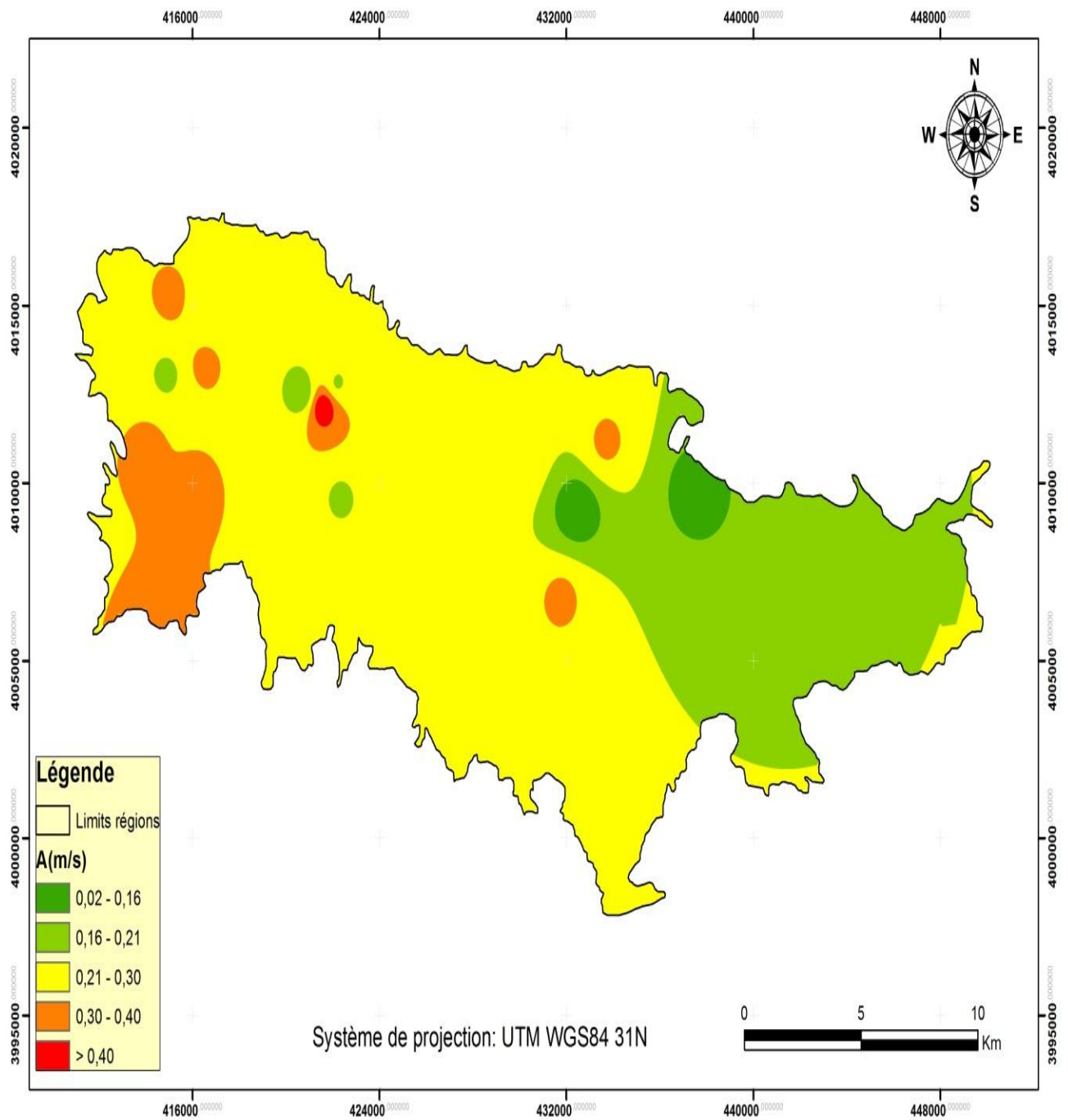


Figure 4.3.a. Répartition spatiale du paramètre du milieu -aquifère.

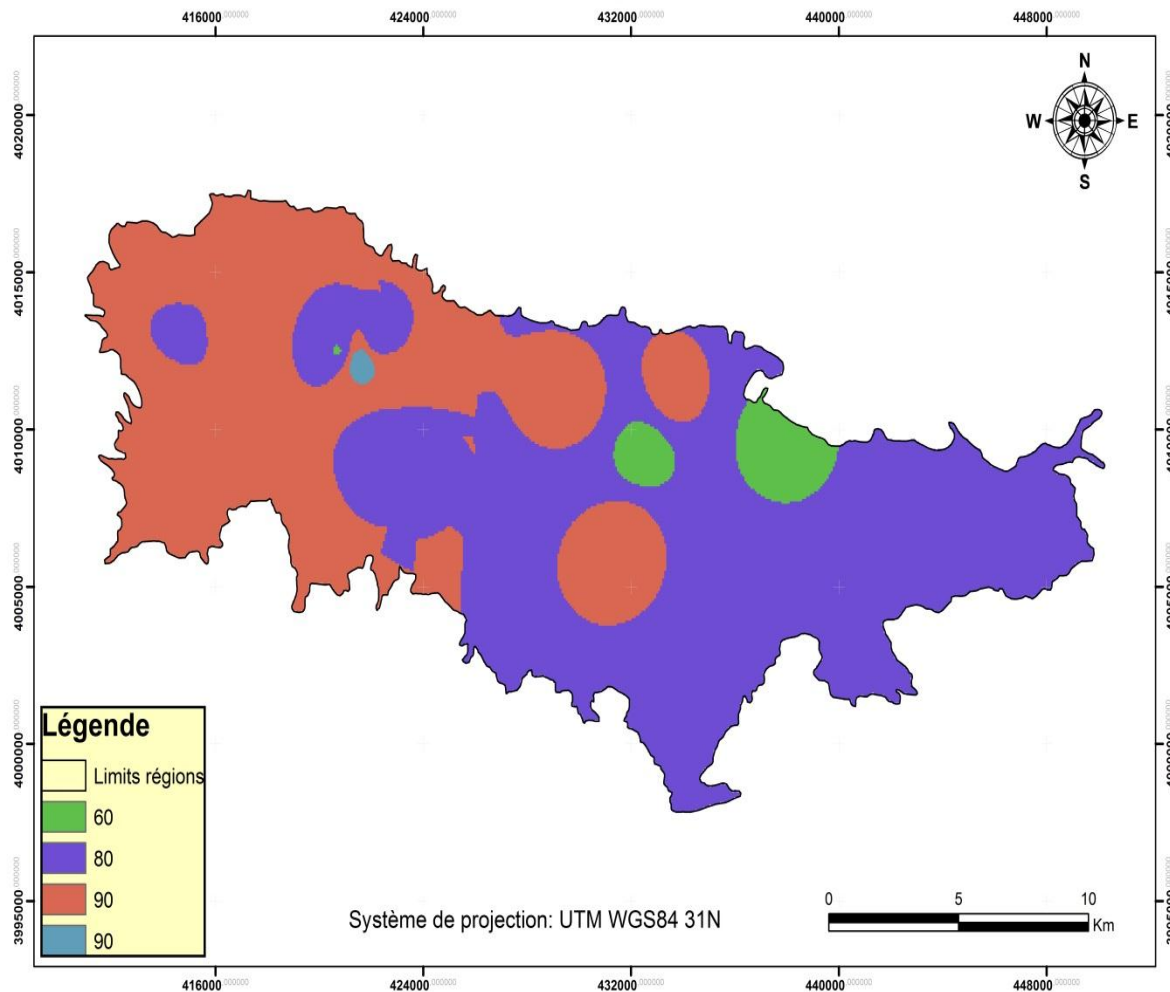


Figure 4.3b : Répartition spatiale du paramètre du milieu -aquifère assigné aux scores.

4.2.4. Paramètre Topographie (pente) (Topography) (T)

La carte des pentes de la plaine du Haut Cheliff a été établie sur la base d'un traitement du Modèle Numérique du Terrain « MNT » et en anglais c'est « DEM » extrait et clippé à partir du DEM Nord Algérie dont il est caractérisé par une résolution de 30 m.

Cinq classes des degrés de pente ont été accommodées à la plaine alluviale de Khemis Miliana avec des intervalles: <3%, 3-6%, 6-12%, 12-18%, >18 ; et des scores de 100, 90, 50,30 , et 10 ont été attribuées à ces intervalles, respectivement.

La quasi-totalité de la zone d'étude est caractérisée par une très faible pente comprise entre 3 et 6 %. Ceci favorise l'infiltration plutôt que le ruissellement si la géologie est favorable et donc une éventuelle pollution qui se produit à la surface serait ainsi entraînée vers la nappe.

Les notations et pondérations de ce paramètre sont mentionnées sur la carte de la pente (voir figure 3.4.a).

