

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
تعماجي للابلاج تماعنوب
Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana
Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre
Département de **Sciences de la Terre**



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention de diplôme de **Master** en

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie appliquée

Spécialité : Hydrogéologie

***Les approches hydrogéochimiques comme base
pour l'établissement des zones de protection des
eaux souterraines de la plaine de Khemis Miliana***

Présenté par:

- BOUDERBALA Azouz
- CHELGHOUM Fatma Rania

Devant le jury :

M. Sadeuk Ben Abbas A	MCB	Président	(U.D.B Khemis Miliana)
M. Gharbi B	MCB	Promoteur	(U.D.B Khemis Miliana)
M. Bensaada M	MCB	Examineur	(U.D.B Khemis Miliana)

Année universitaire : 2020/2021

Dédicace

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie,

Que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et

Magnifiques parents : ma vie mon père YAHIA et ma mère NACIRA

Qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse

Arriver a ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie aussi ce travail à :

- ❖ mes copinées : Sara, khansa ; Iman, Khaira et Houria
- ❖ Mes frères « Houssam El Din, Aziz »
- ❖ Mes chères sœurs « Bahia, Chourouk et salima »
- ❖ Ma petite princesse BATOL et ma prince YAHIA
- ❖ A ma tante Hafida et mon oncle Hakim

Je ne peux pas oublier de remercier mon binôme Bouderbala Azouz

Ainsi que à toute la promotion hydrogéologie de l'année 2020_2021

FATMA RANIA

Sommaire

Introduction Générale :	1
Chapitre 1 : Aperçu Bibliographique	2
Introduction	2
Notions théoriques.....	2
1.1 Définition de la qualité des eaux souterraines.....	2
1.2 L'indice de qualité de l'eau.....	2
1.3 Analyse spatiale de la qualité des eaux souterraines.....	3
1.4 Estimation et cartographie de l'indice de qualité de l'eau souterraine	3
2 Définition	4
2.1 Périmètre de protection.....	4
2.2 Protection des nappes.....	7
2.3 La vulnérabilité	7
2.3.1 La vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution	8
2.3.2 Définitions de la vulnérabilité	9
2.3.3 Notion de vulnérabilité	9
2.3.4 Types de vulnérabilité	10
2.3.4.1 Vulnérabilité intrinsèque.....	10
2.3.4.2 Vulnérabilité spécifique.....	10
2.4 Les méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des eaux souterraines	12
2.5 Pollution des eaux souterraines	13
2.5.1 Types de pollution.....	16
2.5.1.1 Pollution ponctuelle et diffuse	16
2.5.1.2 Pollution temporaire et chronique.....	16
2.5.1.3 Pollution linéaire :	17
2.5.2 Principaux polluants des eaux.....	17
2.5.3 Pollution direct ou indirecte	18
2.5.4 Nature de la pollution	18
2.5.5 Caractérisation de la pollution.....	18
2.5.6 Origines de la pollution des eaux souterraines.....	19
2.5.6.1 En fonction de l'origine de la pollution	19
2.5.6.2 En fonction de la nature des polluants.....	21
a. Polluants physiques.....	21
b. Polluants chimiques :.....	21

c. Les polluants organiques :	22
2.5.6.3 Selon la répartition géographique :	24
2.5.6.4 Selon la répartition dans le temps :	24
2.5.7 Pollution des eaux souterraines par les nitrates :	24
2.5.8 Caractères des polluants :	24
2.5.8.1 Solubilité aqueuse :	25
2.5.8.2 Tension de vapeur :	25
2.5.8.3 Adsorption	25
2.5.8.4 Biodégradabilité :	27
2.6 Mécanismes de transport et d'atténuation du polluant en milieu souterrain	28
2.6.1 Mécanismes de transport et d'accumulation	28
a. Dans une nappe libre	28
2.6.2 Les mécanismes d'atténuation	30
2.6.2.1 Les processus physiques	31
2.6.2.2 Les processus chimiques et biochimiques	31
2.6.3 Rôle du sol	32
2.6.4 Rôle du couvert végétal	33
2.6.5 Rôle protecteur des berges des cours d'eau	33
2.6.6 Autoépuration biologique des eaux souterraines	33
Chapitre 2 : Représentation de la Région d'Etude	35
Introduction	35
1 Présentation Générale De La Zone D'étude	36
1.1 Situation Géographique	36
1.1.1 Contexte géomorphologique	37
1.1.2 Contexte Réseau hydrographique	38
1.1.3 Contexte géologique	39
1.1.4 Contexte hydrogéologique	41
1.2 Les formations aquifères	43
1.2.1 Etude Piézométrique	43
1.2.1.1 Interprétation de la carte piézométrique	45
1.2.1.2 Hydro-climatologie	46
1.2.2 Précipitations moyennes annuelles	50
1.2.3 Litho-stratigraphie	52
✓Crétacé :	53
✓Miocène	53
✓Mio-Pliocène	54

✓Quaternaire ancien	54
✓Quaternaire récent.....	54
Chapitre 3 : Matériels et Méthodes	56
Introduction Générale	56
1 Présentation de la méthode SINTACS.....	56
1.1 Cote attribuée à chaque paramètre de la méthode SINTACS.....	59
1.1.1 Système de cotation.....	60
1.1.2 Interprétation de l'indice SINTACS.....	60
1.1.3 Cartographies des paramètres du modèle SINTACS dans la plaine alluviale de Khemis Miliana	61
1.1.3.1 Profondeur des eaux souterraines (S).....	62
1.1.3.2 Recharge efficace de l'aquifère (I).....	63
1.1.3.3 Effet l'autoépuration de la zone vadose (N)	64
1.1.3.4 Type de sol (T)	64
1.1.3.5 Caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère (A).....	65
1.1.3.6 Conductivité hydraulique (C).....	65
1.1.3.7 Pente (S)	65
1.2 Cartographie de l'Indice de la Qualité des eaux souterraines (GWQI)	66
Chapitre 4 : Résultats et discussions	67
1 Etablissement de carte de la vulnérabilité selon le modèle SINTACS	68
2 Paramètre de SINTACS.....	68
2.1 Paramètre de Profondeur « S ».....	68
2.2 Paramètre Recharge efficace de l'aquifère « I »	70
2.3 Paramètre de zone non saturée « N »	71
2.4 Paramètre de texture de sol « T».....	73
2.5 Paramètre de type d'aquifère « A »	75
2.6 Paramètre de la conductivité « C »	77
2.7 Paramètre de pente « S ».....	79
3 L'indice de la qualité de l'eau souterraine :.....	81
4 Degré de priorité de protection selon L'indice de Vulnérabilité selon le modèle SINTACS	85
Conclusion générale	87
Références Bibliographiques	88

REMERCIEMENTS

Toute d'abord nous remercions Dieu le tout puissant qui nous donne
La santé, la volonté d'étudier et pour m'avoir permis de réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur Gharbi Benyoucef, qui
Et tant que directeur de mémoire, se sont toujours montré à l'écoute et
Toujours disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire,
Ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu
Nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous tiendrons également à remercier les membres du jury qui nous
Feraient l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Et n'oubliez pas de remercier l'ensemble des enseignants
De la faculté de la science de la terre.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont encouragé
Ou aidé au long de mes études, surtout ma famille.

En fin, nous sommes heureux de remercier sincèrement
Tous ceux que nous avons connus et qui nous ont aidés dans notre cheminement.

LISTE DES FIGURES :

Figure 1: Schéma Représentatif des Périmètres de Protéction.....	5
Figure 2: Périmètre de Protection Immédiate.....	5
Figure 3: Périmètre de Protection Rapprochée.....	6
Figure 4: Périmètre de Protection Eloignée.	6
Figure 5: Pollution Ponctuelle et Diffuse des Eaux Souterraines (Atteia, 2005).....	16
Figure 6: Schematisation de la Pollution Agricole.....	21
Figure 7: A- Transfert des Polluants dans L'aquifère (Aller Et Al, 1978).B- Origine, Transport, Et Evolution des Polluants, de la Surface du Sol aux Ecoulement (Castany, 1975).....	29
Figure 8: Pollution par un Produit Soluble N'atteignant pas la Nappe.....	29
Figure 9: Pollution par un Produit Plus Léger que L'eau et qui Atteint la Nappe.....	30
Figure 10 : Pollution de la Nappe par un Produit plus Lourd que L'eau.	30
Figure 11: Carte de Localisation de la Zone D'étude	36
Figure 12: Carte de la Situation Geographique de la Zone D'étude (Plaine De Khemis Miliana). ...	37
Figure 13: Reseau Hydrographique sur le Fond Satellitaire.	38
Figure 14: Carte Geologique de la Plaine de Haut Cheliff. (Perrodon (1957) ; Modifie.....	41
Figure 15: Reseau Hydrographique sur le Fond Satellitaire	42
Figure 16: Coupe Geologique A-A' de la Plaine du Haut Cheliff. (Perrodon, 1957). Modifie.	42
Figure 17: Carte Piezometrique de la Nappe Alluviale du Haut-Cheliff.	44
Figure 18: Carte Piezometrique de la Nappe Alluviale du Haut-Cheliff.	45
Figure 19: Repartition Mensuelle des Precipitations (1980-2014) (1).....	46
Figure 20: Repartition Mensuelle des Precipitations (1980-2014) (2).....	47
Figure 21: Variation Spatio-Temporelle des Temperatures Moyennes Annuelles (1980-2014).	48
Figure 22: Histogrammes de Variations des Temperature Moyennes Mensuelles (1986-2014).	49
Figure 23: Diagramme Ombrothermique de Gaussien, Station de Khemis (1986-2014).	50
Figure 24: Variation Temporelle des Precipitations Moyennes Annuelles.....	51
Figure 25: Log Litho-Stratigraphique et Hydrogeologique de la Plaine Alluviale de Khemis Miliana (Mattauer 1958, Perrodon 1967).....	55
Figure 26: Répartition Spatiale des Points D'échantillonnage des Précipitations Déstines pour L'analyse des Chlorures dans la Zone D'étude	62
Figure 27: Répartition Spatiale des Profondeurs D'eaux Souterraines de la Région D'étude	69
Figure 28: Répartition Spatiale des Profondeurs D'eaux Souterraines Assignées a Leurs Rates et Poids.	69

Figure 29: Répartition Spatiale de la Recharge Efficace de L'aquifère de la Région D'étude.....	70
Figure 30: Répartition Spatiale de la Recharge Efficace de L'aquifère Assignées a Leurs Scores et Poids.	71
Figure 31: Répartition Spatiale des Zones Non Saturées De La Région D'etude.....	72
Figure 32: Répartition Spatiale des Zones Non Saturees Assignées a Leurs Scores Et Poids.....	73
Figure 33: Répartition Spatiale des Types du Sol de la Plaine Alluviale de Khemis Miliana.	74
Figure 34: Répartition Spatiale des Types du Sol Assigne a Leurs Rates et Poids de la Plaine Alluviale de Khemis Miliana.....	74
Figure 35: Répartition des Formations Hydrogeologiques de la Région D'étude.....	76
Figure 36: Répartition des Formations Hydrogeologiques Assignées A Leurs Rates et Poids.	76
Figure 37: Répartition Spatiale de la Conductivite Hydraulique dans la Zone D'étude.	78
Figure 38: Répartition Spatiale de la Conductivite Hydraulique Assignée A Leurs Rates Et Poids.	78
Figure 39: Répartition Spatiale des Pentés de La Plaine Alluviale de la Région D'étude.	80
Figure 40: Répartition Spatiale des Pentés de La Plaine Alluviale Assignées A Leurs Rates et Poids.	80
Figure 41: Carte Finale de la Vulnérabilité Selon le Modele-SINTACS.....	81
Figure 42: Carte de L'indice de Qualité des Eaux Souterraines.	82
Figure 43: Carte de Normalisation de L'IQES De La Plaine Alluviale de Khemis Miliana.....	83
Figure 44: Carte de L'IQES de la Plaine Alluviale de Khemis Miliana Classe. (Legende Illisible)	ERREUR !
Figure 45: Carte de Priorité de Protection Selon L'IQES de la Plaine Alluviale de Khemis Miliana.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
Figure 46: Carte du Degré Priorité De Protéction Selon la Vulnérabilité des Eaux Souterraines de la Plaine Alluviale de Khemis Miliana.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
Figure 47: Carte du Degré Classe du Priorité de Protéction Selon la Vulnérabilité des Eaux Souterraines de la Plaine Alluviale de Khemis Miliana.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

LISTE DES TABLEAUX

Introduction Générale :	1
Chapitre 1 : Aperçu Bibliographique	2
Introduction	2
Tableau 1: Indice de Qualité de L'eau Classe par Palette de Couleur Standard D'après	3
Tableau 2: Différents Méthodes D'évaluation de la Vulnérabilité.	13
Tableau 3: Exigences de Qualité des Eaux Destinées à la Consommation Humaine Fixées par la Communauté Européenne (Lallemand, 1989).....	15
Tableau 4: Influence Du Coefficient de Partage Kow Sur Le Comportement du Polluant Vis à Vis des Phases Aqueuses et Solide (Ballerrini Et Al. 1998).....	26
Tableau 5: Caractéristiques Physico-Chimiques de Quelques Polluants Organiques.	27
Chapitre 2 : Représentation de la Région D'étude	35
Introduction	35
Tableau 6: Paramètres Physiographiques de Bassin Versant (Bong.I ; Meziani.S, 2013).....	38
Tableau 7: Réseau Hydrographique (Bong.I ; Meziani.S, 2013).....	39
Tableau 8: Caractéristiques des Stations Pluviométriques, d'après A.N.R.H Période (1981-2013).....	50
Chapitre 3 : Matériels et Méthodes	56
Introduction Générale	56
Tableau 9: Poids Attribués Aux Paramètres Sintacs Dans Les Différents Scénarios Des Méthodes. (Mohamed.H.H Et Al ,2008).....	58
Tableau 10: Critères D'évaluation de la Vulnérabilité pour la Méthode SINTACS (Daniela Ducci, 2010).....	61
Chapitre 4 : Résultats et Discussions	67
Tableau 11: Classification Spécifiques (Cotes, Poids) Pour Le Paramètre « N ».....	72
Tableau 12: Classification Spécifiques (Cotes, Poids) Pour Le Paramètre « A ».....	75
Tableau 13: Classification Spécifiques (Cotes, Poids) Pour Le Paramètre « C ».....	77
Tableau 14: Classification Spécifiques (Cotes, Poids Et Superficie) Pour Le Paramètre « S ».	79
Conclusion Générale	87
Références Bibliographiques	88

Abstract

The present study aims to delimit groundwater protection perimeters zoning around the Khemis Miliana alluvial plain in order to reduce the risks of pollution of this water resource. The methodological approach consisted first all in assessing the vulnerability of the resource and evaluate groundwater quality index GWQI and then in determining the protection perimeters based on the vulnerability map and groundwater quality index map. The priority protection zoning map reveals three classes (low protection, medium and high) with a dominance of the midium class 24%,49% of the area. Three protection perimeters were delineated (immediate, close and remote). The results of the analysis of the protection priority map also indicate that: the northern part of the plain has good water quality and therefore does not need protection against pollution, As for the southern part which occupies most of the plain, it requires moderate protection. These delimited protection perimeters can serve as a guide for the management and protection of the water intake in Khemis Miliana plain as well as for land use planning in this area.