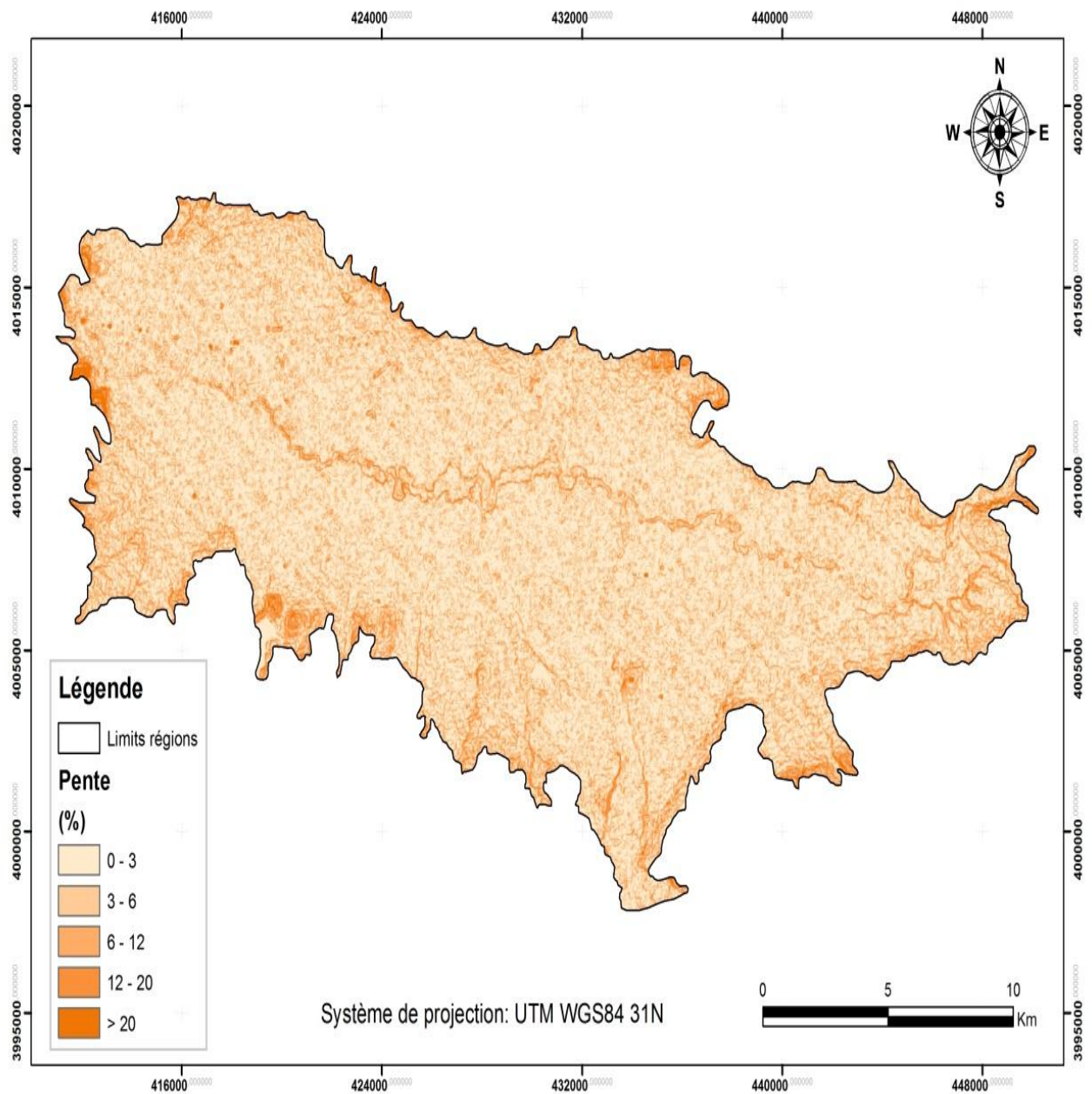


Figure 4.4a : Répartition spatiale des degrés de la pente de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

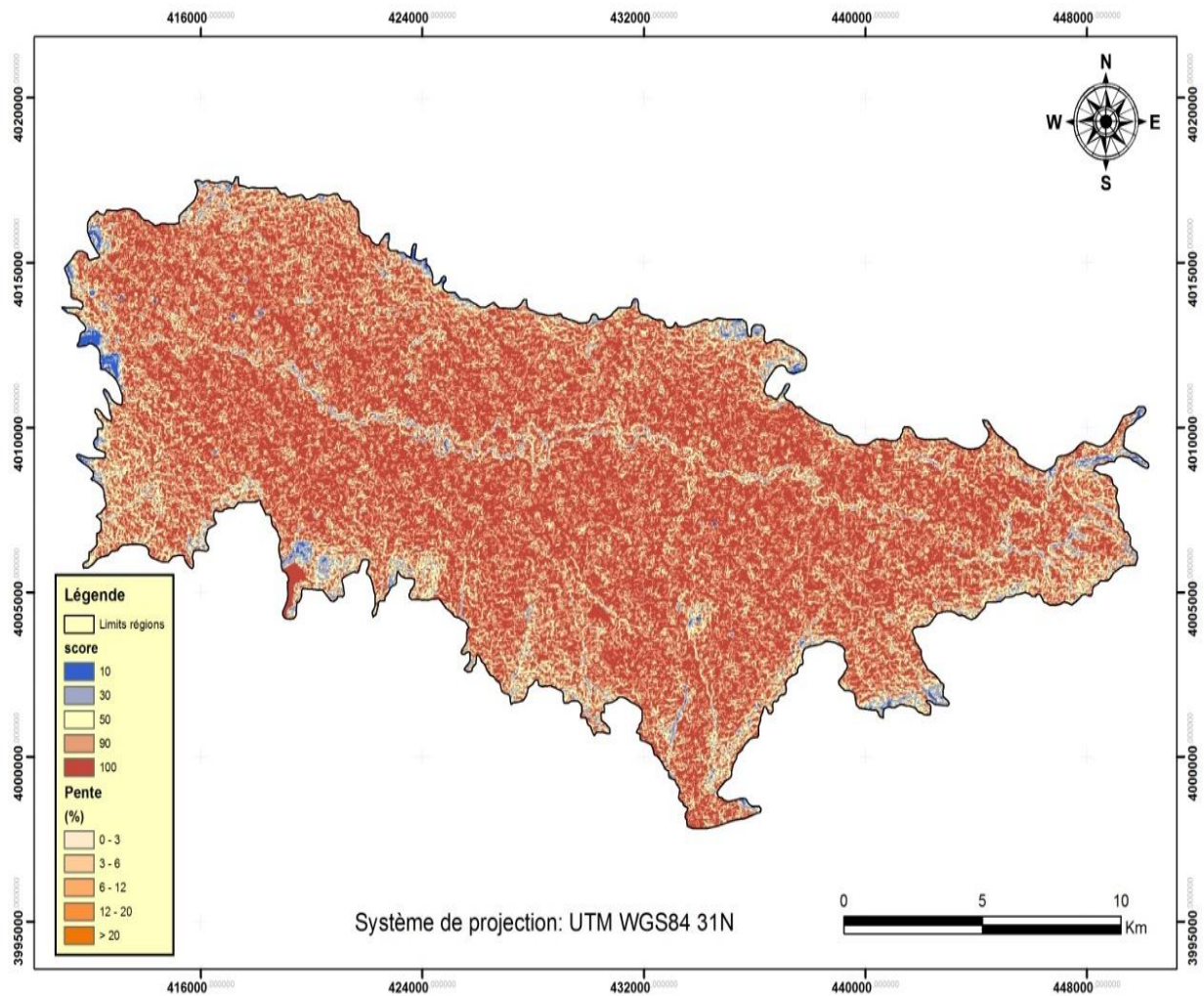


Figure 4.4b : Répartition spatiale des degrés de la pente de la plaine alluviale assignée à leurs scores.

4.2.5 Paramètre d'occupation des sols

Le cinquième paramètre traduit les activités anthropiques, à travers l'occupation du sol OS (Fig.4.5.a). Une valeur comprise entre 0 et 100 est attribuée à chaque classe d'occupation du sol. Le tableau II présente les classes d'occupation du sol considérées par le modèle SI, les classes identifiées dans le secteur d'étude et les valeurs qui leur ont été assignées après adaptation.

Dans notre plaine, l'occupation des sols compte 3 classes majeures qui sont les suivantes :

Milieu aquatique (surface d'eau) avec un score attribué de 50, et des surfaces agricoles (culture irriguée) ont un score majeur de 90, et la dernière classe englobe le bâti et l'urbanisation caractérisée par un score de 70 (voir figure 4.5b).