Résumé :

La présente étude vise à délimiter par zonation des périmètres de protection des eaux souterraines autour de la plaine alluviale de Khemis Miliana afin de réduire les risques de pollution de cette ressource en eau. L'approche méthodologique a consisté tout d'abord à évaluer la vulnérabilité de la ressource et l'indice de qualité des eaux souterraines GWQI puis à déterminer les périmètres de protection à partir de la carte de vulnérabilité et de la carte de l'indice de qualité des eaux souterraines. La carte de zonage de protection prioritaire fait apparaître trois classes (protection faible, moyenne et élevée) avec une dominance de la classe moyenne 24 %, 49 % de la superficie. Trois périmètres de protection ont été délimités (immédiat, proche et distant). Les résultats de l'analyse de la carte des priorités de protection indiquent également que : la partie nord de la plaine a une bonne qualité d'eau et n'a donc pas besoin de protection contre la pollution, quant à la partie sud qui occupe la majeure partie de la plaine, elle nécessite une protection modérée. Ces périmètres de protection délimités peuvent servir de guide pour la gestion et la protection de la prise d'eau dans la plaine de Khemis Miliana ainsi que pour l'aménagement du territoire dans cette zone.

ملخص

تهدف الدراسة الحالية إلى تحديد محيط حماية المياه الجوفية حول السهل الغريني بخميس مليانة من أجل تقليل مخاطر تلوث ثم GWQI هذا المورد المائي. يتكون النهج المنهجي أولاً في تقييم قابلية تأثر المورد وتقييم مؤشر جودة المياه الجوفية تحديد محيط الحماية بناءً على خريطة الضعف وخريطة مؤشر جودة المياه الجوفية. تكشف خريطة تقسيم مناطق الحماية ذات الأولوية عن ثلاث فئات (حماية منخفضة، متوسطة وعالية) مع هيمنة فئة ميديوم 24٪، 49٪ من المنطقة. تم تحديد ثلاثة محيط حماية (فوري، قريب، بعيد). كما تشير نتائج تحليل خريطة أولوية الحماية إلى أن: الجزء الشمالي من السهل يتمتع بنوعية مياه جيدة وبالتالي لا يحتاج إلى حماية من التلوث، أما الجزء الجنوبي الذي يحتل معظم السهل فهو يتطلب حماية معتدلة. يمكن استخدام محيط الحماية المحدد كدليل إرشادي لإدارة وحماية مدخول المياه في سهل خميس مليانة وكذلك لتخطيط استخدام الأراضي في هذه المنطقة

Liste des Abréviations

ANRH : Agence Nationale des **R**essources **H**ydrique.

DEM : **D**igital **E**lévation **M**odel.

C.M.B : Chloride **M**ass **B**alance.

O.M.S : **O**rganisation **M**ondiale de la **S**anté

SIG : **S**ystème **I**nformatique **G**éographique.

Introduction générale

Introduction Générale :

Les eaux souterraines sont une source importante d'approvisionnement en eau dans le monde entier. Il se produit presque partout sous la surface de la Terre, dans de multiples systèmes aquifères locaux et dans des compartiments présentant des caractères similaires. Les eaux souterraines sont une ressource limitée et constituent un avantage rare dans de nombreuses régions du monde. Les eaux souterraines dans les régions arides et semi-arides jouent un rôle important en tant qu'eau douce ; c'est la source principale pour différents usages tels que domestiques, agricoles et industriels. Il faut donc accorder une plus grande attention à la qualité des eaux souterraines dans ces zones. On estime qu'environ un tiers de la population mondiale consomme de l'eau souterraine (Nickson et al., 2005). La qualité de l'eau souterraine est influencée par diverses activités naturelles et anthropiques telles que le climat local, les facteurs géologiques et les pratiques agricoles. Une fois que les eaux souterraines sont contaminées, il est impossible de rétablir leur qualité en arrêtant les polluants à la source. Les caractéristiques chimiques des eaux souterraines jouent un rôle important dans l'évaluation de la qualité de l'eau. Les études géochimiques des eaux souterraines permettent de mieux comprendre les possibles changements de qualité (Alexakis2011 ; Ramesh et Elango 2012).

Les ressources en eaux souterraines du nord de l'Algérie sont surexploitées jusqu'à plus de 80%. Il est à noter que les précipitations dans le nord de l'Algérie ont diminué de près de 20% au cours des trois dernières décennies, par rapport à cinq décennies plus tôt. Environ 70% des eaux potables et d'irrigation de la zone d'étude proviennent des ressources en eaux souterraines. Cependant, cette ressource en eau est confrontée à des problèmes, notamment en termes de qualité, essentiellement dus à l'exposition à la pollution résultant de l'utilisation intensive d'engrais en agriculture et à des rejets urbains non contrôlés. Cela rend les eaux souterraines impropres à la consommation humaine. Bouderbala, A. (2017). "Assessment of water quality index for the groundwater in the upper Cheliff plain, Algeria." Journal of the Geological Society of India 90(3): 347-356.

Chapitre 1 :
Aperçu
Bibliographique

Introduction

Les eaux souterraines, et plus particulièrement les nappes phréatiques, sont continuellement exposées à la contamination et à la pollution. Le présent chapitre propose une synthèse bibliographique sur les différentes origines de la pollution des nappes, des mécanismes de transfert de polluants, notamment des nitrates, et les moyens de protection des nappes et des ouvrages de captage.

1 Notions théoriques

1.1 Définition de la qualité des eaux souterraines

L'eau souterraine généralement est de meilleure qualité que l'eau de surface, à raison épurateur du sol. Et présente ainsi une grande source d'approvisionnement en eau potable. D'ailleurs, la qualité de l'eau souterraine est souvent évaluée en fonction de sa conformité et recommandations de la qualité d'eau potable. Ces normes et recommandations déterminent dans quelle mesure une eau est propre à la consommation humaine. Des facteurs naturels ou humains viennent néanmoins affecter sa qualité par endroits, voire compromettre son usage (Abbasi, S.A, Arya, D.S ; 2000). Les études réalisées sur les eaux souterraines permettent notamment de localiser les sources de contamination et de mieux évaluer la vulnérabilité des aquifères. Certains portraits de la qualité de l'eau souterraine sont réalisés à une échelle régionale et caractérisent principalement la présence d'éléments chimiques d'origine naturelle associés aux formations géologiques. D'autres portraits ciblent des secteurs plus restreints et des paramètres particuliers, dont les pesticides et les microorganismes.

1.2 L'indice de qualité de l'eau

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est défini comme une technique d'évaluation fournissant l'influence composite d'un paramètre de qualité de l'eau sur la qualité globale de l'eau. Il est calculé du point de vue de la consommation humaine. La qualité de l'eau et son aptitude à la consommation peuvent être examinées en déterminant son indice de qualité. Les normes comme recommandé par l'OMS (2004) ont été pris en compte pour le calcul de l'IQE. Dans cette méthode, la pondération pour divers paramètres de qualité de l'eau est supposée être inversement

proportionnelle aux normes recommandées pour les paramètres correspondants (Mishra et Patel 2001 ; Naik et Purohit 2001).(Ketata, Gueddari et al. 2012, Sadat-Noori, Ebrahimi et al. 2014).

Tableau 1: Indice de qualité de l'eau classé par palette de couleur standard d'après

Indice de qualité	Définition de la classe de qualité
<50	Eau de très bonne qualité
50 – 100	Eau de bonne qualité
100 – 200	Eau de qualité moyenne
200 – 300	Eau de qualité médiocre
> 300	Eau de mauvaise qualité

1.3 Analyse spatiale de la qualité des eaux souterraines

Il est important de comprendre la qualité de l'eau souterraine, car il s'agit du principal facteur déterminant son aptitude à la consommation (Subramani et al. 2005;Kumar et al. 2007). Les paramètres physiques et chimiques, y compris les mesures statistiques, telles que minimum, maximum, moyenne et écart type, sont reportés dans le tableau 2. Les paramètres de qualité de l'eau suivants ont été sélectionnés et leurs cartes respectives ont été préparées.(Ketata, Gueddari et al. 2012).

1.4 Estimation et cartographie de l'indice de qualité de l'eau souterraine

Calculer l'IQE, trois étapes ont été suivies (Horton 1965 ; Pradhan et al. 2001 ; Dwivedi et Pathak 2007 ; Asadietal. 2007 ; Vasanthavigar et al. 2010 ; Saeedietal. 2010 ; Yidana et Yidana 2010). Lors de la première étape, un poids (w_i) a été attribué à chacun des dix paramètres (pH, TDS, Cl, SO₄, HCO₃, NO₃, Ca, Mg, Na et K) en fonction de leurs effets perçus sur la santé primaire (Tableau 1). 3) Le poids maximal de 5 a été attribué à des paramètres tels que les solides dissous totaux, les chlorures, les sulfates et les nitrates en raison de leur importance majeure dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Srinivasamoorthy et al. 2008). Le bicarbonate reçoit le poids minimum de 1 car il joue un rôle négligeable dans l'évaluation de la qualité de l'eau. D'autres paramètres tels que le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium ont reçu un poids compris entre 1 et 5, en fonction de leur importance dans la qualité globale de l'eau destinée à la consommation.(Ketata, Gueddari et al. 2012).

2 Définition

2.1 Périmètre de protection

Un périmètre de protection est un espace délimité physiquement (clôture, cercle de pierre ...) afin de sauvegarder et protégé l'accès à une espace qui présente un intérêt esthétique ou patrimonial, ou bien une dangerosité certaine. Constituent la mesure de protection des eaux la plus efficace en matière d'organisation du territoire. Elles doivent être définies autour de tout captage d'intérêt public.

Les périmètres de protection sont des zones délimitées au voisinage des captages d'eau souterraine à l'intérieur desquelles peuvent être interdites ou réglementées toutes activités de nature à nuire directement ou indirectement à la qualité de l'eau.

Les périmètres de protection des champs de captage des eaux souterraines sont définies comme autant un outil idéale pour aviser et réduire toute cause de pollution susceptible de nuire à la qualité des eaux destinées à l'alimentation en eau potable. La mise en place des périmètres de protection des captages d'eau destinée à la consommation et la surveillance des prescription associés, améliore la sécurité sanitaire en réduisant le risque de pollutions microbienne ou toxique massive et brutale en contrôlant les activités susceptibles de générer des pollutions accidentelles pouvant avoir un impact sur la qualité des eaux.

En Algérie, les périmètres de protection sont entraînés par l'arrêté n°239 du 27 avril 1988 établi par l'assemblée législative du Ministère de l'Hydraulique et le décret n°07-399 du 23.12.2007 relatif aux périmètres de protection qualitatifs des ressources en eau (Journal officiel N°80 du 26.12.2007).

La réglementation prévoit 3 périmètres de protection :

- Le périmètre de protection immédiate qui a pour but d'empêcher l'introduction directe de substances polluantes dans l'eau. Son étendue est constituée par les terrains d'emprise des ouvrages et installations de mobilisation, de traitement et de stockage d'eau ;
- Le périmètre de protection rapprochée qui a pour but d'empêcher la dégradation de la qualité de l'eau par migration souterraine ou superficielle de substances dangereuses, toxiques ou indésirables à partir des lieux démission des pollutions. Son étendue est déterminée notamment sur la base du temps de migration entre le lieu d'émission de la pollution et le point de prélèvement de la ressource en eau ; celle-ci correspond, pour les eaux souterraines, à la zone d'appel du captage ;

- Le périmètre de protection éloignée qui a pour but de prolonger le périmètre de protection rapprochée pour renforcer la protection contre les risques de pollutions chroniques, diffuses ou accidentelles. Son étendue correspond à la surface comprise entre la limite du périmètre de protection rapprochée et la limite du bassin d'alimentation pour les nappes d'eau souterraine.

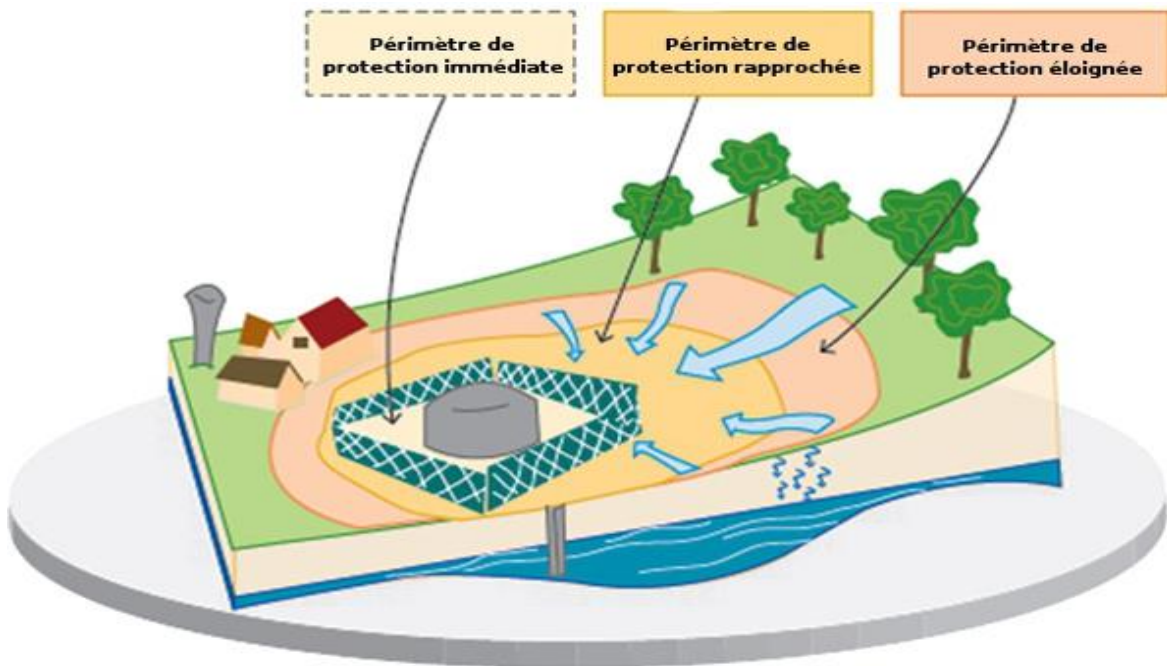


Figure 1: Schéma représentatif des périmètres de protection.

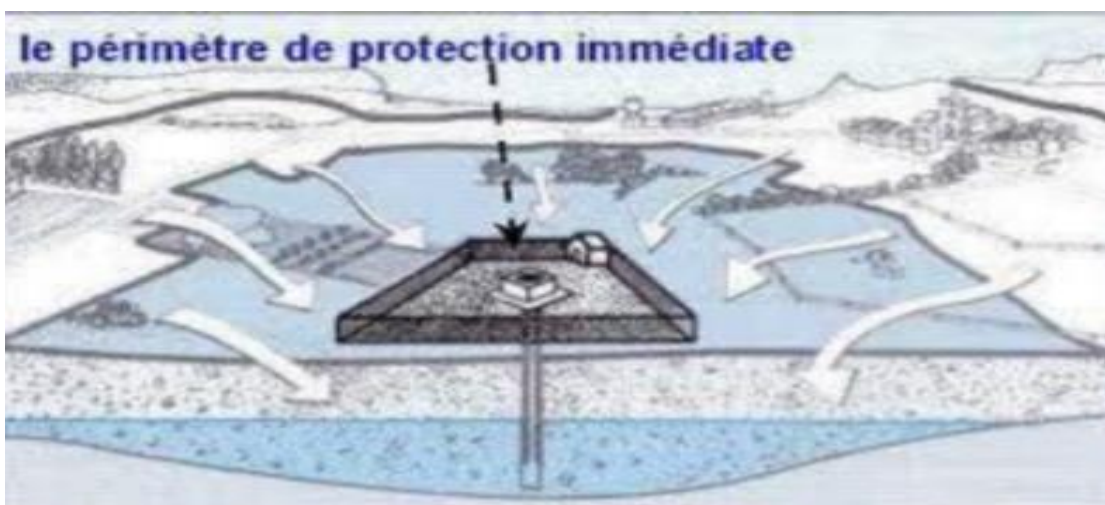


Figure 2: périmètre de protection immédiate.

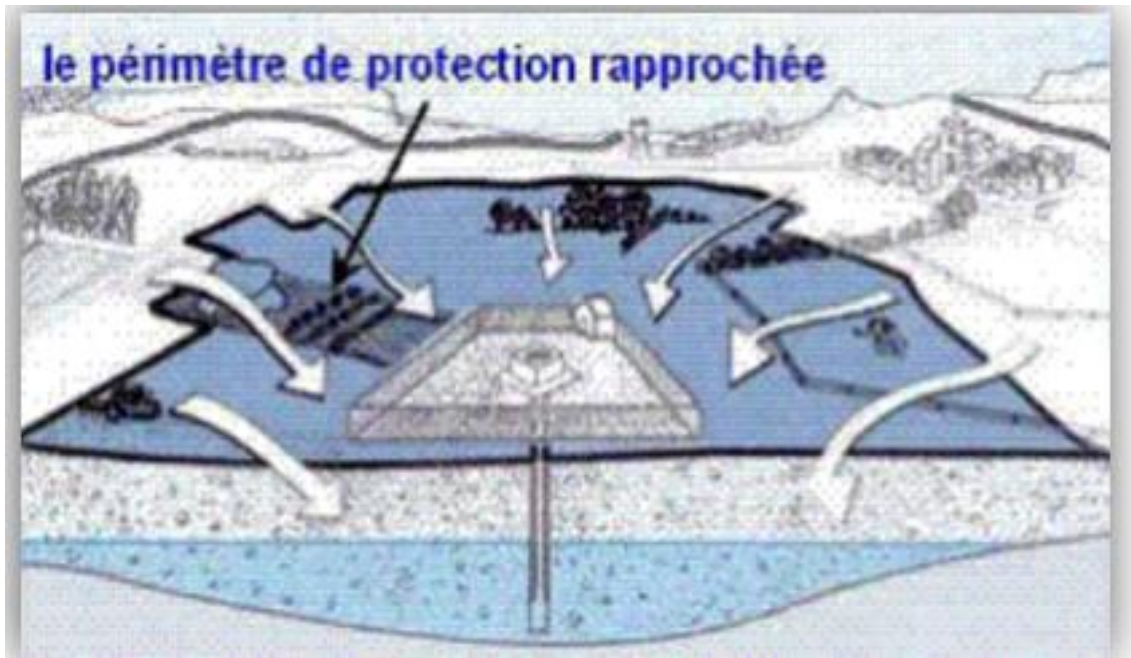


Figure 3: périmètre de protection rapprochée.

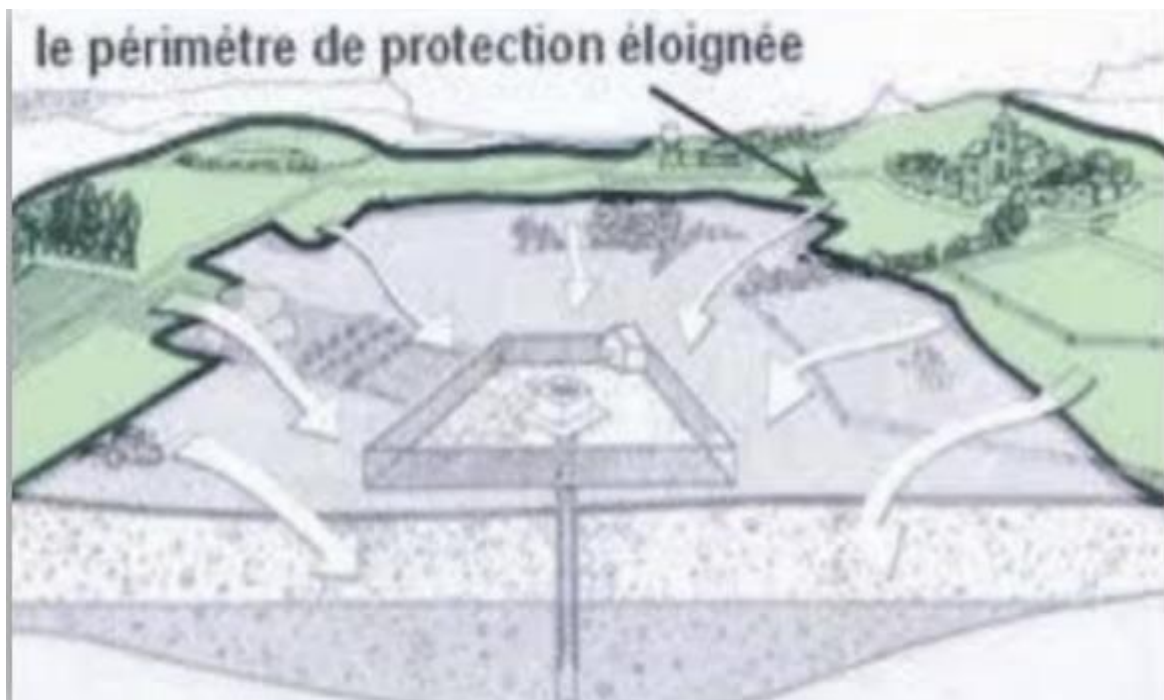


Figure 4: Périmètre de protection éloignée.

2.2 Protection des nappes

La protection des nappes d'eau souterraine se fera par l'établissement des cartes de vulnérabilité à la pollution et des cartes des risques de pollution. La vulnérabilité à la pollution des nappes d'eaux souterraines est une notion complexe en raison du nombre de facteurs qu'elle fait intervenir et de l'importance qui peut être attribuée à chacun d'eux. En d'autres termes, la vulnérabilité est fonction des caractéristiques du milieu aquifère en l'occurrence de la couverture du sol et de la zone non saturée qui contrôlent la propagation d'une pollution vers la nappe.

Par ailleurs, il est difficile de dissocier les notions de vulnérabilité et de risque de pollution. La vulnérabilité est un élément de l'évaluation de la sensibilité d'une nappe à la pollution. Une carte de vulnérabilité superposée à une carte d'inventaire des sources de pollution, nous donnera un aperçu sur les sites susceptibles aux risques de pollution des eaux souterraines. La notion de risque de pollution intègre donc la vulnérabilité de la nappe et les sources de pollution.

Vulnérabilité				
	+		=	Risque de pollution
Sources de Pollution				

L'objectif de l'hydrogéologie est donc de fournir aux gestionnaires des ressources hydriques et aux aménageurs du territoire, un document cartographique facilement utilisable permettant de localiser les zones où la nappe présente un degré de vulnérabilité élevé. Ces zones nécessiteront alors une protection particulière dans les futures plans d'aménagement du territoire en vue de limiter tous les risques éventuels qui peuvent contaminer la nappe et donc dégrader la qualité des eaux souterraines.

2.3 La vulnérabilité

La vulnérabilité d'une nappe à la pollution est une notion relative, non mesurable et sans dimension. La précision de son évaluation dépend essentiellement de la nature, de la quantité et de la fiabilité des données utilisées. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres plus ou moins important, relatifs notamment à la couverture de la nappe (sol et zone non saturée) et à la zone saturée proprement dit.

La vulnérabilité globale d'un aquifère est la synthèse de deux types de vulnérabilité verticale et horizontale. L'application de cette méthodologie dite SINTACS-Model ne peut être possible sans l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG), en raison de la masse

très importante des données nécessaires, notamment dans le cas d'une nappe d'extension régionale. Cette méthodologie a été appliquée à la nappe de la plaine de Khemis Miliana, qui s'étend sur une superficie de 359 km² et dont ses eaux souterraines sont moyennement polluées par nitrates et de concentration très élevées en chlorures et en abondance. Cette nappe joue un rôle capital pour le développement socioéconomique de la région de Khemis Miliana et ses alentours, considérés comme un pôle à vocation agricole par excellence.

L'objectif visé par les études de vulnérabilité est l'élaboration d'une carte de vulnérabilité et de développer une approche de caractérisation des aquifères en fournissant des données de base nécessaires à une gestion durable des ressources en eaux souterraines et à la mise en place de plans adéquats de gestion du territoire. De ce fait, la cartographie de vulnérabilité des eaux souterraines est considérée comme un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement du territoire. En effet, la cartographie permettant d'identifier la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination correspond à un type de carte

2.3.1 La vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Elle étudie les possibilités de propagation du polluant dans le sol. La vulnérabilité liée au risque de pollution est déterminée par la facilité de pénétration des substances polluantes s'infiltrant à partir de la surface du sol vers la nappe (Robins et al. 1989 ; Indjoudar 2003).

Dans le domaine de la qualité des eaux souterraines, la vulnérabilité d'une nappe peut être définie, dans un sens large, comme sa plus ou moins grande capacité de défense face à un processus de contamination. Plus généralement, le concept de vulnérabilité utilisé dans le cadre de la protection des eaux souterraines repose sur la manière de décrire la sensibilité des eaux souterraines à toute forme de stress, on peut donc parler de vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination.

Le concept de vulnérabilité de l'eau souterraine est généralement défini comme la capacité d'un système hydrogéologique à transmettre un contaminant potentiel depuis la surface du sol jusqu'à atteindre la zone saturée. Véhiculé depuis l'eau des précipitations qui s'infiltrer à la surface du sol, le contaminant percole ainsi à travers la zone non saturée (vadose) jusqu'à atteindre la zone saturée. Certains auteurs l'ont défini comme une propriété intrinsèque des aquifères ; d'autres estiment que la vulnérabilité est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent aux activités humaines et la qualité agro-pédologique des terres de surface. La vulnérabilité d'une nappe traduit la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution provenant de la surface de sol. Selon une approche déterministe : Source-Transfert-Récepteur, la vulnérabilité correspondrait au module transfert en représentant le transport d'un contaminant depuis la source jusqu'à milieu récepteur. Le module Source représente la

répartition spatiale de la charge de contaminant à la surface du sol et le module Récepteur est l'eau souterraine.

2.3.2 Définitions de la vulnérabilité

Le terme de « vulnérabilité » a été introduit en hydrogéologie par Margat dans les années 60.

Toutefois, son concept reste difficilement quantifiable de manière absolue et il n'existe pas de définition unique et adoptée par tous. Nous ne proposerons ici que les définitions les plus pertinentes de la littérature autour de ce sujet.

Olmer et Rezac (1974) suggèrent que la vulnérabilité des eaux souterraines est « le degré de dangerosité déterminé par les conditions naturelles et indépendantes des sources de pollution actuelles ». Leur point de vue est que la vulnérabilité dépend dans la zone non saturée de la perméabilité verticale et, dans l'aquifère, du gradient hydraulique et de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine.

Zaporozec et Vrba (1994) suggèrent que le concept de vulnérabilité des eaux souterraines est basé sur le postulat que l'environnement offre une protection naturelle pour les eaux souterraines, plus particulièrement par apport aux contaminations liées à l'activité humaine. Schnebelen et al (2002) définissent que le concept de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine. La vulnérabilité est représentée par la capacité donnée à l'eau située en surface de rejoindre le milieu souterrain saturé en eau.

Amharref et Bernoussi (2007) relient la vulnérabilité à la propriété spécifique du contaminant. Cependant d'autres l'associent aux activités humaines et la qualité agro pédologique des terrains de surface.

En d'autres termes, la vulnérabilité des eaux souterraines, sous - entendue à une contamination, a la sens contraire de « protection naturelle des eaux souterraines contre tout type de contamination».

2.3.3 Notion de vulnérabilité

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique, en relation avec la nappe d'eau souterraine, procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions, selon les caractéristiques. Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité : **la vulnérabilité intrinsèque** et **la vulnérabilité spécifique** (Schenbelen et al, 2002) in Hamza (2007), le premier terme est utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui

détermine la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les actions humaines. Le deuxième est celui utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant ou à un groupe de polluants. La vulnérabilité spécifique prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque (Hamza et al, 2007).

2.3.4 Types de vulnérabilité

On distingue deux types de vulnérabilité : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique.

2.3.4.1 Vulnérabilité intrinsèque

Elle est définie comme l'aptitude d'un aquifère à absorber ou à diffuser un polluant transporté par l'eau (Civita, 1990).

Selon Aubrey (1992), c'est la facilité que produit un terrain à la pénétration jusqu'à la nappe d'eau souterraine d'une contamination provenant de la surface du sol.

Quant à Vrba et Zaporozec (1994), ils définissent la vulnérabilité intrinsèque c'est une propriété intrinsèque des systèmes aquifères qui dépend de la sensibilité qu'ont ces systèmes, aux impacts humains et naturels.

2.3.4.2 Vulnérabilité spécifique

Pour Schnebelen et al. (2002), 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.

La distinction des deux types de vulnérabilité est obligatoire car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis.

2.3.4.2.1 Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité d'une nappe dépend de multiples facteurs intervenant soit sur la nature et/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 saturée et de la zone non saturée qui contrôlent le comportement des polluants. Un certain nombre de critères sont disponibles, ils sont associés aux ensembles souterrains (le sol, la zone saturée, la zone non saturée).

2.3.4.2.2 Critères relatifs au sol :

- **Ruissellement – infiltration** : Le ruissellement et l'infiltration efficace sont représentatifs de la recharge de la nappe. Ils sont étroitement liés à la topographie et à la nature des formations superficielles (Cazaux, 2007).
- Couverture pédologique : La nature, la texture, la teneur en argiles et en matière organique, ainsi que la puissance (ou épaisseur).