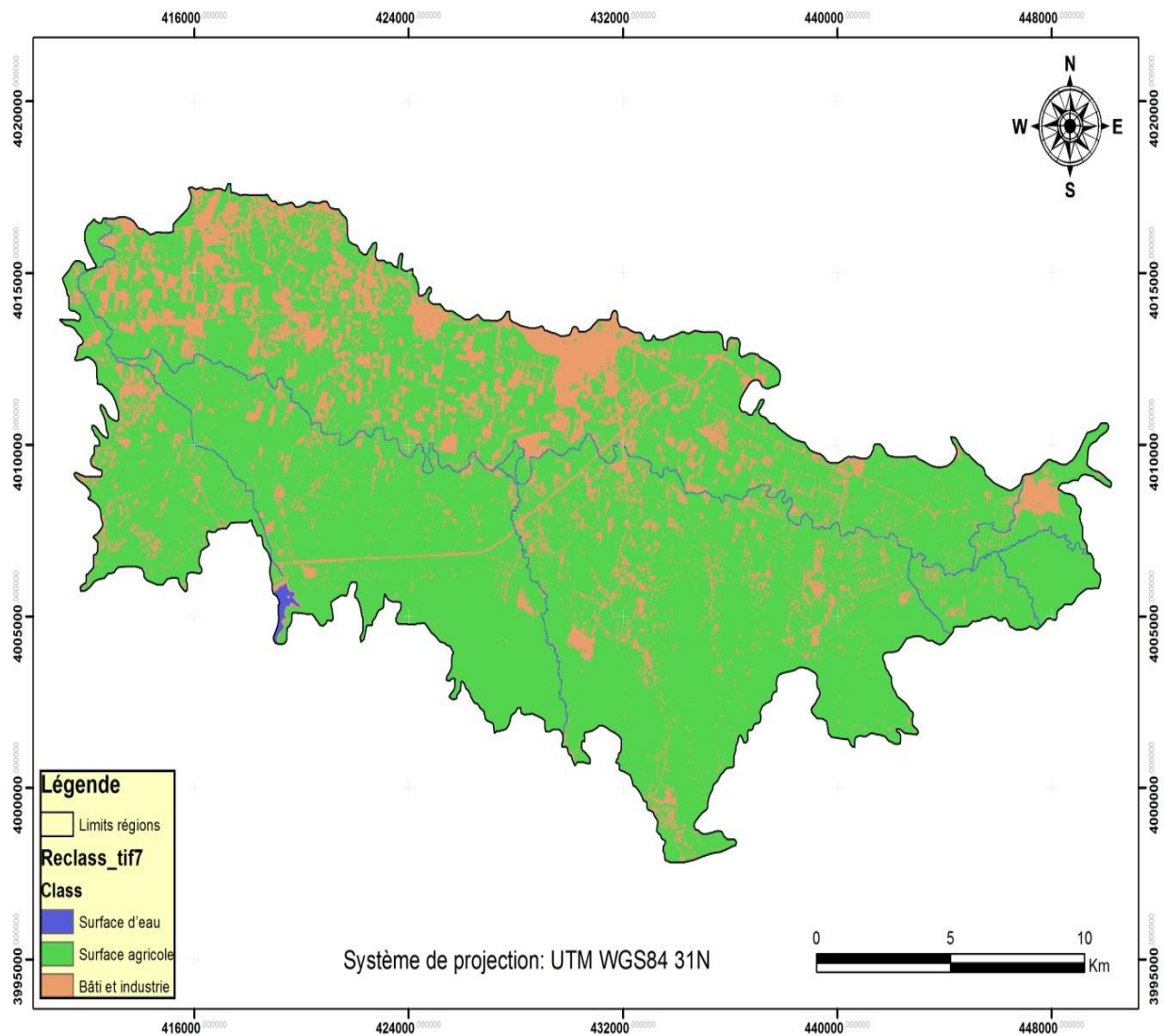


Figure 4.5a. Répartition spatiale d'occupation des sols de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

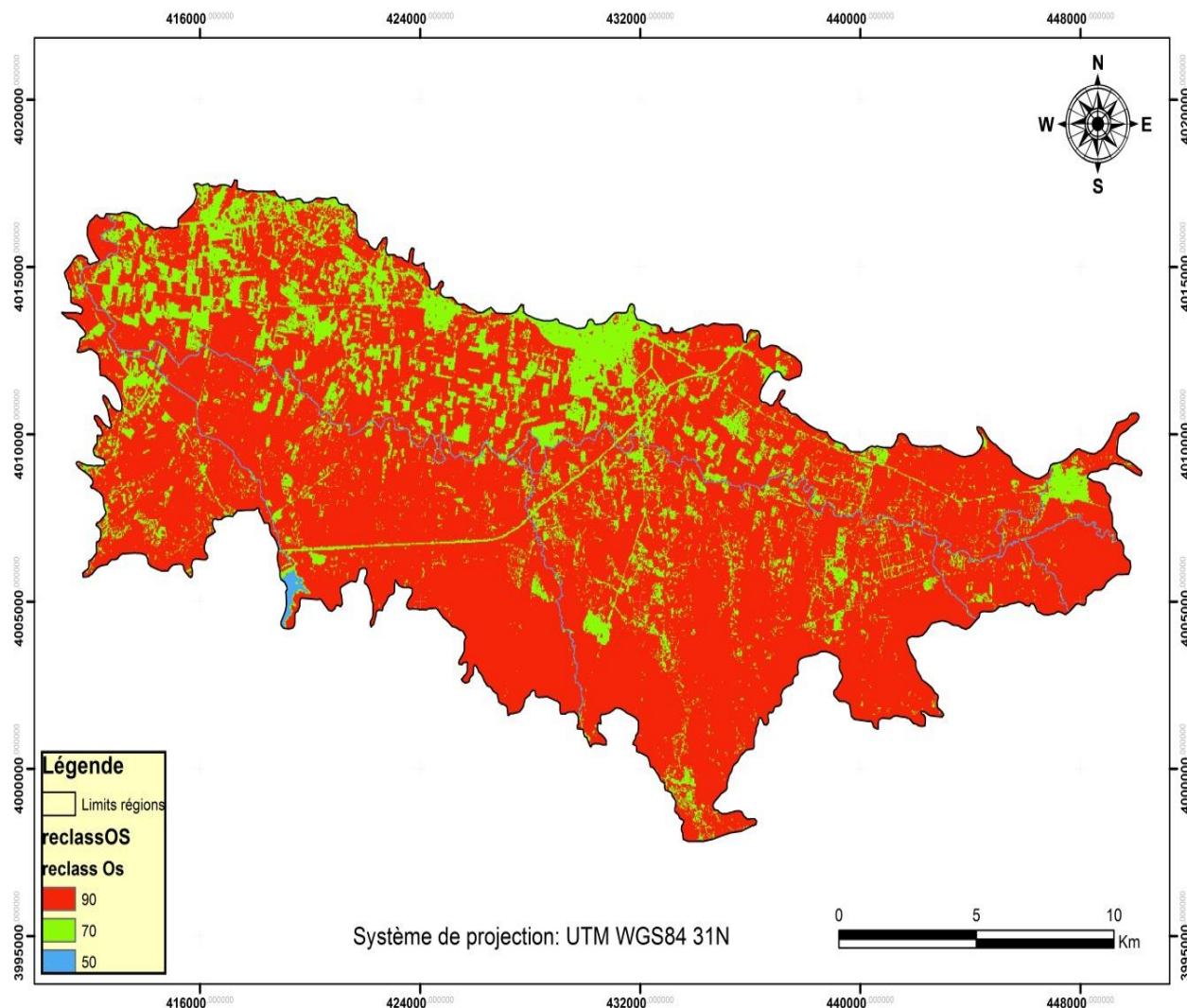


Figure 4.5b. Répartition spatiale d’occupation des sols de la plaine alluviale assignée à leurs scores.

4.3 Carte finale de la vulnérabilité selon la méthode SI

La méthode qui a été appliquée pour préparer la carte de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à la pollution a déjà été entièrement décrite dans les sections précédentes. La carte de vulnérabilité SI obtenue (Fig.4.5) montre l’existence de trois degrés de vulnérabilité dans la zone d’étude : moyen, élevé et très élevé avec (13.82 km^2) 3.85 % des territoires à vulnérabilité moyenne, (299.99 km^2) 83.71 % à vulnérabilité élevée, et (44.52 km^2) 12.42 % à vulnérabilité très élevée, par rapport à la superficie totale de la plaine ($358,34 \text{ km}^2$).