2.3.4.2.3 Critères relatifs à la zone non saturée

- Profondeur de la nappe libre : L'épaisseur de la zone non saturée conditionne le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe (rétention, stockage, interactions physicochimiques avec l'encaissant) et dans son éventuelle dégradation en cours de transfert (Cazaux, 2007).
- Amplitude de battement de nappe : Elle peut devenir un critère de vulnérabilité dans la mesure où elle est significative (l'amplitude de battement de la nappe, conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe). De ce fait, elle peut devenir un critère de vulnérabilité (Allier et al, 2008).
- Perméabilité verticale de la zone non saturée : Elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant vers la nappe (Allier et al, 2008)
- Structure de la ZNS : la variation de faciès la nature l'épaisseur des discontinuités des faciès et leur position dans profil vertical, la texture la teneur en argile et la matière organique de la ZNS peut réduire la contamination des eaux souterraines (Cazaux, 2007)

2.3.4.2.4 Critères relatifs à la zone saturée

- Type de la nappe (Libre ou captive) : Une nappe libre est plus vulnérable à la pollution tandis que la nappe captive est naturellement protégée par un toit perméable ou imperméable.
- Les paramètres hydrodynamiques : la perméabilité, gradient hydraulique, le coefficient d'emménagement et la transmissivité déterminant le temps de résidence (dépend de l'hydrodynamisme des formations aquifères) contaminant et leur vitesse de migration dans nappe.
- La relation nappe-cours d'eau : c'est la relation entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (drainage ou alimentation).

- Épaisseur de l'aquifère déterminant la quantité de réserve d'eau dans aquifère le réserve est important du polluant (Cazaux, 2007)
- Type de système hydrogéologique. Caractéristique plus ou moins capacitif et transmissif, il joue sur le temps de transfert et de temps de séjour dans nappe.

2.3.4.2.5 Critères relatifs aux zones saturée et non-saturée

- Fracturation et densité : Elle joue le rôle de drain et augmente très sensiblement les vitesses d'infiltration depuis la surface vers la nappe (Cazaux, 2007)
- Recharge : Elle correspond au volume d'eau atteignant la nappe d'eau souterraine et dépend de la pluie efficace s'infiltrant dans le sol puis dans la ZNS et la quantité d'eau en réserve déterminant les conditions de dilution d'un polluant vers la nappe (Cazaux, 2007 ; Allier et al, 2008).

2.3.4.2.6 Critères de vulnérabilité spécifique

- Comportement du polluant potentiel (milieu fixe) dépend des caractéristiques du milieu, mais également des propriétés physico-chimiques et biologiques du composé lui-même (réactions acides bases, d'oxydoréduction, de désorption, biodégradation, synthèse cellulaire, diffusion, évaporation, filtration, transport de germes, ...).
- Capacités dispersives et épuratoires des sols : Concerne les propriétés auto épuratoires des sols.
- Qualité du réseau hydrographique : Le réseau hydrographique peut être vecteur de contaminations vers les eaux souterraines.
- Typologie de l'occupation du sol : L'occupation du sol conditionne les volumes et la nature des polluants potentiels (forêt, cultures, élevage, habitat, tissu industriel, agricole, irrigation etc....) et augmente la percolation.

2.4 Les méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des eaux souterraines

Il existe trois grandes catégories de méthodes permettant de caractériser la vulnérabilité des eaux souterraines :

- **Les méthodes de cartographie à index**

Elles sont basées sur la combinaison de plusieurs cartes illustrant chacune un paramètre (sols, géologie, hydrogéologie,...).

Le principe consiste à :

- A. Sélectionner des critères (paramètres) considérés représentatifs pour illustrer la vulnérabilité des eaux souterraines.
- B. Subdiviser chaque critère en intervalles discrétisée et hiérarchisés.
- C. Attribuer une valeur à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination.
 - **Les modèles de simulation.**
 - **Les méthodes statistiques.**

Tableau 2: différents méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.

Méthodes	Désignation	Types d'aquifère
DRASTIC	Depth Recharge Aquifer Soil Topography Impact Conductivity.	Tout type
SINTACS	Soggiacenza Infiltrazione no saturo Tipologia Acuifero Conducibilità Superficie topographica	Tout type
EPIK	Epikarst, Protective Infiltration Karst	karst
RISKE	Roche Infiltration Sol Karstification Epikarst.	karst
COP	Concentration du flux couverture protectrice précipitation	karst
DISCO	Discontinuities Couverture Protection Ruissellement	fissures
GALDIT	Groundwater Aquifer Depth Distance Impact Thickness	Cotiers
PI	Couverture Protectrice Infiltration	Tout type
LEA	Couverture protectrice condition d'infiltration	Tout type

2.5 Pollution des eaux souterraines

La pollution se définit comme la dégradation d'un milieu naturel par introduction d'un polluant.

L'eau souterraine est considérée comme polluée lorsqu'elle contient des substances autres que celles liées à la nature des terrains qu'elle a traversés ou dans lesquelles elle séjourne.

Cette notion de dégradation est très importante, puisqu'en l'absence de conséquences négatives pour le milieu, on ne peut pas parler de pollution. Concrètement, pour une même substance, son caractère polluant sera plus ou moins élevé en fonction des quantités déversées dans le milieu et

de la capacité de ce milieu à l'éliminer naturellement. En ce qui concerne l'eau, les milieux potentiellement sujets à la pollution sont les cours d'eau, les nappes souterraines, les mers, les lacs, les retenues d'eau, etc. Selon L'OMS (1993) : «un cours d'eau est considéré comme étant pollué quand la composition ou l'état de ses eaux, est directement ou indirectement modifiés, du fait de l'activité de l'homme ».

La pollution est la dégradation d'un écosystème par diffusion directe ou indirecte de substances chimiques, physiques ou biologiques susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou perturber de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes. Cette pollution, essentiellement due à l'activité humaine, a de nombreuses formes et peut être ponctuelle, diffuse, temporaire ou chronique, et linéaire (**Fig. 1**).

La plaine du Haut Cheliff est à vocation agricole, avec d'importantes activités agricoles et un grand nombre d'habitants vivent dans cette plaine agricole, sans égouts réseau, et ils utilisent les fosses septiques pour évacuer les eaux usées. Pratiques agricoles et les eaux usées non traitées sont considérées comme les principales sources de pollution dans cet aquifère, en raison de l'augmentation composés azotés, chlorures et sulfates (Khatri et Tyagi 2015).

Cependant, dans le cas d'absence total de constituants étrangers au système réservoir/eau, l'eau souterraine peut être qualifiée de polluée ou d'impropre à la consommation lorsque les concentrations de ces constituants dissous ou en suspension dépassent les normes admissibles (tableau n° 3), on parle alors de potabilité chimique des eaux.

Tableau 3: Exigences de qualité des eaux destinées à la consommation humaine fixées par la communauté européenne (Lallemand, 1989).

PARAMETRES OU SUBSTANCES	TENEURS			SUBSTANCES EN TRACES, MICROPOLLUANTS (µg/l)	TENEURS	
	Guide	Max.	Min		Guide	Max
pH	6,5 à 8,5	9,5	6	Arsenic (As)		50
Conductivité (micro ohms/cm)	400	1250		Cadmium (Cd)		50
Résidu sec (mg/l)		1500		Cyanures (CN)		50
Dureté totale (degrés français)	35		10	Chrome (Cr)		3000
Calcium (Ca) (mg/l)	100			Cuivre (Cu)	100	1
Magnésium (Mg) (mg/l)	30	50		Mercure (Hg)		50
Sodium (Na) (mg/l)	20	150		Plomb (Pb)		5000
Potassium (K) (mg/l)	10	12		Zinc (Zn)	100	50
Sulfates (SO ₄) (mg/l)	25	250		Nickel (Ni)		200
Chlorures (Cl) (mg/l)	25	200		Fer (Fe)	50	50
Nitrates (NO ₃) (mg/l)	25	50		Manganèse (Mn)	2	0,2
Nitrites (NO ₂) (mg/l)		0,1		Hydrocarbures aromatiques		0,5
Ammonium (NH ₄) (mg/l)	0,05	0,5		Phénols		200
Fluor (F) (mg/l)		0,7		Détergents		0,5
Aluminium (Al) (mg/l)	0,05	0,2		Pesticides		0
				Organismes pathogènes (par 100 ml)		0
				Coliformes fécaux (par 100 ml)		

La pollution modifie certaines caractéristiques de l'eau (composants physico-chimiques, bactériologiques, biologiques) et suscite une altération qui la rend impropre à certaines de ses fonctions. C'est de cette vision originale que découle la définition de Margat (1968) : «La pollution correspond à une perte d'aptitude ou à un appauvrissement du potentiel de l'eau».

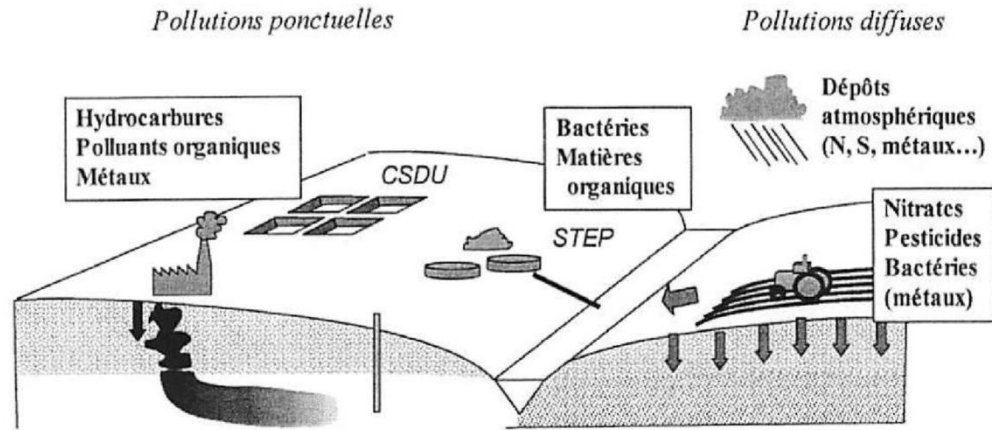


Figure 5: Pollution ponctuelle et diffuse des eaux souterraines (Atteia, 2005).

2.5.1 Types de pollution

2.5.1.1 Pollution ponctuelle et diffuse

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.

Un 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).

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

2.5.1.2 Pollution temporaire et chronique

L'émission exceptionnelle de matière polluante à la suite d'un incident (mauvaise manœuvre en usine, accident de la circulation...) peut entraîner un transfert à la nappe et sa pollution dont la durée dépend de son pouvoir d'autoépuration 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).

2.5.1.3 Pollution linéaire :

Elle accompagne le trajet des routes, des canaux, des cours d'eau. Généralement, elle est due à des rejets d'origine industrielle et domestique (BRGM, 2004).

2.5.2 Principaux polluants des eaux

a. Pesticides

Ce sont les produits de lutte contre les parasites des cultures et des animaux, leur accumulation dans le sol peut être entraînée dans les eaux par les précipitations. La présence des pesticides en quantité importante dans l'eau provoque chez les animaux des anomalies histologiques au niveau de l'oe, s'accumulent dans des organes nobles. (Guillemin et Roux, 1992).

b. Détergents

On considère sous le nom de détergent, toute formulation spécialement étudiée pour concourir aux processus selon lesquels les souillures ou des salissures sont enlevées et mises en solution ou en dispersion. Ce sont donc des produits de nettoyage dégraissants et solvants. La pénétration des produits nocifs à travers les muqueuses constitue un danger bien qu'elle soit en faible quantité.

c. Hydrocarbures

La pollution des eaux souterraines par les hydrocarbures est un phénomène bien connu en raison de la fréquence des accidents qui se sont produits dans le monde. Cette pollution se produit à partir de la diverse liquidité du pétrole : gazoline, benzine, huiles goudrons, essences, kérosène, pétrole. Parmi les sources de cette pollution on peut citer : les eaux usées urbaines et industrielles, à la compagnie des tracteurs et les machines agricoles motorisés. L'infiltration d'huiles minérales dans le sous-sol à des effets désastreux sur les eaux souterraines du fait de leur pouvoir de dilution très forte.

d. Engrais

Matières fertilisants dont la fonction principale est d'apporter aux végétaux des éléments qui sont directement utiles à savoir l'azote, le phosphore, et le potassium. Les apports excessifs d'engrais et de phosphore contribuent à l'accumulation des phosphores et des nitrates dans le sol et qui sont entraînés par les eaux superficielles et contaminent ainsi les nappes phréatiques.

2.5.3 Pollution direct ou indirecte

La pollution générée par l'homme est directe lorsqu'elle a lieu sur le toit de la nappe d'eau souterraine. C'est le cas par exemple d'un rejet de produits organiques dans un puits. La pollution est indirecte lorsqu'elle se fait en direction des eaux souterraines à travers les autres eaux du cycle, d'autres eaux souterraines, ou à travers l'environnement inerte. Le déversement sur le sol d'un pesticide est une pollution indirecte sur les eaux souterraines, car pour que le contaminant parvienne à la nappe, il traversera le sol et la zone non saturée de l'aquifère.

2.5.4 Nature de la pollution

La pollution pourra être :

- quantitative : accroissement ou diminution du flux d'eau ou du flux de chaleur qui pourra être causé par la perméabilité du sol, le colmatage des berges...etc.
- qualitatives : bactérienne, chimique, radioactive et thermique.

2.5.5 Caractérisation de la pollution

La pollution est caractérisée par le «DEFI» c'est à dire sa durée, son étendue, sa fréquence et son intensité (Parascandola, 1980).

- Durée : La durée de l'émission polluante est très variable en fonction de son origine, des moyens de détection et des moyens de lutte pour son atténuation.
- Etendue : l'étendue de la propagation d'un polluant dépend de sa source, du volume du polluant, des possibilités de détection et des moyens utilisés pour la stopper.
- Fréquence : La fréquence d'un phénomène de pollution est directement liée à l'activité humaine à laquelle elle se rapporte, aux mesures prises dans le sens de diminution des actes volontaires ou involontaires de pollution et à l'existence d'infrastructures.
- Intensité : Elle est fonction de la toxicité des contaminants et de leur concentration. L'intensité maximale peut être estimée par le produit de la concentration maximale et de la toxicité

$$I = M_{ax}.T$$

2.5.6 Origines de la pollution des eaux souterraines

Les polluants peuvent être classés suivant différents critères :

2.5.6.1 En fonction de l'origine de la pollution

a. Origine 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.

- Exemple : eaux usées domestiques, eaux pluviales, eaux d'infiltration sous dépôts d'ordures...etc.

b. Origine 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, ou accidentelles (Gaujous 1995). Cette pollution est caractérisée par des matières organiques et graisses (industries agroalimentaires), les hydrocarbures (raffineries), les métaux (traitement de surface métallurgique), les acides, bases et produits chimiques divers (industries chimiques), l'eau chaude issue des circuits de refroidissement des centrales thermiques) et les matières radioactives (centrales nucléaires).