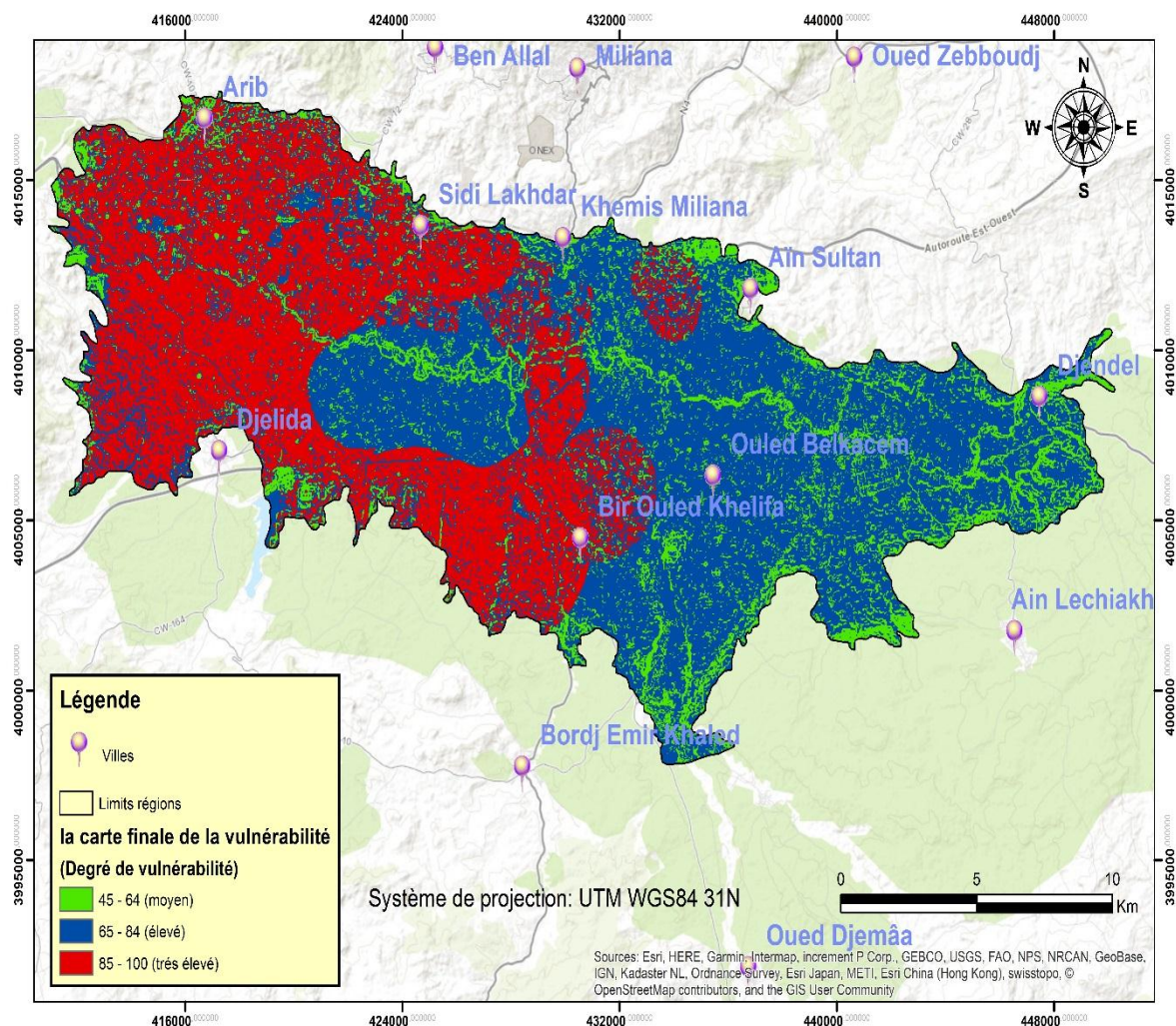


Figure 4.6 : la carte finale de la vulnérabilité de la plaine de Khemis Miliana

4.4 l'incohérence entre la vulnérabilité et les concentrations des nitrates

Les nitrates sont présents dans l'eau par lessivage des produits azotés dans le sol, par décomposition des matières organiques ou des engrais de synthèse ou naturels. L'azote est un élément indispensable dans l'édification de la cellule. Dans le domaine aquatique, l'azote existe sous forme moléculaire (N_2) ou ionisée : Nitrates (NO_3^-), Nitrites (NO_2^-) et ammonium (NH_4^+) ainsi que sous forme organique dissoute ou particulaire (protéine, acides aminés, urée, etc.).

La figure 17 indique la concentration de NO_3^- est supérieures à norme OMS

(45 mg/l) atteindre jusqu' à 150 mg/l dans l'amont de la plaine de Khemis-Miliana ce qui atteste de son origine anthropique est liée principalement à l'application des engrais azotés vu que la zone d'étude est principalement à vocation agricole. L'élevage, les eaux usées et les décharges peuvent constituer une autre origine des nitrates dans la zona d'étude. En effet, la nappe alluviale du haut chécliff est journalièrement confrontée au risque de la pollution par les nitrates provenant des activités industrielles, agricoles ainsi que des. Effluents domestiques rejetés souvent sans épuration augmentant par conséquent le risque et la détérioration de la qualité des ressources hydriques et engendrant un risque sanitaire pour la population rurale s'approvisionnant le plus souvent directement de l'aquifère (Sahraoui 2015). La répartition spatiale des concentrations des nitrates ne reflète pas les données obtenues sur la carte finale de la vulnérabilité SI surtout la carte des concentrations des nitrates (période Hautes Eaux), il y' a un certain déférence entre les des cartes (voir Figure).

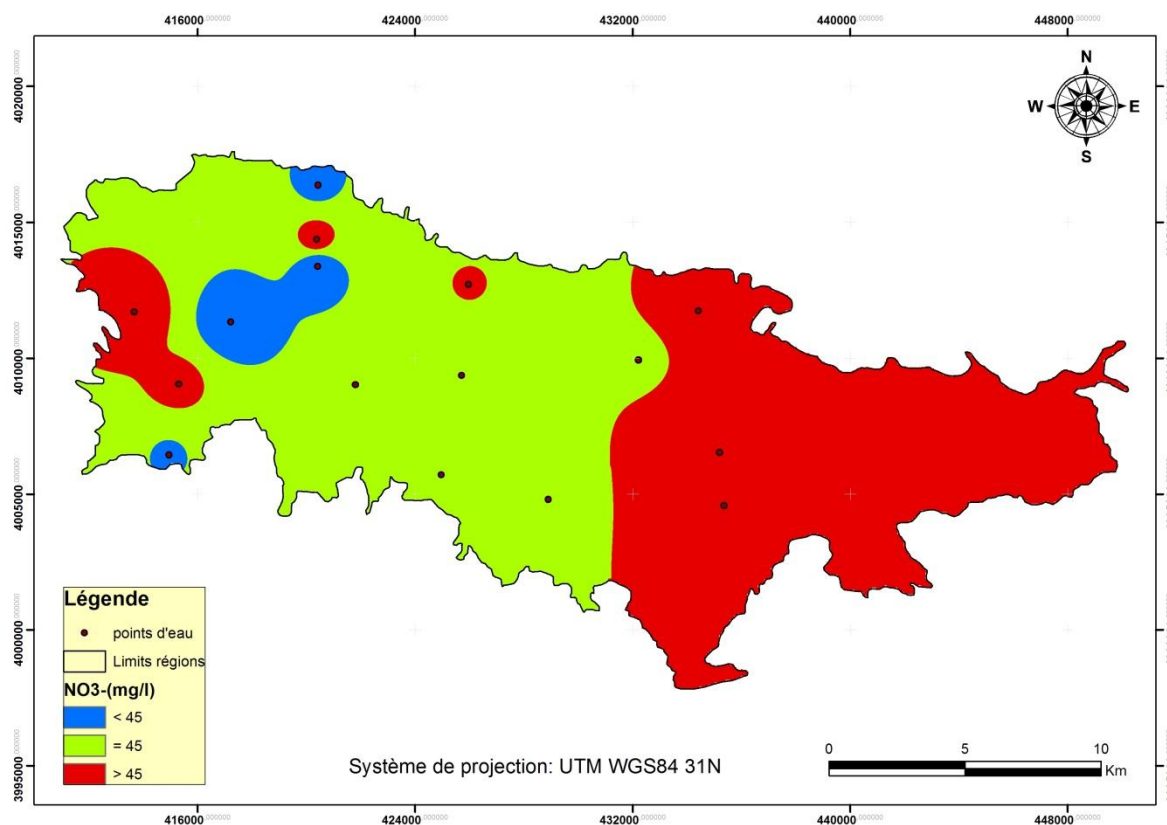


Figure 4.7 : la répartition spatiale des nitrates dans la plaine de Khemis Miliana (Haute Eaux 2013)