- Exemple : eaux de rejet, eaux d'infiltration sous dépôts industriels, liquides dangereux tel que les hydrocarbures, eaux des lagunes,...etc.,

c. Origine urbaine et routière

Les risques de pollution apparaissent à la construction des réseaux routiers puis à leur exploitation (salage en hiver, hydrocarbures, métaux lourds libérés par les véhicules, substances dangereuses échappées par accident...). En ville, on trouve, en plus des polluants de la voirie, la contamination possible des nappes par les eaux usées, dus au raccordement incomplet ou défectueux, au mauvais état des réseaux, aux surcharges ou mauvais fonctionnement des stations d'épuration (Chekroud, 2007).

L'imperméabilisation des surfaces (routes, rues, parkings, toits) produit une forte quantité d'eau de ruissellement chargée en produits polluants divers (hydrocarbures, déjections d'animaux...).

Ces eaux pluviales polluées ne doivent en aucun cas être transférées à la nappe.

d. Origine agricole

La pollution est étendue dans l'espace et dans le temps ; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. 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 ou des gouffres. La pratique de l'irrigation accélère le transfert. 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.

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. Les lisiers sont responsables de la charge en nitrates des nappes (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).

L'usage des engrais peut augmenter la quantité des sels solubles, tels que les chlorures, les sulfates, les nitrates, le calcium, le magnésium, l'ammoniaque et le sodium dans des proportions variables.

- . exemple : eaux d'infiltration et de ruissellement sous aires cultivées, ou sous aires agricoles (élevages, lisières, épandages d'engrais azotés, produits phytosanitaires).

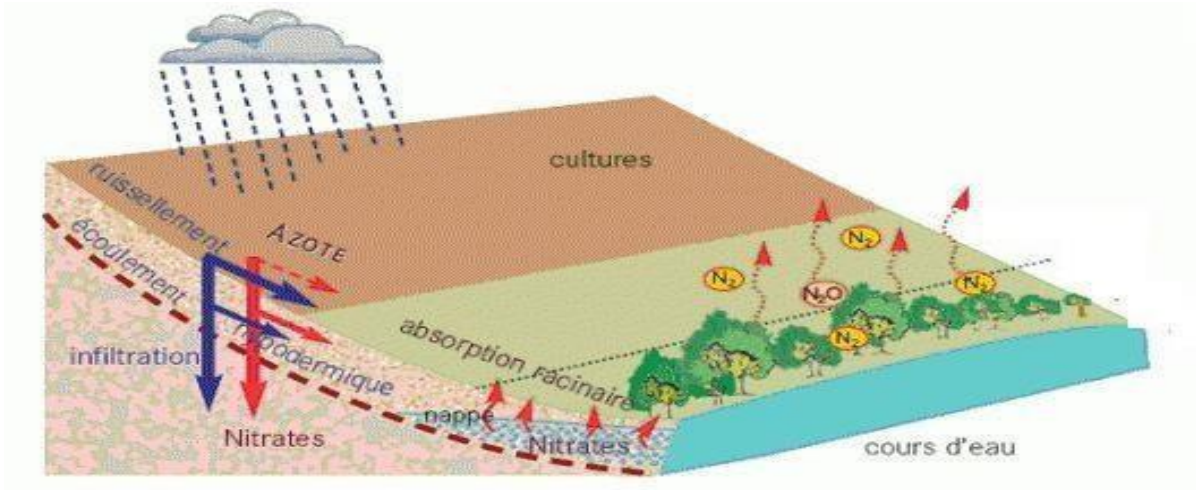


Figure 6: Schématisation de la pollution agricole.

2.5.6.2 En fonction de la nature des polluants

a. Polluants physiques

Les principaux agents physiques de la pollution sont : la chaleur, le transport de matière en suspension et la radioactivité.

- a. La chaleur, par élévation de la température de l'eau surtout de surface, provoque des effets écologiques sur la vie aquatique (développement de micro-organismes, prolifération des algues). Elle diminue la solubilité de l'oxygène, déficit renforcé par l'accroissement de l'activité biologique qui en consomme.

La matière solide en suspension est introduite par les précipitations et les eaux de surface. Certaines particules, très fines (de l'ordre du micron), peuvent ainsi transiter. Elles sont le fait de substances non solubles qu'elles soient de nature minérale ou organique. Elle se traduit par une augmentation de la turbidité, une diminution de la transparence, de mauvaises odeurs et par l'eutrophisation des milieux récepteurs.

La radioactivité est potentiellement le plus dangereux des polluants physiques, c'est pourquoi, tous les rejets sont sévèrement réglementés et contrôlés.

b. Polluants chimiques :

L'eau par son pouvoir dissolvant élevé, dissout les substances rejetées par l'activité humaine. Les polluants sont nombreux et d'origines diverses : sels minéraux, métaux lourds, pesticides, détergent et hydrocarbures...etc.

- **Les sels minéraux dissous** : les plus nocifs sont les composés de l'azote : nitrate (NO_3) et nitrites (NO_2). Les nitrates sont généralement d'origine agricole et l'accroissement de cette pollution au cours de cette dernière décennie est préoccupant. Leur teneur maximum admissible dans l'eau potable est fixée à 50mg/l (tableau.1).

- **Les sulfates et les chlorures** : sont naturellement présents dans l'eau souterraine. Les sulfates en excès peuvent provenir par exemple d'engrais chimiques ou sont produits par la combustion du gasoil et par précipitation. Les chlorures ont généralement une origine géologique, mais les rejets industriels, les épandages, le salage des routes et certains engrais chimiques peuvent également entraîner une pollution. Leur teneur maximum dans l'eau est fixée à 250 mg/l.

- **Les micropolluants (métaux lourds)** : regroupent des substances toxiques. Ils sont dangereux même à l'état de traces car la chaîne alimentaire à un effet cumulatif. Les plus dangereux sont :
 - Les cyanures sont très toxiques même à faible dose. Ils peuvent provenir des effluents des industries telles que cokeries, sidérurgie, pétrochimie. Leur rejet est interdit.
 - Le cuivre, le fer et le zinc ne semblent pas avoir d'effets toxiques notables sur l'homme.
 - Le chrome présent dans les eaux usées industrielles (galvanoplastie) est reconnu cancérigène.
 - Le plomb produit par les tuyauteries et les eaux usées provoque des intoxications.
 - L'arsenic provient des déchets industriels et de certains pesticides.
 - Le cadmium issu des industries de céramique, de colorants et de métallurgie a une toxicité élevée.

- Le mercure reste l'élément le plus toxique des métaux lourds par ses sels organiques très solubles.

c. Les polluants organiques :

La pollution organique provient généralement des êtres vivants et des rejets domestiques. L'industrie chimique rejette également une grande partie de composés organiques (produits chimiques contenant du carbone et de l'hydrogène). Les substances organiques sont éliminées naturellement dans l'eau (DCO) ou grâce aux micro-organismes qui les décomposent pour assurer leur substance (DBO). C'est le processus d'autoépuration. Cette dégradation conduit à des produits minéraux ; gaz carbonique, eau, nitrates, sulfates, phosphores, ... etc.

La décomposition des matières organiques s'accompagne d'une consommation d'oxygène. Dans certains cas où l'oxygène est insuffisant, la dégradation complète des matières organiques ne peut plus se poursuivre et les produits de décomposition alors obtenus (méthane, ammoniac, hydrogène, sulfure) peuvent engendrer des nuisances importantes et le milieu ne permet plus le développement d'êtres vivants.

d. Les micropolluants organiques :

Les pesticides regroupent tous les produits utilisés dans la lutte contre les parasites des cultures et des animaux (insecticides, herbicides, ainsi que les produits de leur décomposition : PCB et PCT). Leur évolution dans le sol qui aboutit à des dérivés toxiques est encore peu connue. Mais, on sait aujourd'hui que, dans la plupart des cas, ils sont fixés ou dégradés dans le sol. Ils ont été peu recherchés dans les eaux souterraines (Lallemand, 1983).

L'usage des détergents, d'apparition récente, est en accroissement considérable. Ils inhibent les processus d'autoépuration, limitent le développement des micro-organismes du sol et bloquent la ré-oxygénation. Ils proviennent des effluents industriels ou urbains ; on les emploie également à l'occasion comme dispersant ou émulsionnant du pétrole en cas de marée noire.

- Les hydrocarbures et leurs dérivés, sont particulièrement gênants du fait de leur pouvoir de dilution très élevé. Un litre d'essence suffit, en effet, pour dégrader 100 à 500 m³ d'eau. Ils sont souvent liés à des pollutions accidentelles.
- Les PCB «polychlorobiphényles» sont des composés de grande solubilité chimique, ce qui favorise leur incorporation et leur stockage dans les êtres vivants.
- Les phénols : proviennent de la dégradation de matières végétales enfouies dans le sol ou de rejets industriels (pétrochimiques).

e. Polluants micro-biologiques :

Les bactéries, virus et autres agents pathogènes rencontrés dans les eaux souterraines, peuvent provenir des décharges, de fosses septiques, des épandages d'eau usées, de l'élevage, de matières fermentées, de cimetières, ...etc. A titre d'exemple, on remarque que la pollution par coliformes est générale pour la moitié des captages d'eau potable en France, qui présentent au moins une analyse non conforme par an (Lallemand, 1989).

2.5.6.3 Selon la répartition géographique :

Selon la répartition géographique, on distingue :

- pollution diffuse qui caractérise les phénomènes de pollution pouvant se produire sur une grande étendue de l'air d'alimentation d'un aquifère.
- pollution ponctuelle qui caractérise les phénomènes de pollution qui se produisent instantanément au niveau d'un site donné situé dans l'impluvium de l'aquifère

2.5.6.4 Selon la répartition dans le temps :

Selon la répartition dans le temps, on distingue :

- pollutions permanentes se produisant de façon continue dans le temps
- pollutions accidentelles se produisant par une erreur humaine (exemple de rupture d'une canalisation transportant une substance polluante)
- pollutions saisonnières liées à une activité humaine saisonnière (exemple d'utilisation des engrais azotés dans certaines cultures saisonnières).

2.5.7 Pollution des eaux souterraines par les nitrates :

Les eaux naturelles non polluées contiennent généralement peu de nitrates. Les nitrates présents dans l'eau peuvent provenir de sources indirectes ou directes (De Villers et al. 2005).

Le nitrate est la forme la plus mobile de l'azote dans le sol. L'azote est un composé indispensable aux êtres vivants. Il est présent dans les minéraux, l'atmosphère et le sol. La migration de l'azote dans les eaux souterraines est une conséquence directe quand l'épandage excède la demande de la plante et la capacité de dénitrification du sol, habituellement sous forme de nitrates. Le transfert des nitrates dans les sols résulte d'un grand nombre de facteurs interdépendants (Moller et al. 1998) , facteurs climatologiques, agrologiques (propriétés physico-chimiques, hydrodynamiques et microbiologiques des sols), facteurs agronomiques (type de cultures, travaux culturaux, niveau de fertilisation, couverture végétale, profondeur d'enracinement). Ces facteurs peuvent conduire à des situations plus ou moins favorables à la lixiviation des nitrates (Van D, 1994).

2.5.8 Caractères des polluants :

(D'après BALLERINI et al. 1998)

L'intérêt de connaître les caractéristiques permet de connaître son comportement dans le sous-sol et la nappe et ainsi concevoir les techniques adaptées pour le déroulement des opérations de décontamination.

2.5.8.1 Solubilité aqueuse :

La solubilité est la quantité maximale dissoute d'un composé dans l'eau à une température donnée. Elle est influencée outre la température, par la pression, la fraction molaire de chaque composé dans le mélange de polluants et la teneur en matières organiques dissoutes. Les composés très solubles sont facilement transportés par l'eau, car ils suivent son écoulement. Ils sont souvent peu adsorbés sur les sols, et plus facilement biodégradables. Cependant, certaines espèces solubles, de métaux par exemple, ne sont pas biodégradables.

2.5.8.2 Tension de vapeur :

Ce paramètre sert à estimer la tendance d'un produit à se volatiliser et donc à passer dans l'atmosphère gazeuse à partir de la phase aqueuse du sol.

Les interactions entre la solubilité en milieu aqueux et la tension de vapeur conditionnent la volatilisation d'un produit donné à partir de la solution aqueuse. Par exemple, un polluant très soluble dans l'eau mais présentant une tension de vapeur élevée se volatilise rapidement. De ce fait, il atteindra rarement l'aquifère lors de la pollution.

Plus un produit sera volatil, moins grande sera son affinité pour le sol. Il sera éliminé dans l'atmosphère avant d'être bio dégradé.

La loi de Henry décrit les équilibres phase liquide-phase gazeuse.

$$H = G_g / C_l$$

H = constante de Henry

G_g = concentration en phase gazeuse du constituant

C_l = concentration en phase liquide du constituant

2.5.8.3 Adsorption

Ce paramètre représente le potentiel d'un composé à s'adsorber sur le sol, résultant des actions physico-chimiques eau/roche. L'adsorption va de pair avec la surface spécifique des grains ou des fissures. Elle va se traduire par une diminution de la mobilité et de l'accessibilité du polluant.

La surface spécifique d'un milieu poreux ou fissuré est le rapport de la surface totale des grains ou des parois des fissures, par rapport à l'unité de masse (surface massique) ou à l'unité de

volume (surface volumique) de l'échantillon. Elle s'exprime en cm^2/g ou par cm^2/cm^3 . La surface spécifique augmente lorsque le diamètre des grains ou la densité des fissures diminuent.

L'adsorption dépend de la charge électrique des polluants. Les polluants chargés électriquement ont tendance à se lier aux particules d'argile et autres minéraux, alors que ceux non chargés s'associeront préférentiellement à la matière organique. Les polluants peuvent être adsorbés par des interactions ioniques, polaires, hydrophobes ou hydrophiles.

Les polluants sous forme de précipités et les liquides non miscibles à l'eau peuvent entraîner des occlusions des pores du sol, leur accessibilité aux microorganismes s'en trouve d'autant plus limitée.

Le coefficient de partition (K_{ow}) est le coefficient de partage d'un produit entre la phase organique (l'octanol) et la phase aqueuse. Les composés à K_{ow} élevé seront adsorbés en grande quantité dans le sol. Ils ne sont pas entraînés avec l'eau en profondeur,. Ces propriétés physicochimiques donnent des indications sur la répartition probable du polluant dans l'eau et dans le sol. L'adsorption dépend aussi des caractères géologiques du sol tels que la porosité, la perméabilité, la fraction de matière organique. . .

$$K_{ow} = C_o / C_w$$

C_o = concentration du soluté dans l'octanol
 C_w = concentration du soluté dans l'eau.

Tableau 4: Influence du coefficient de partage K_{ow} sur le comportement du polluant vis à vis des phases aqueuses et solide (Ballerrini et al. 1998).

Coefficient de partage K_{ow}	>10	> 100
Comportement vis à vis de l'eau	Hydrophile	Hydrophobe
Solubilité dans l'eau	Elevée	Faible
Solubilité dans la phase organique	Faible	Elevée
Coefficient d'adsorption	Faible	Elevée
Facteur de bioconcentration	Faible	Elevée

Tableau 5: Caractéristiques physico-chimiques de quelques polluants organiques. Le temps de demie vie correspond au temps nécessaire pour que la moitié d'une quantité ou d'une concentration d'un polluant disparaisse du milieu ou de l'organisme qu'il contamine (d'après BERTHELIN et al. 1995).