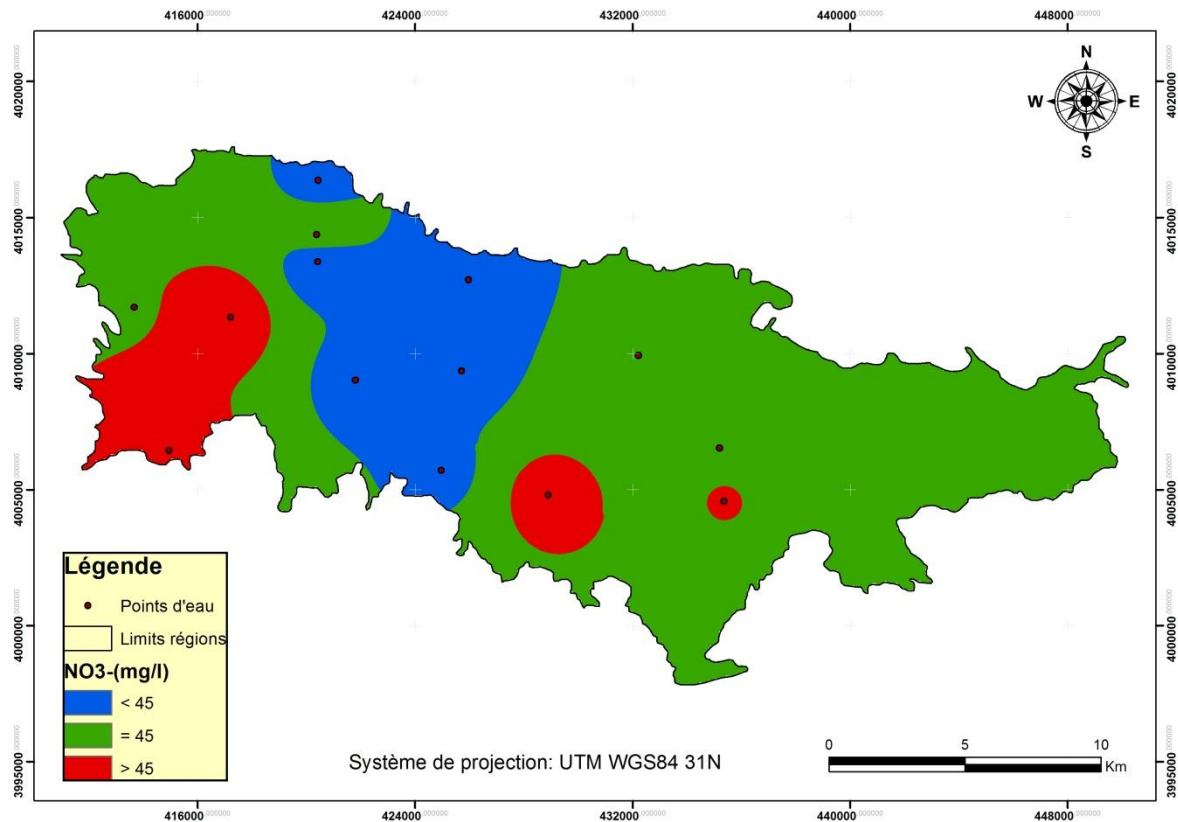


Figure 4.8 : la répartition spatiale des nitrates dans la plaine de Khemis Miliana (Basses Eaux 2013)

La carte de la répartition spatiale des concentrations des nitrates dans la plaine du Khemis Miliana (Basse Eaux 2013) montre des résultats concordants avec la carte de la vulnérabilité du modèle SI, elle indique que la partie Ouest de la plaine est vraiment vulnérable selon la carte des nitrates, par contre la partie centrale de la plaine est moins vulnérable, la partie Est de la plaine consiste à une vulnérabilité moyennement élevée. Ces résultats restent hypothétiques car la méthode SI ne prend pas les paramètres des sols de la zone non saturée en considération, donc la méthode n'était pas vraiment fiable mais reste comme un modèle qui peut être modifier et améliorer tout en introduisant d'autres paramètres qui conviennent pour notre plaine.

Conclusion

Les différents points abordés le long de ce chapitre ont fait état de la vulnérabilité à pollution de la nappe alluviale du Haut Cheliff. Notre approche a permis de déterminer et classifier les zones de vulnérabilité, qui montrent, que la quasi-totalité de la nappe présente une classe de vulnérabilité élevée et que des mesures doivent être prises pour le mettre à l'abri de la contamination par des polluants qui pourront exister à la surface de la zone. Ces cartes de vulnérabilité ont ainsi vocation à devenir un véritable outil d'aide à la gestion et à la surveillance de la ressource en eau souterraines, après avoir certaine traitement de données (mesures sur terrain) et prendre les paramètres des sols et la zone non saturée en considération.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans la plaine du Haut Cheliff comme ailleurs, l'intensification agricole a conduit à l'utilisation intensive des engrais et des produits chimiques ce qui a entraîné un état de pollution agricole remarquable au niveau de ce plaine. La consommation des eaux souterraines de cette nappe chargées par des teneurs élevés en nitrate a causé beaucoup de problèmes de santé dans cette zone.

La zone d'étude est située dans le bassin versant du haut Chélif. Elle montre une série stratigraphique de formations d'âge mio-plio-quadernaires. Les principaux aquifères du Haut-Chélif sont :

- L'aquifère alluvionnaire du Quaternaire
- L'aquifère du Miocène (conglomérats plus ou moins argileux et sableux)
- L'aquifère du Jurassique (calcaire fissuré)

Ce travail à pour objectif essentiel, est l'application des techniques SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité de aquifère alluviale à la pollution. Dans ce travail, nous avons concentré sur la vulnérabilité des eaux souterraines principalement causée par les activités agricoles (engrais, nitrates) en utilisant la méthode de l'indice de susceptibilité (SI). Ce modèle a été élaboré pour déterminer la contamination par les nitrates induite notamment par l'agriculture en utilisant des techniques SIG.

L'élaboration de la carte de vulnérabilité de la nappe du Haut Cheliff réalisé par le modèle SI a permet de mettre en évidence trois classes (moyenne, élevée et très élevée),

- Une classe à moyen degré de vulnérabilité dont l'indice SI général est entre 45-64. Elle couvre une superficie de 3.85% à la surface totale de la plaine. Cette classe coïncide avec les sols de texture sableuse et argilo- sableuse, avec des perméabilités moyennement faibles. Cette classe caractérise généralement les bordures de la plaine et les rives d'Oued Chélif. Les formations de la zone saturée dans cette classe présentent une texture moyennement fine (sable) et les profondeurs d'eau y sont assez élevées (atteignant 32 m). L'ensemble de ces facteurs constitue une zone moyennement protectrice pour l'horizon aquifère, ce qui contribue à atténuer le lessivage des polluants en l'occurrence les nitrates en présence d'une infiltration élevée.
- Une classe à degré de vulnérabilité élevé dont l'indice SI général varie de 65 à 84. Elle correspond à un pourcentage de surface de 83.71% de la quasi-totalité de la plaine. Cette

classe se localise principalement entre Djendel, Ain Sultane, et une partie au centre de la plaine où les formations de la zone saturée sont constituées, pour une grande partie, d'argiles-graviers et de sables. Elles sont à perméabilité globalement bonne (de l'ordre de 0.21 - 0.30 m/s), induisant une bonne infiltration et propagation des polluants.

- Une classe à degré de vulnérabilité très élevé dont l'indice SI général varie de 85 à 100. Elle correspond à un pourcentage de 12.42% caractérise la partie Ouest et le Sud-Ouest de la plaine où les formations de la zone saturée sont constituées, pour la majorité de la plaine par des graviers et de sable-graveleux, indiquant une très bonne perméabilité, ce qui favorise la bonne infiltration et propagation des polluants.

La connaissance territoriale de l'enjeu plus ou moins fort que constituent les nappes souterraines, et au-delà des constats de la qualité mauvaise des eaux souterraines, il est nécessaire d'appréhender leur vulnérabilité en termes de sensibilité à la pollution, afin de les remédier et les protéger, mais aussi prévenir des situations futures.

RECOMMANDATIONS :

Certaines recommandations peuvent être proposées, afin de protéger la nappe alluviale du Haut Cheliff contre la pollution agricole :

- Sensibiliser régulièrement le grand public pour l'utilisation d'une manière convenable des engrais dans les zones agricoles pour réduire la contamination de la nappe notamment par les Nitrates.
- Les décharges publiques non contrôlées doivent être interdites dans les sites proches des nappes aquifères et les communes doivent prendre l'initiative pour s'associer en vue de créer en commun des centres d'enfouissement technique ;
- Maîtriser le stockage et l'utilisation des matières organiques résultant de l'élevage animal. Et surveiller en permanence la qualité des eaux superficielles et contrôler les rejets urbains et industriels au niveau de l'Oued.
- Réaliser une étude de modélisation en utilisant un modèle hydrogéologique capable de cerner les mécanismes de transferts d'un polluant pour les écoulements souterrains, ce qui peut beaucoup aider à la protection de la nappe contre la pollution
- L'installation des réseaux d'assainissement pour les agglomérations rurales ;
- L'installation d'une station d'épuration est très essentielle,

Il est aussi important de dire que nos résultats, nécessitent une validation par une comparaison avec les autres cartes de vulnérabilité obtenu par les autres méthodes, comme celle de DRASTIC, SINTACS,...

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABHCZ, 2004.** « Agence du Bassin Hydrographique Cheliff- Zahrez », cadastre hydraulique du bassin Cheliff aval du barrage de Boughazoul, premier partie. «Haut et moyen Cheliff».
- Adriano D.C. (1992).** Biogeochemistry of trace metals. Advances in trace substances research. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 513
- ALLER L., BENNETT T., LEHR J.H., PETTY R.J. ET HACKETT G (1987) -** DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. *US-EPA Report 600/2-87-035, XVIII + 622 p.*
- ANRH, 2018.** Données pluviométriques et hydrométriques, fichier Excel, agence national des ressources hydriques Blida et Alger.
- Arzika R.2012.** Etude de l'évolution de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la plaine du Haut-Chélif (utilisation de l'analyse en composantes principales : ACP), Master, Univ, p34.
- BATISTA S. (2004).** Exposição da água subterrânea a pesticidas e nitratos em ecossistemas agrícolas do Ribatejo e Oeste e da Beira Litoral. Thèse de Doctorat, Institut Supérieur d'Agronomie, Lisbonne (Portugal), 469 p.
- Beaux JF., (2003) :** L'environnement. Edition Paris : Nathan, ISBN 2-09-182431-3. 160 p.
- Boulaine J.L.G. (1957).** Etude des sols des plaines du Cheliff. Thèse de Doctorat, Univ. Alger, 582 p.
- BRGM, 2005.** Cartographie de la VULNERABILITE intrinsèque des eaux souterraines en région Nord-Pas-de-Calais (BRGM/RP – 54238 - France).
- Chekroud H., (2007) :** Étude de la pollution des eaux de la plaine de Telezza due aux activités agricoles et commerciales. Mémoire de Magister. Université du 20 Août 1955 - Skikda. 56 p.
- Claus R et Legoupil J-C.1972.** Le milieu du Haut-Chélif et ses implications agronomiques. L'Agronomie Tropicale. Série 2, Agronomie Générale.
- CGG, (1969) :** Étude géophysique des plaines du Cheliff, DEMRH, Alger.