Polluants	Densité	Volatilité (Atm.m ³ /mole)	Hydrophobicité log Kow	1/2 vie dans sol (jours ou ans)	1/2 vie dans nappe (jours ou ans)
Anthracène	1,28	86	4,45	50 jours – 1,3 ans	100 jours – 2,5 ans
Benzène	0,88	5550	2,13	5 – 16 jours	10 jours – 2 ans
naphtalène	1,02	483	3,37	16 – 48 jours	258 jours
Phénol	1,07	1,36	1,46	1 – 10 jours	5 – 7 jours
Pyrène	1,27	5,1	5,18	210 jours – 5,1 ans	1,15 – 10,4 ans
Toluène	0,87	5920	2,69	0,5 – 1 jour	0,5 – 1 jour
Xylène	0,86	7040	3,26	7 – 28 jours	14 jours – 1 an

2.5.8.4 **Biodégradabilité :**

La biodégradation des composés organiques se produit en condition aérobie ou anaérobie selon la structure moléculaire et les conditions environnementales. Le potentiel de biodégradation permet de classer les composés en trois catégories :

- les composés dégradables
- les composés persistants : ne changent pas d'état spontanément
- les composés récalcitrants.

La position des substituants joue un rôle important : les positions méta- et ortho- confèrent une plus grande stabilité aux molécules aromatiques. Il en est de même pour les substitutions des carbones en alpha par rapport à celle en oméga. En général, plus une molécule est substituée (remplacement d'un groupement fonctionnel par un autre), plus elle est résistante à la biodégradation. Certaines biodégradations nécessitent l'action conjointe de microorganismes et non pas d'une souche unique.

2.6 Mécanismes de transport et d'atténuation du polluant en milieu souterrain

2.6.1 Mécanismes de transport et d'accumulation

a. Dans une nappe libre

Une pollution se produisant à la surface du sol peut s'infiltrer jusqu'à la nappe. Mais, avant d'atteindre son toit, le polluant traverse la zone non saturée, comprise entre le sol et la surface de l'eau. Celle-ci, de nature très diverse suivant le type de roches la constituant, conditionne en grande partie le transfert vers la nappe. La perméabilité des terrains déterminera la rapidité des circulations. Les rejets peuvent atteindre la nappe, si leurs volumes qui s'infiltre est supérieur à la capacité de rétention du volume du terrain non saturé affecté par la pollution.

En raison des hétérogénéités de textures et de composition inhérentes aux aquifères, il peut s'avérer difficile de délimiter avec précision l'étendue d'une éventuelle contamination de l'eau souterraine. Dans la majorité des cas, il semble que la contamination ne soit découverte que lorsqu'un puits d'alimentation pour l'eau potable est atteint. La détection est généralement difficile pour un usager, car les concentrations usuellement très faibles (de l'ordre de micro-g/l) n'ont pas d'effets toxiques aigus immédiats et passent souvent inaperçus.

Les concentrations des contaminants lessivés et pénétrant dans le sol ou dans la zone insaturée d'un aquifère dépend des conditions suivantes (Brereton et Wilkinson, 1976) :

- le volume du polluant répandu en surface,
- les changements chimiques pouvant se produire dans le temps entre le polluant et le milieu récepteur,
- la solubilité des polluants ou de ses métabolites,
- la recharge (importance de l'infiltration).

Dans la zone saturée (aquifère) les transferts sont essentiellement latéraux selon la direction générale d'écoulement de la nappe. Dans cette zone les processus responsables du transport des polluants sont principalement l'advection, la dispersion mécanique et la diffusion moléculaire liquide. Dans cette zone, également, le polluant se dissipera partiellement ou complètement dans l'eau ou flottera sur l'eau en fonction de la densité des composants formant le polluant (**Fig.7a** et **7b**).

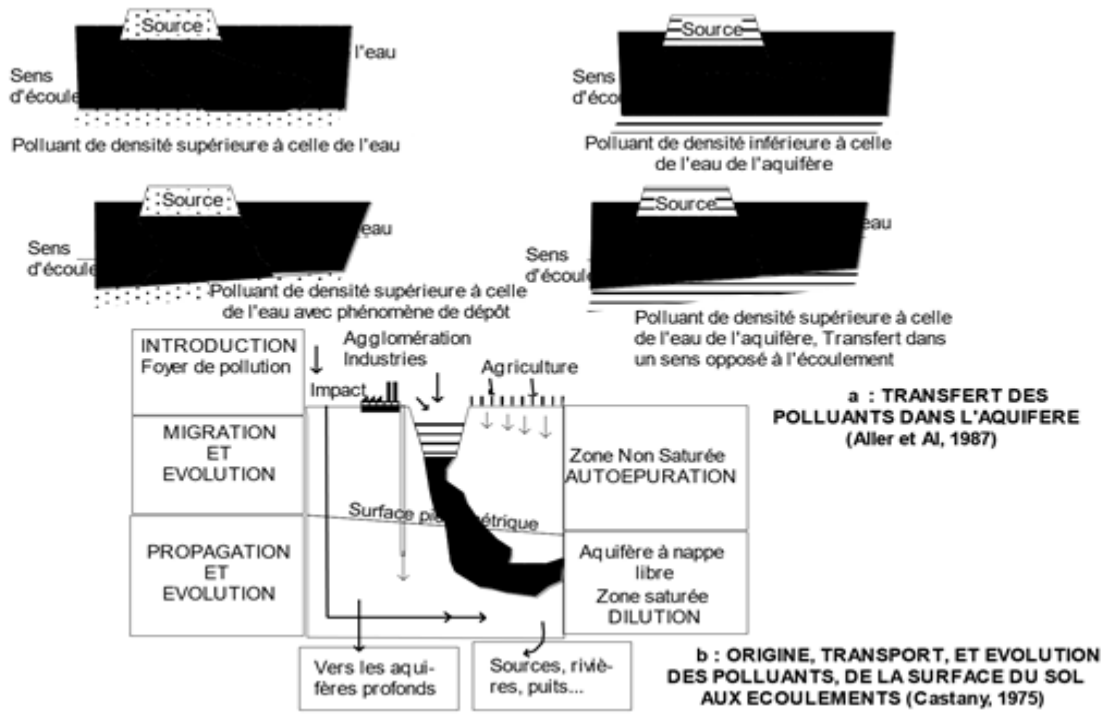


Figure 7: a- Transfert des Polluants dans L'aquifère (Aller et Al, 1978).b- Origine, Transport, et Evolution des Polluants, de la surface du Sol aux Ecoulements (Castany, 1975)

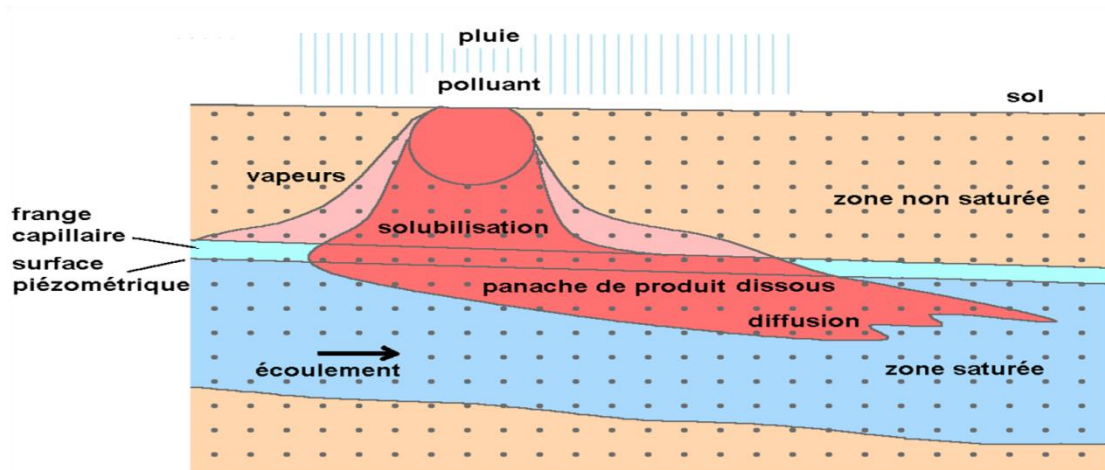


Figure 8: pollution par un produit soluble n'atteignant pas la nappe.

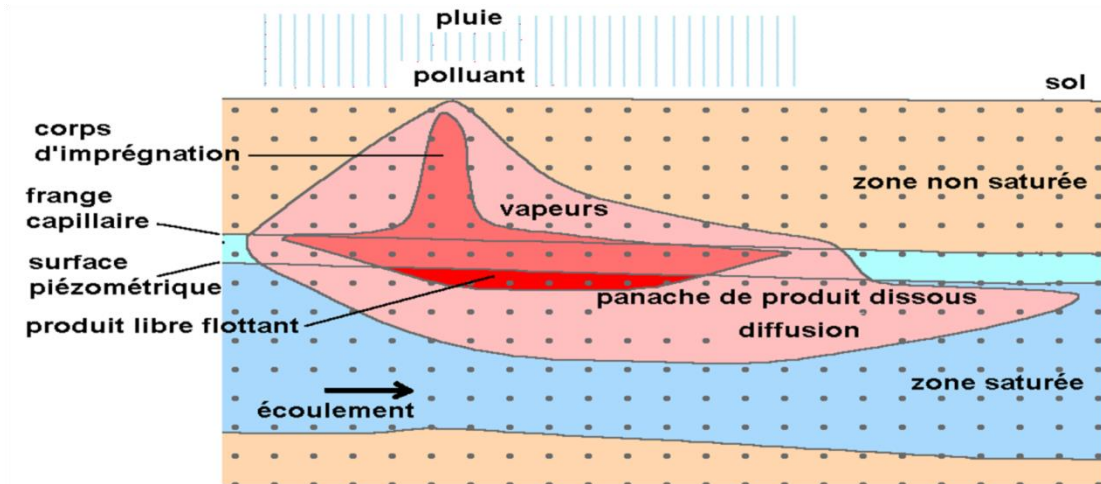


Figure 9: Pollution par un produit plus léger que l'eau et qui atteint la nappe.

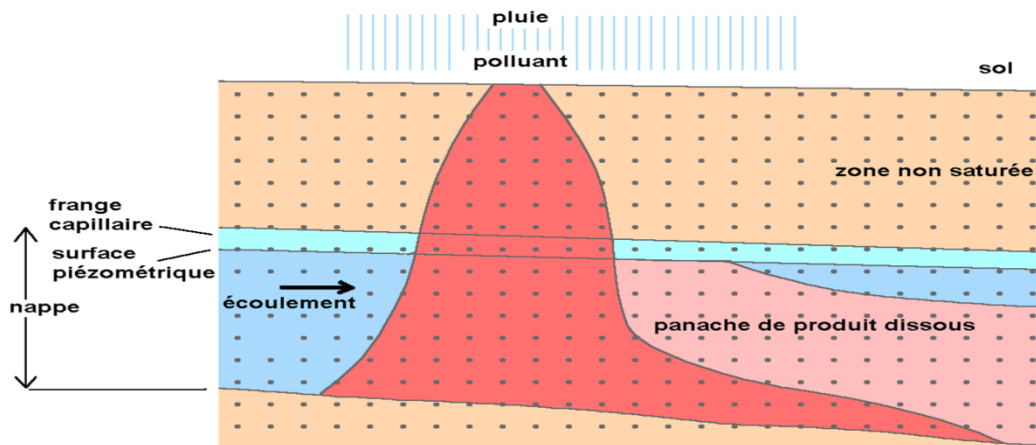


Figure 10 : Pollution de la nappe par un produit plus lourd que l'eau.

b. Dans la nappe captive

L'existence d'une roche imperméable recouvrant l'aquifère empêche le transit direct d'un polluant déversé en surface. Le polluant ne peut parvenir que par injection volontaire de déchets liquides par forages, ou par mise en communication des nappes par des ouvrages non étanches (exemple de forages d'eau profonds, ou de pétrole).

2.6.2 Les mécanismes d'atténuation

L'occurrence ainsi que le mouvement de l'eau souterraine sont contrôlés presque entièrement par la topographie et la géologie.

Les hétérogénéités géologiques, spécialement celles relevant de la porosité et de la perméabilité, les conditions physico-chimiques et biochimiques du milieu, ainsi que les caractéristiques

propres aux polluants sont également des paramètres pouvant influencer sur l'étendue d'une éventuelle pollution des eaux souterraines.

Dans ce qui suit, nous résumerons brièvement les principaux mécanismes de transformation et d'atténuation du polluant traversant le milieu souterrain. On distingue :

2.6.2.1 Les processus physiques

- **La volatilisation** : Certains produits sont transférés de la surface du sol vers l'atmosphère. Dans le contexte des eaux souterraines, la volatilisation ne constitue pas un processus efficace de dissipation si le polluant a migré au-dessous de la surface du sol.

- **Le lessivage** : Il est régi en grande partie par les caractéristiques intrinsèques du sol et de la zone non saturée tel que la porosité, le pH, le taux d'humidité, la teneur en argile et en matières organiques, de même que par les conditions météorologiques.

- **La filtration** : Les milieux poreux jouent le rôle de filtre pour les rejets en piégeant une partie organique en suspension et des micro-organismes.

- **Rétention capillaire** : Une partie de la charge polluante peut être retenue dans l'eau capillaire de la zone non saturée.

- **La dispersion/dilution** : la dispersion s'applique aux substances solubles et aux substances pouvant se mettre en suspension. Elle est liée :

- . à la vitesse de l'eau, à la perméabilité et à la porosité efficace du milieu,
- . à la dispersivité du milieu.

La dispersivité, qui se fait dans les trois directions de l'espace, a pour effet d'accroître (en fonction du temps) le volume marqué par la présence du polluant, tandis que parallèlement la concentration moyenne de produit dans ce volume, décroît. La dilution se produit généralement dans la zone saturée.

- **La flottation** : Ce phénomène se rapporte aux produits insolubles ou à faible solubilité tels les hydrocarbures plus légers que l'eau.

2.6.2.2 Les processus chimiques et biochimiques

- **Précipitation** : Suivant les conditions de pH et de température, il peut y avoir une diminution importante de la charge polluante par précipitation.

- **Dégradation chimique** : Les réactions chimiques les plus probables dans les milieux souterrains sont les processus d'hydrolyse des polluants se produisant habituellement par l'intermédiaire d'acides ou de bases, qui jouent le rôle de catalyseurs.

- **Adsorption/désorption** : Les constituants du sol les plus susceptibles d'être impliqués dans ce processus sont ceux qui possèdent une grande surface spécifique (cas des argiles) ou encore des sites très réactifs sur lesquels peuvent se fixer divers substances (cas de la matière organique). Le degré d'adsorption d'un polluant est fortement lié à sa nature chimique (grosseur de la molécule, sa polarité, la position de ses groupements fonctionnels, etc.).

- **Biodégradation** : Ce phénomène représente le résultat d'un ensemble de processus dynamiques qui sont impliqués dans la destruction biologique de composés organiques par les micro-organismes contenus dans le milieu souterrain. Cette autoépuration par les organismes est fonction de plusieurs paramètres (température, teneur en oxygène dissout, pourcentage de la matière organique,...etc.).

Par ailleurs lorsque les végétaux sont dans un milieu nutritif, on observe l'absorption du polluant par les racines. Une fois absorbé, le polluant peut subir des transformations sous l'influence du métabolisme de la plante.

2.6.3 Rôle du sol

Les sols constituent un puissant moyen d'épuration et de recyclage des eaux. Le complexe argilo humique confère des propriétés d'adsorption et d'échange : le sol constitue un système accumulateur de substances très diverses. L'adsorption moléculaire et la rétention des micropolluants organiques dans les sols sont plus ou moins forte et plus ou moins réversible. La nature de la molécule détermine son pouvoir de rétention, par son poids moléculaire, par sa charge, par la conformation de la molécule et son affinité à établir des liaisons covalentes, par sa solubilité dans l'eau. La capacité d'adsorption ionique et la rétention des cations (Ca, Mg, K, Na) du sol varient essentiellement en fonction de son épaisseur, de sa teneur en argile et en matières organiques. Les anions tels que Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} ne sont pas retenus et migrent par convection ou par diffusion alors que certaines molécules sont fortement retenues dans le sol, comme par exemple les phosphates.

La microfaune et la microflore du sol lui confère une importante capacité d'épuration biologique. Un gramme de sol renferme environ 10^8 à 10^9 bactéries essentiellement non

pathogènes. L'azote organique protéinique et l'azote minéral sont métabolisés avec alternance de phases aérobies de minéralisation et de phases anaérobies de dénitrification. Les différentes voies de catabolisme des micropolluants organiques, via des enzymes, aboutissent à la production de déchets (dégradation totale de la matière organique), que sont le dioxyde de carbone et le méthane, ou à des métabolites secondaires (dégradation partielle) parfois plus toxiques que la molécule d'origine.

En revanche, les solvants chlorés, l'acétone et le benzène sont très peu retenus par les sols et peuvent atteindre rapidement les nappes avec une grande persistance en entraînant avec eux d'autres molécules polluantes adsorbées.

Le sol peut être un réservoir pour les germes pathogènes introduits accidentellement. Les bactéries circulent relativement peu dans les sols et sont retenues dans les premiers centimètres, à la différence des virus qui sont facilement entraînés et peuvent contaminer la nappe sous-jacente.

2.6.4 Rôle du couvert végétal

Le couvert végétal agricole ou forestier agit par ses prélèvements cycliques dans la couche occupée par les racines : stockage dans la biomasse puis restitution au sol par dégradation. Les changements d'occupation des sols peuvent rompre cet équilibre : libération importante d'azote liée à la déforestation et la mise en culture, pollution azotée par les jachères travaillées, dégradation accélérée de la matière organique par le retournement des prairies, ...

2.6.5 Rôle protecteur des berges des cours d'eau

Les dépôts vaseux situés au fond des cours d'eau et latéralement à proximité de la berge, riches en bactéries, sont le siège du processus de biodégradation des hydrocarbures, par exemple, et de l'accumulation des métaux lourds (Zn, Pb, Cd, As, Mn) qui se fixent sur les particules argileuses des alluvions.

2.6.6 Autoépuration biologique des eaux souterraines

Les organismes vivants et non toxiques (Bactéries et Invertébrés) présents dans les eaux souterraines peuvent jouer un rôle essentiel dans les processus d'autoépuration des polluants des eaux souterraines.

Les Invertébrés sont capables de métaboliser et de transformer certains polluants (hydrocarbures, métaux lourds) en des composés à toxicité moindre. La bioaccumulation de polluants, c'est-à-dire l'assimilation et la concentration de substances toxiques par l'organisme, permet de stocker temporairement dans les tissus vivants des polluants et de contribuer à la restauration des milieux. La biotransformation, processus important chez les animaux qui ingèrent de grande quantité de sédiments, réduit également la concentration en éléments toxiques dans la chaîne trophique considérée.

Chapitre 2 :
Représentation de la
Région d'Etude

Introduction

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt de l'importance pour d'innombrables humaines. Les eaux souterraines constituent une source primordiale pour la vie et activités humaine et offrent d'excellentes sources d'approvisionnement pour la plupart des pays soit en eau potable ou en irrigation.

Cependant, Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines et l'utilisation intensive de ces ressources en eau et l'accroissement des activités anthropiques ont engendrés de sérieux problèmes du fait d'un manque de protection de l'environnement , Parmi ces problèmes, nous pouvons évoquer la pollution des ressources en eaux.

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).

La plaine Alluviale du Haut Chéiff voir ça position joue un rôle déterminant dans le développement socio-économique de la région, l'agriculture est considérée comme l'activité principale, la croissance démographique ainsi que l'intensité de la demande en eau pour l'irrigation risque d'influencer négativement sur la qualité de l'eau souterraine qui forme le réservoir principale d'approvisionnement en eau.

L'eau, au contact des terrains qu'elle rencontre, se charge en divers éléments qui vont influer sur sa qualité. Certains de ces éléments sont présents naturellement dans le sol, et vont définir la qualité « naturelle » de l'eau brute. Ainsi l'eau à l'état naturel peut contenir : - des matières organiques, - des matières dissoutes provenant des terrains traversés (calcium, magnésium, sodium, potassium, bicarbonates, sulfates, chlorures, métaux lourds, ...), - des particules en suspension. D'autres éléments sont d'origine anthropique. En conséquence, la qualité des eaux continentales dépend de la concentration d'un certain nombre d'éléments qui y sont présent en solution ou en suspension.

La bonne connaissance des conditions climatiques de la zone d'étude joue un rôle majeur dans la compréhension de l'évolution des éléments chimiques, car le régime pluviométrique joue un rôle prépondérant dans l'hydrochimie par le lessivage des terrains. Plus la pluviométrie est forte, plus la dilution des sels restants passant en solution est grande. Il est important de signaler à cet effet que l'alimentation est régie par la fraction de pluie qui s'infiltré vers la zone saturée, constituant à moyen terme la véritable ressource mobilisable.

1 Présentation Générale De La Zone D'étude

1.1 Situation Géographique

La plaine de KHMIS MILIANA ex. Affreville ou La plaine alluviale du Haut Cheliff, est localisée dans la wilaya d'AIN DEFLA, située à 120 Km au sud-ouest d'Alger, et à 25 km à l'est des centre de la wilaya a sur la route N°04. Appartient au bassin du Cheliff,

Elle apparait sous la forme d'une dépression intra-montagneuse dans la partie nord de l'Algérie qui couvre dix communes qui sont entre autre : Arib, Ben Allal, Sidi Lakhdar, Khemis Miliana, Ain Soltane, Djendel, Ain Lechiakh, Bir Ould Khelifa, Djelida et Ain Defla.

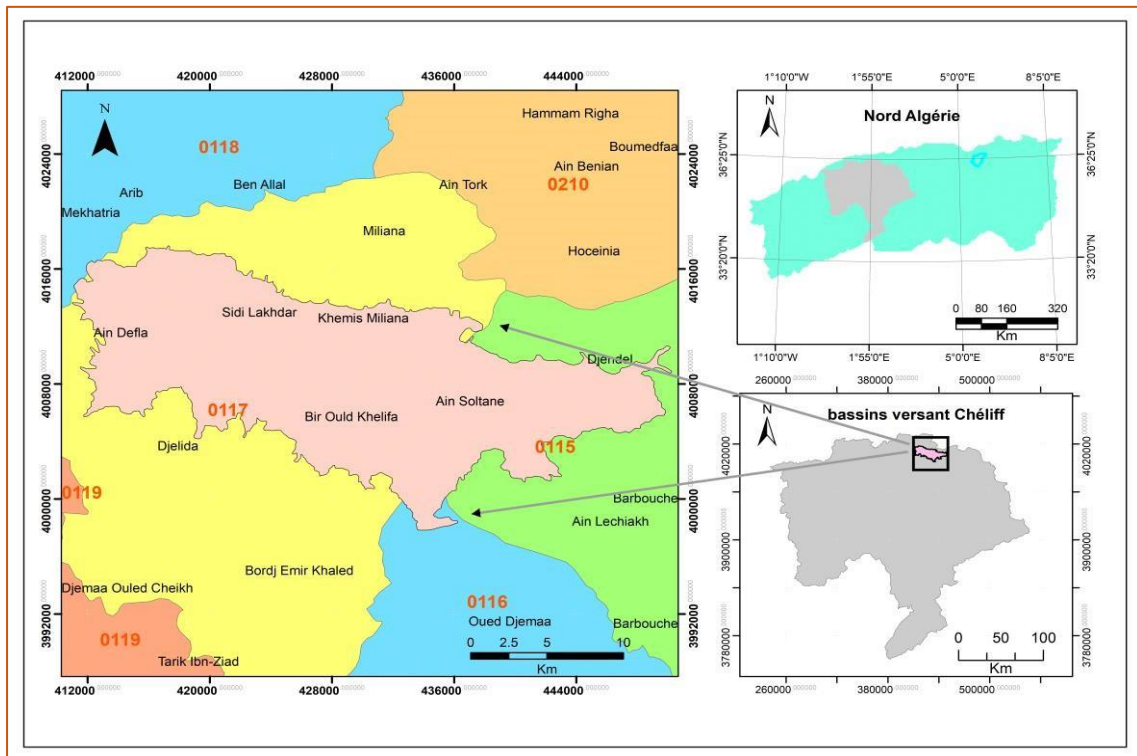


Figure 11: Carte de Localisation de la Zone d'Etude

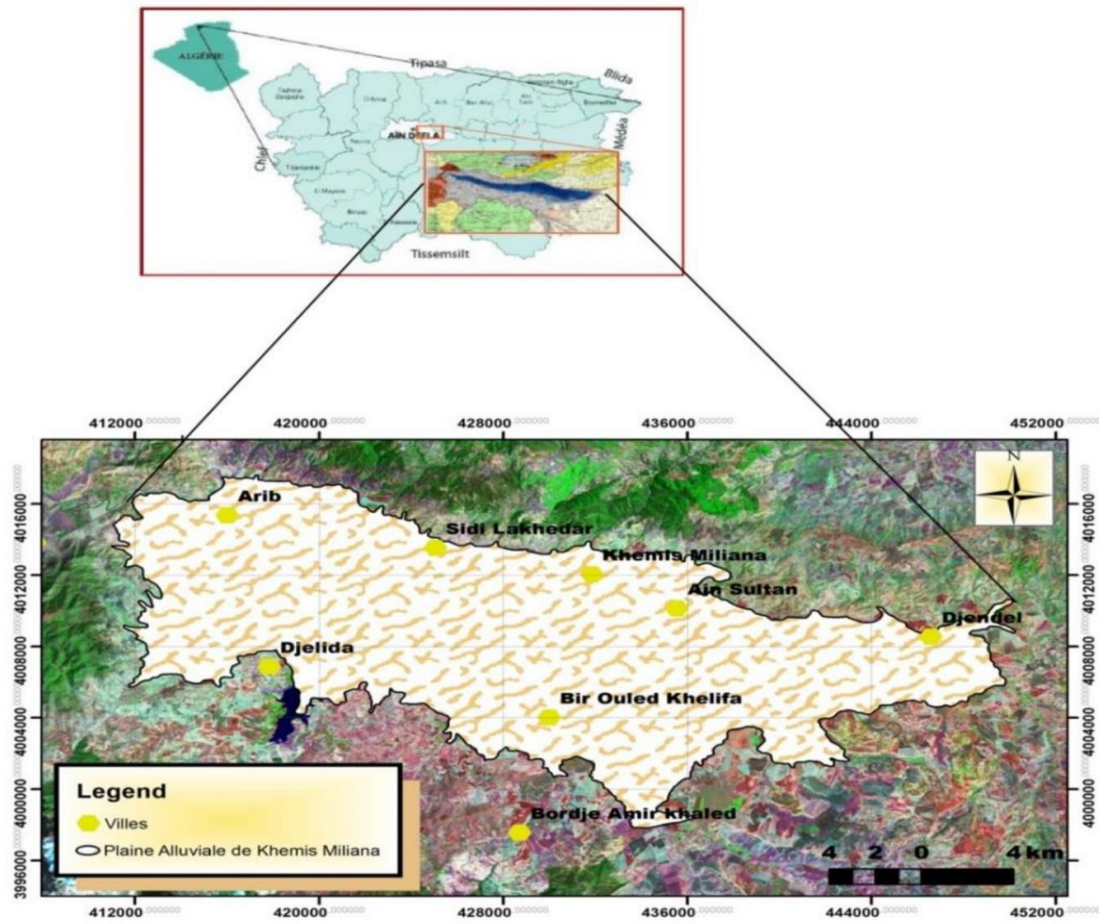


Figure 12: carte de la situation géographique de la zone d'étude (plaine de Khemis Miliana).

1.1.1 Contexte géomorphologique

L'unité hydrogéologique des alluvions du Quaternaire a été délimitée par vectorisation afin de définir les paramètres géométriques (superficie et périmètre). Cette plaine couvre une superficie de 395.5 km² et un périmètre de 159.3 km et une altitude moyenne de 270 m. Elle fait partie des sous bassins du Cheliff N° : 01-15,16 et 17 (Fig. 12). Elle forme l'un des plus grands réservoirs d'eau souterraine de la région, géographiquement située entre les latitudes (36°18' - 36°6') N et les longitudes (2° - 2°27') E, limitée au Nord par le massif du Zaccar (1576 m), et au Sud par les premiers reliefs de l'Ouarsenis, on y pénètre l'Est par le seuil de Djendel, et on en sort l'Ouest par le seuil de Doui (Meziani and Bong, 2013).

Elle est caractérisée par une pente relativement faible (15%) (Hattab M.1998). Elle est bordée au nord par des cônes de déjection qui constituent la zone transition entre la vallée et la montagne.

Le tableau suivant résume les principaux paramètres physiographiques :

Tableau 6: Paramètres physiographiques de bassin versant (BONG.I ; MEZIANI.S, 2013).

Paramètres de formes				
code	Nom de Sous bassins	Kc	Rectangle équivalent (ROCHE)	
			Longueur Lr (Km)	Largeur Lr(Km)
0115	O.Chélif Harbil	1.66	71.60	11.18
0116	Deurdeur	1.72	78.92	10.75
0117	O.Chélif Harrezza	1.45	58.13	13.18
Paramètres géométriques Plaine de Khemis Miliana				
Surface de la plaine(Km ²)			Périmètre de la plaine (Km)	
359,5			159,3	

1.1.2 Contexte Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique dans la zone d'étude est dense et le cours d'eau le plus important est l'oued Cheliff. Dans la zone d'étude, il y a trois barrages : Ghrib, Harrezza et Deurdeur ; ceux-ci contribuent à l'irrigation de la majeure partie de la plaine avec plus de 20.000 ha de terres irriguées. Cependant, les eaux souterraines de aquifère alluvial de la plaine sont principalement utilisées à des fins de consommation, d'irrigation et industrielles (Bouderbala and Gharbi, 2017).