CORINE Land Cover (1993) - *CORINE Land Cover*: guide technique. Édit. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, rapport EUR 12585 FR, Luxembourg, IV + 144 p.

CUCCI.F e t al, (2007): Intrinsic vulnerability assessment of Sette Comuni Plateau Aquifer (Veneto Region, Italy), *Journal of Environmental Management*, 11 p.

Debieche T.H. (2002). Evolution de la qualité des eaux (Salinité, Azote et Métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle (application à la basse de la plaine Seybouse –Nord –Est Algérien). Thèse de Doctorat / Université de FrancheComté, France, 199 p.

EEC.2001. Engineering Environement Consulte « Bulletin International de l'eau de l'environnement

Es-Salhi M.A. (2007). Contrôle de la contamination et de l'eutrophisation des lacs dans une approche par bassin versant : Cas de la Baie Missisquoi Lac Champlain Montérégie, 3^{ème} colloque étudiant de L'IHQEDS, Québec, 142.

Faurie C., Medori P., Ferra C., et al, (2003) : *Écologie : Approche scientifique et pratique*. 5^{ème} Edition Lavoisier doc et Tec, Paris, p.312.

Gaujous D, (1995) : *La pollution des milieux aquatiques, aide-mémoire*, Édition2, Éditeur Tec & Doc Lavoisier, 220 p.

Gaury F. (1992). Systèmes de cultures et teneurs en nitrates des eaux souterraines. Mémoire de Docteur-Ingénieur. ENSA Rennes, 229.

GOGU R. & DASSARGUES A. (1998b): A short overview on groundwater vulnerability assessment basic statements for use in the framework of the COST 620 Action). **Workshop : Vulnérabilité et protection des eaux karstiques**. Neuchâtel (Suisse).

Guillaume J. (2008). Influence des activités agricoles sur la pollution nitrique des eaux souterraines. Thèse de Doctorat Ecosystèmes et Environnement. Université de Toulouse.

HAMZA M.H., ADDED A., FRANCÈS A. et RODRIGUEZ R. (2007) .Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est Tunisien). *Geoscience*, vol. 339, p. 493-505.

DOI : [10.1016/j.crte.2007.05.003](https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.05.003)

HAMZA M.H., ADDED A., FRANCÈS A., RODRIGUEZ R., AJMI M. et SAÂDI A. (2008) - Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 21, n° 1, p. 75-86.

HEMIDI L. (2013). Vulnérabilité de la nappe alluviale de Guerrara à la pollution. Thèse de magistère, UNIVERSITE KASDI MERBAH –Ouargla.

IKHLEF S. (2008). Etude de la pollution de la nappe alluviale du haut Cheliff par les nitrates. Mémoire de Mag., Univ. HBB Chlef, 145 p.

KAHILA A. et ACHOUR K. (2008) : Contribution à l'étude de la qualité des eaux souterraines de la plaine du Haut Cheliff. (Rapport du projet de synthèse de licence en système (L.M.D)- Centre universitaire de Khemis Miliana).

KANKOU M., (2004) : Vulnérabilité des eaux et des sols de la rive droite du fleuve Sénégal en Mauritanie- étude en laboratoire du comportement de deux pesticides. Thèse de doctorat, Université de Limoges, (2004), pp 23-24.

KESSAR et BENHACENE., KOUASSI E. 2010. Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Côte d'Ivoire : cas du CET de Kossihouen dans le District d'Abidjan (Côte d'Ivoire)

KETTAB A. 2005. Water for Sustainable Development (SD). An International Publication of Engineering Sciences. (in French), *Algerian J. Technol.*, ISSN 1111- 357x. pp. 521--524. Références

ONID. 2012. Agency of the National Office Irrigation and Drainage. Plan of the National Agricultural land cadastre agency, Algeria.

McDonald et BNEDER, 1990. Etude de l'avant-projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkhet Benziane et du réaménagement du Bas-Chélif.

- MATTAEUR M., (1958)** : Étude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie) - publication du service de la carte géologique de l'Algérie. Bulletin N°17. Alger.
- MEGHRAOUI M., CISTERNAS A., & PHILIP H., (1986)**: Seismotectonics of the lower Cheliff basin: structural background of the El Asnam (Algeria) earthquake. *Tectonics* 5, pp 809-836.
- MEHAIGUENE M., (2013)**: Étude des débits de base et des étiages en Nord-Ouest de l'Algérie, Thèse doctorat, ENSH Blida. p 16-106.
- MESSELMY H. 2004.** Essai de quantification de la ressource en eau et protection de la nappe alluviale du Haut Cheliff, mémoire d'ingénieur. Université de Khemis Miliana. 77p
- OLIVEIRA M. et LOBO-FERREIRA J.P. (2005).** Análise de sensibilidade de aplicação de métodos indexados de avaliação da vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas. *In: As águas subterrâneas no sul da península Ibérica*, L. RIBEIRO, F. PEIXINHO de CRISTO, B. ANDREO et X. SANCHEZ-VILA édit., Édit. APRH, Lisbonne (Portugal), p. 239-252.
- RECOURS S., MACHET J.M., PIERRE D., et REMY J.C. (1987).** Signification du coefficient réel d'utilisation et conséquence pour la fertilisation azotée des cultures. *C. R. Acad. Agric. De France*, 3, 39-55.
- RIBEIRO L. (2000).** Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos à contaminação. ERSHA-CVRM, note interne (non publiée), 8 p.
- Richa A., (2016).** Géostatistique et SIG pour la modélisation spatialisée de la pollution nitrée dans la plaine du Haut-Chéiff. Thèse de doctorat UHBB-Chéiff, Algérie.
- RICHA A., DOUAOUI A. et BETTAHAR N. (2015).** Quantification and contribution of nitrogen inputs in the soil on groundwater contamination by nitrates: Valley of HighCheliff (North Algeria), *Soil-Water Journal*, Special Issue, 51-60.
- SCHNEBELENN et al (2002)** : Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine -Année 5. Etude Sectorielle ~ Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise Nouvelles connaissances hydrogéologiques. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions Rapport BRGM/RP-51178- FR, 75 p.

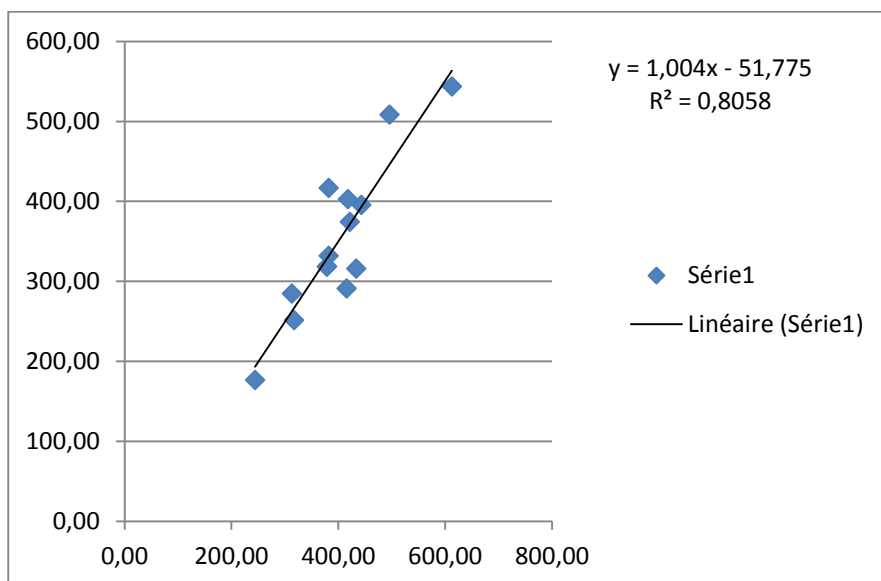
SAHRAOUI N. (2015) : Étude de la cohérence entre la vulnérabilité à la pollution et la qualité des eaux souterraines. Mémoire de master plaine de Khemis Miliana. ALGERIE ; UDBKM. Algérie.

TOUHARI F. (2007) : Étude de la qualité des eaux superficielles et souterraines du Haut et moyen Cheliff. Thèse de magister ; centre universitaire de Khemis Miliana. Algérie.

ZAPOROZEC A. & VRBA J. (1994a) : Executive summary In Vrba J. et Zaporozec A. (Ed.), Guidebook on mapping groundwater vulnerability, International contributions to hydrogeology, Verlag Heinz Heise Publisher, Hanovre, 16, **XV-XXIII**.

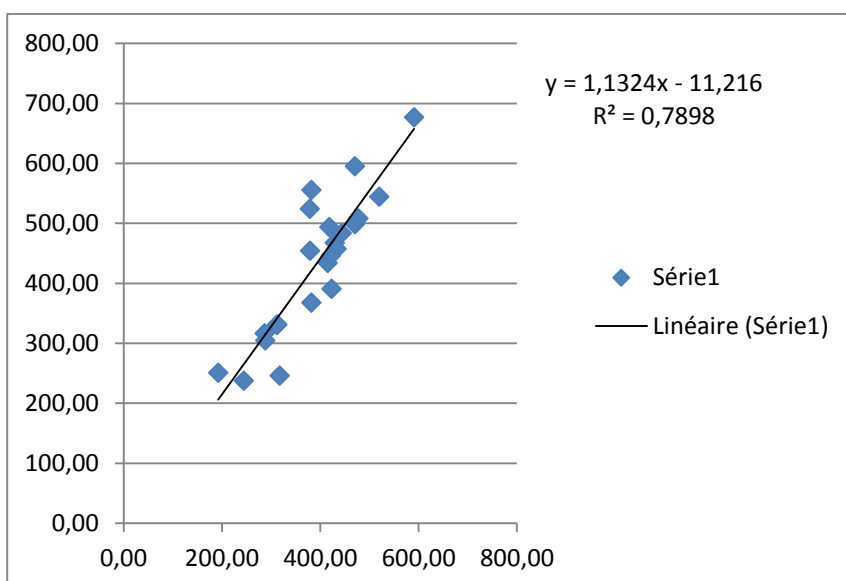
ANNEXE 01 : Comblement des lacunes de la station de Harreza Barrage

Année	Khemis- ANRH	Harreza brg
1984	470,30	420,41
1985	470,60	450,10
1986	520,00	433,70
1987	311,50	275,00
1988	429,10	317,20
1989	286,60	278,00
1990	422,90	321,10
1991	477,60	363,30
1992	288,20	261,30
1993	192,10	141,09
1994	443,50	441,00
1995	590,50	541,09
1996	312,90	284,70
1997	433,40	315,90
1998	415,20	291,30
1999	244,10	176,60
2000	417,90	403,00
2001	317,00	251,60
2002	381,80	416,80
2003	378,20	318,60
2004	381,90	332,00
2005	421,40	374,50
2006	379,00	319,00
2007	443,10	395,90
2008	612,90	543,90
2009	496,00	508,70
2010	516,60	466,89
2011	522,70	473,02
2012	447,2	397,21
2013	371,3	321,01
2014	419,1	369,00
2015	370	319,71



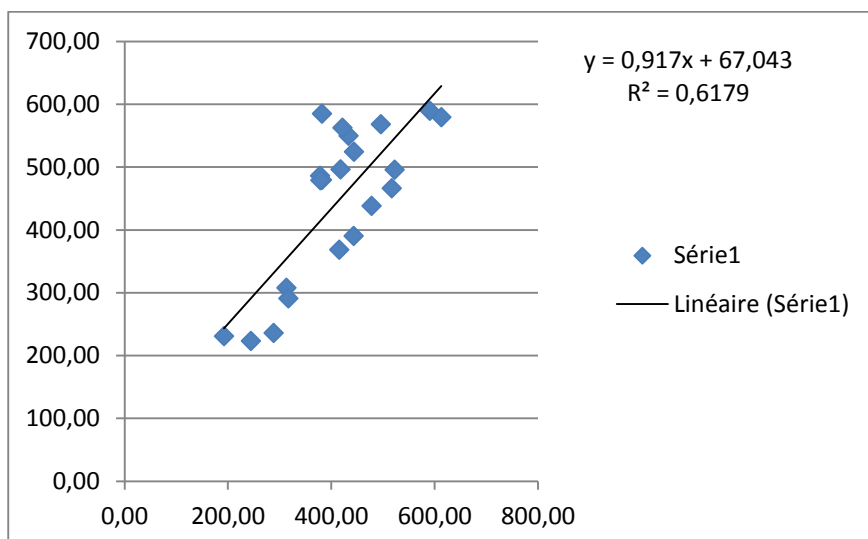
ANNEXE 02 : Comblement des lacunes de la station de Gherib Barrage

Année	Khemis- ANRH	Gherb brg
1984	470,30	595,10
1985	470,60	498,50
1986	520,00	544,80
1987	311,50	330,60
1988	429,10	467,60
1989	286,60	316,70
1990	422,90	390,70
1991	477,60	508,40
1992	288,20	305,00
1993	192,10	251,10
1994	443,50	483,50
1995	590,50	676,90
1996	312,90	331,50
1997	433,40	457,30
1998	415,20	433,80
1999	244,10	237,50
2000	417,90	494,00
2001	317,00	246,00
2002	381,80	555,70
2003	378,20	524,10
2004	381,90	367,60
2005	421,40	446,20
2006	379,00	454,50
2007	443,10	490,55
2008	612,90	576,30
2009	496,00	503,10
2010	516,60	779,30
2011	522,70	623,30
2012	447,2	495,19
2013	371,3	409,24
2014	419,1	463,37
2015	370	407,77



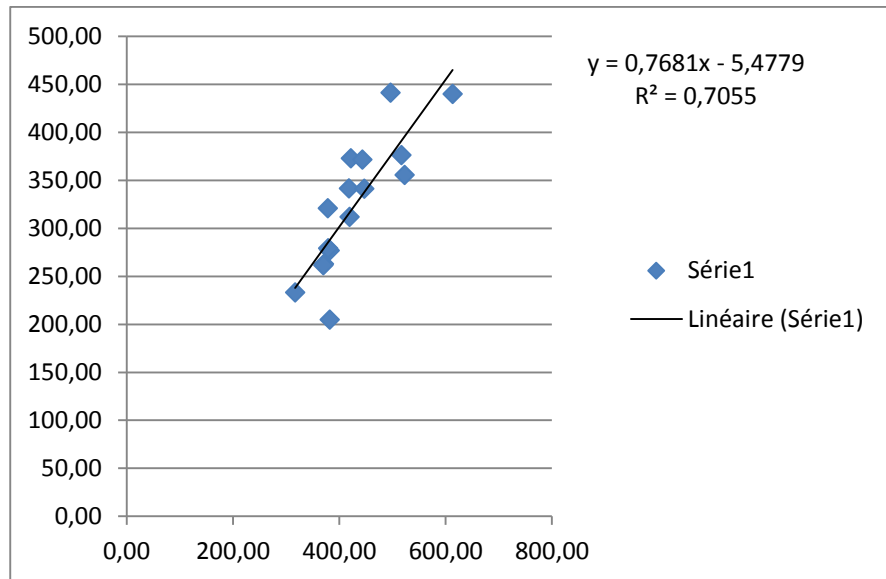
ANNEXE 03 : Comblement des lacunes de la station de Tarek Benou Ziad

Année	Khemis- ANRH	TIZ
1984	470,30	476,90
1985	470,60	460,30
1986	520,00	529,50
1987	311,50	334,60
1988	429,10	407,00
1989	286,60	329,86
1990	422,90	454,84
1991	477,60	438,60
1992	288,20	236,10
1993	192,10	231,00
1994	443,50	524,80
1995	590,50	589,80
1996	312,90	308,00
1997	433,40	550,20
1998	415,20	368,90
1999	244,10	223,50
2000	417,90	496,80
2001	317,00	291,30
2002	381,80	585,40
2003	378,20	486,60
2004	381,90	479,60
2005	421,40	562,80
2006	379,00	479,20
2007	443,10	390,70
2008	612,90	579,60
2009	496,00	568,70
2010	516,60	466,30
2011	522,70	496,30
2012	447,20	477,13
2013	371,30	407,53
2014	419,10	451,36
2015	370,00	406,33



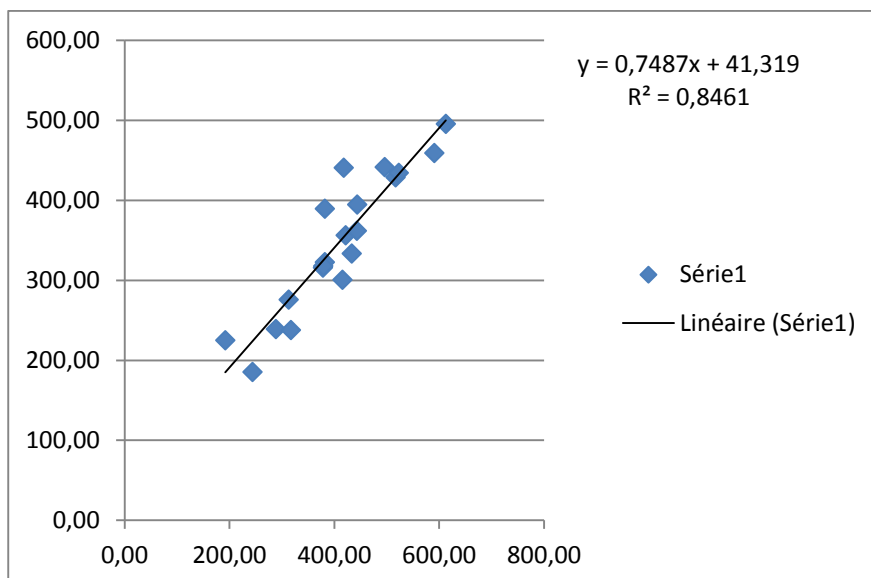
ANNEXE 04: Comblement des lacunes de la station du Marabout blanc

Année	Khemis- ANRH	Marabout Blanc
1984	470,30	355,76
1985	470,60	355,99
1986	520,00	393,93
1987	311,50	233,79
1988	429,10	324,11
1989	286,60	214,66
1990	422,90	319,35
1991	477,60	361,37
1992	288,20	215,89
1993	192,10	142,07
1994	443,50	335,17
1995	590,50	448,09
1996	312,90	234,86
1997	433,40	327,42
1998	415,20	313,44
1999	244,10	182,02
2000	417,90	341,80
2001	317,00	233,40
2002	381,80	204,90
2003	378,20	320,90
2004	381,90	277,00
2005	421,40	373,00
2006	379,00	279,30
2007	443,10	371,70
2008	612,90	440,00
2009	496,00	441,30
2010	516,60	376,50
2011	522,70	355,70
2012	447,20	341,37
2013	371,30	263,06
2014	419,10	311,89
2015	370,00	261,74



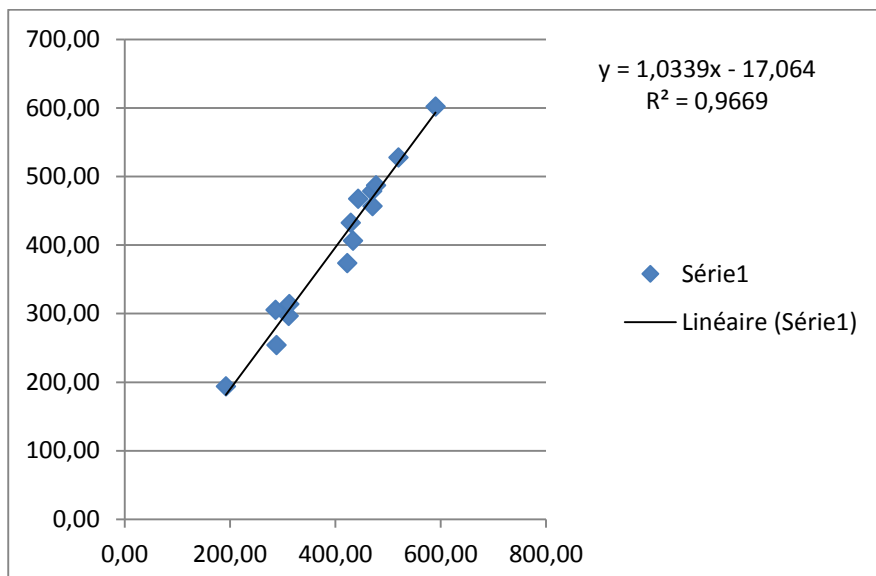
ANNEXE 05 : Comblement des lacunes de la station de l'Abbabsa Chélif

Année	Khemis- ANRH	El Abbabsa
1984	470,30	310,90
1985	470,60	436,30
1986	520,00	484,60
1987	311,50	285,80
1988	429,10	343,80
1989	286,60	278,90
1990	422,90	375,00
1991	477,60	398,90
1992	288,20	238,90
1993	192,10	225,20
1994	443,50	394,80
1995	590,50	459,30
1996	312,90	275,70
1997	433,40	333,50
1998	415,20	300,60
1999	244,10	185,40
2000	417,90	440,90
2001	317,00	237,90
2002	381,80	389,70
2003	378,20	315,80
2004	381,90	322,90
2005	421,40	356,30
2006	379,00	317,80
2007	443,10	362,00
2008	612,90	495,50
2009	496,00	441,70
2010	516,60	428,70
2011	522,70	434,40
2012	447,20	448,2
2013	371,30	319,31
2014	419,10	296,8
2015	370,00	318,34



ANNEXE 06 : Comblement des lacunes de la station de l'Arib Chélif

Année	Khemis- ANRH	Arib Chélif
1984	470,30	479,00
1985	470,60	456,90
1986	520,00	528,30
1987	311,50	297,10
1988	429,10	433,00
1989	286,60	306,00
1990	422,90	374,10
1991	477,60	487,40
1992	288,20	254,50
1993	192,10	194,40
1994	443,50	467,70
1995	590,50	602,50
1996	312,90	314,30
1997	433,40	406,50
1998	415,20	412,21
1999	244,10	229,10
2000	417,90	358,70
2001	317,00	310,68
2002	381,80	394,50
2003	378,20	307,80
2004	381,90	366,70
2005	421,40	445,20
2006	379,00	387,90
2007	443,10	416,20
2008	612,90	529,40
2009	496,00	464,60
2010	516,60	593,20
2011	522,70	503,50
2012	447,20	445,30
2013	371,30	366,82
2014	419,10	416,24
2015	370,00	365,48



ANNEXE 07 : Les valeurs des précipitations et recharge moyenne annuelle des stations pluviométriques du HC

Station	X(m)	Y(m)	Z(m)	Pmoy (mm)	Recharge (m/an)
Khemis ANRH	431848,16	4012029,25	285	411,76	23,80
Harreza brg	428376,88	4005240,25	315	359,76	20,79
Gherib brg	460267,69	4002141,5	460	456,9	26,41
El Ababsa	414166,16	4002034,5	317	352,88	20,40
Arib Chélif	412561,16	4016440,25	230	403	23,29
Marabout Blanc	4601750	3156000	368	311,06	17,98

ANNEXE 08 : Concentrations des nitrates de la plaine du HC la période (HE 2013)

N°BIRH	Xutm	Yutm	NO3
W084-8	435196,104	4006528,84	99
W084-14	435360,037	4004578,28	90
W084-39	434412,309	4011731,41	75
W084-63	424963,211	4005710,7	47
W084-73	425965,112	4012707,85	69
W084-80	421803,403	4009020,71	42
W084-91	420416,972	4013375,26	6
W084-92	420370,107	4014375,45	90
W084-129	413661,34	4011696,35	94
W084-155	428890,523	4004798,42	58
W084-166	415303,119	4009041,05	80
W084-169	414944,969	4006442,01	30
Pz3	432206,655	4009938,25	62
PZ4	425704,627	4009358,53	35
W084-182	417210,414	4011335,2	1
W084-196	420426,388	4016375,36	24

ANNEXE 09 : Concentrations des nitrates de la plaine du HC la période (BE 2013)

N°BIRH	Xutm	Yutm	NO3-
W084-8	435196,104	4006528,84	62
W084-14	435360,037	4004578,28	66
W084-63	424963,211	4005710,7	26
W084-73	425965,112	4012707,85	24
W084-80	421803,403	4009020,71	21
W084-91	420416,972	4013375,26	5
W084-92	420370,107	4014375,45	64
W084-129	413661,34	4011696,35	64
W084-155	428890,523	4004798,42	82
W084-169	414944,969	4006442,01	88
Pz3	432206,655	4009938,25	37
PZ4	425704,627	4009358,53	23
W084-182	417210,414	4011335,2	95
W084-196	420426,388	4016375,36	23

ANNEXE 10 : Profondeurs mesurées de la nappe du HC durant la période de (2013-2014-2015-2016)

N°BIRH	Xutm (m)	Yutm (m)	Pr_13	Pr_14	Pr_15	Pr_16	Pr_moy (m)
W084-8	435196,10	4006528,84	25,46	25,39	24	20,66	23,88
W084-14	435360,04	4004578,28	19,6	17,09	17	25,1	19,70
W084-39	434412,31	4011731,41	14,53		15,75	23,11	17,80
W084-63	424963,21	4005710,70	9	10,16	7,5	15	10,42
W084-73	425965,11	4012707,85	11,7	10,83	9,5	8,5	10,13
W084-80	421803,40	4009020,71	15,8	16,36		17	16,39
W084-91	420416,97	4013375,26	4,91	5,58	4,1	5,5	5,02
W084-92	420370,11	4014375,45	15,36	17,4	14,4	21,1	17,07
W084-129	413661,34	4011696,35	4,6	4,8	5,5	8,65	5,89
W084-155	428890,52	4004798,42	8,34	7,19	11	12,72	9,81
W084-166	415303,12	4009041,05	5,4	7,44		12,01	8,28
W084-169	414944,97	4006442,01	1,26	1,85	11,3	16	7,60
W084-185	429954,42	4009245,26			5,6	13,01	9,31
Pz3	432206,66	4009938,25	7,94	28,7	27	50	28,41
PZ4	425704,63	4009358,53	30,04	22,84	21	50	30,97
W085-6	444602,09	4008399,59	12,8		13,8	19,5	15,37
PZ1	441499,28	4007509,23	36,14	36	37,5	50	39,91
W084-182	417210,41	4011335,20	19,66	14,79	20	8,21	15,67
W084-196	420426,39	4016375,36	7,12	8,41	9,7	19,1	11,08