La plaine du Haut Chélif est traversée d'Est en Ouest par Oued Cheliff et ses principaux affluents qui sont Oued Souffay, Millet et Boutane au Nord, Deurdeur, Massine et Harrezza au Sud (**Fig. 13**).

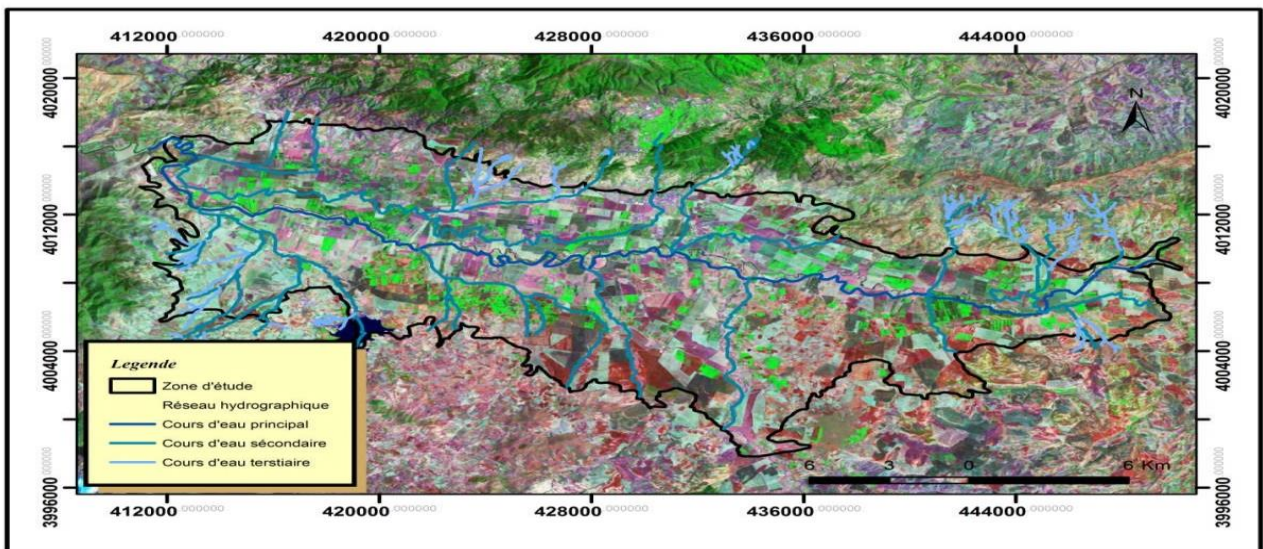


Figure 13: Réseau hydrographique sur le fond satellitaire.

Le procédé de numérisation permet la reproduction du tracé hydrographique avec une précision d'environ 0,5 mm sur la carte, soit 25m sur le terrain. Les statistiques conventionnelles de l'arbre hydrographique obtenu par analyse statistique et géo spatiale sous ArcGIS sont rassemblées au tableau suivant.

Tableau 7: Réseau hydrographique (BONG.I ; MEZIANI.S, 2013).

Oued (cours d'eau)	Chélif	Souffay	Millet et Boutane	Deurdeur	Massine	Harreza	Djelida
Longueur(m)	59275.67	4305.85	30897	5171	6424	10273	5665
Direction d'écoulement	E-W	N _{NE} - SSO	E-W	SSO- NNE	SSE- NNO	SE-NO	ESE- ONO

Toutes les eaux issues des principaux affluents représentés par les Oueds de : Souffay, Boutane (au Nord), Oued Deurdeur et Harreza (au Sud), sont collectés en direction du centre de la plaine du Cheliff vers le principal Oued en question, ce dernier draine toutes les eaux du bassin versant du Cheliff vers l'exutoire. L'Oued Cheliff qui résulte de la réunion de ces cours d'eau, franchit une coupure entre Boughari et Boughar et abandonne les hauts plateaux pour pénétrer dans le tell. De Boughari Amoura (Dollfuss ville), il coule dans de profondes gorges et à partir des Djebels, suit la plaine d'Est en Ouest.

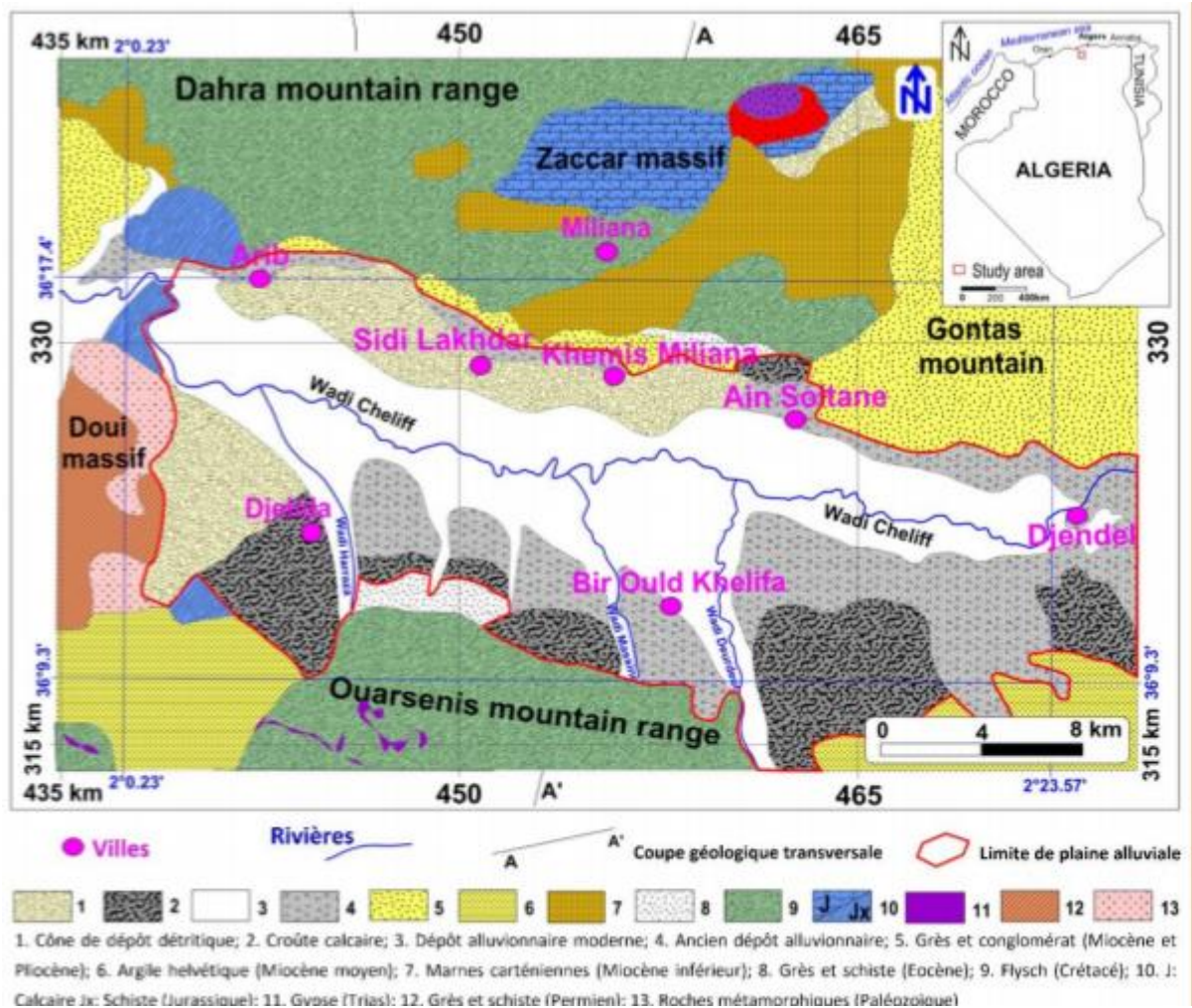
1.1.3 Contexte géologique

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

Le primaire est observé dans le massif de Zaccar et de Doui, et il est forme par l'alternance de schiste noire, d'argile et de quartzite. Il est surmonté par le trias qui se caractérise par des formations massives de gypse et de dolomites observé dans la montagne Ouarsenis. Le jurassique du massif de Zaccar est représenté par le calcaire, la dolomite et d'autres roches carbonatées. Cependant, les formations jurassiques du massif de Doui sont principalement constituées de calcaire dolomitique. L'épaisseur de jurassique peut atteindre 1000 m. Les affleurements crétacés sont observé sur les bords latéraux de la plaine, et ils sont principalement

représentés par une haute série de schistes néocomiens d'une épaisseur d'environ 1000 m et un schiste gris alternant avec des bancs de quartzite d'albain_ aptien, d'une épaisseur proche de 100m. Et il est suivi par le calcaire jaunâtre du sénonien. La formation miocène de 300 m d'épaisseur commence par le miocène inférieur qui est essentiellement formé de marne bleue et d'argile, suivi du miocène moyen représenté principalement par l'argile. La marne et quelques passages de grès et de conglomérats. Le Mio-pliocène est formé principalement de calcaire, de grès, de conglomérat et d'argile ; on l'observe surtout dans la montagne Gonats, avec une épaisseur d'environ 100 m.

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



comprises entre 622 m²/j et 19613 m²/j ; les valeurs les plus faibles sont localisées dans la partie sud de la plaine.

Les eaux souterraines de cet aquifère alluvial s'écoulent vers le centre de la plaine où se situe l'axe de drainage principal, qui coïncide avec l'oued Cheliff, avec un écoulement principal d'est en ouest. La profondeur de la nappe phréatique varie de 5 m dans la zone ouest (près des villes de Djelida et Arib) à 30 m dans la zone est (près de la ville de Djendel), tandis que dans la partie centrale de la plaine la profondeur des nappes phréatiques est d'environ 10 m (Bouderbala and Gharbi, 2017).

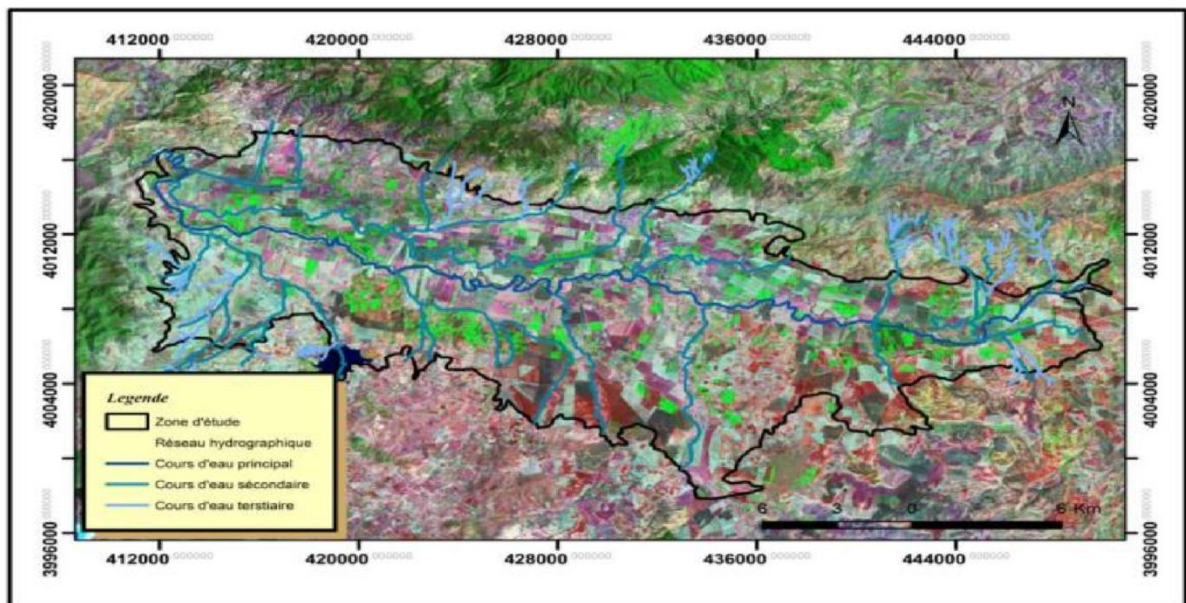


Figure 15: Réseau hydrographique sur le fond satellitaire .

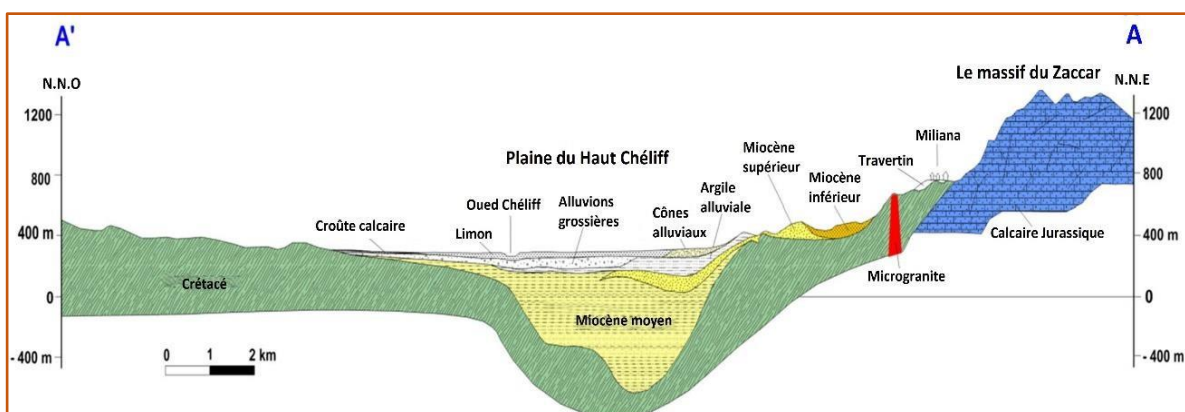


Figure 16: Coupe géologique A-A' de la plaine du Haut Cheliff. (Perrodon, 1957). Modifiée.

1.2 Les formations aquifères

La plaine alluviale du Haut Cheliff est un remplissage alluvionnaire d'âge moi-pli quaternaire, représenté par des dépôts alluvionnaires du Quaternaire et des grés et poudingues du Mio-Pliocène d'une épaisseur de 50 à 100 m au niveau de l'oued Cheliff. Les marnes constituent le substratum de cet aquifère. L'alimentation de cette nappe est assurée par infiltration des :

- Précipitations tombant sur la plaine.
- Eaux de ruissellement des oueds (Cheliff, Deurdeur, Harreza, etc ...) (Sogreah, 1984)
- Eaux d'irrigation excédentaires.

Les différentes formations à intérêt hydrogéologique sont représentées essentiellement par :

a. **Les calcaires jurassiques.** Les calcaires jurassiques constituent un important réservoir qui se particularise par la présence des fissures représentatives d'un milieu approprié pour le stockage de l'eau souterraine. Toutefois, la densité de répartition mal connue de ses fissures pose d'énormes problèmes pour l'implantation des puits. Au massif de Zaccar, les calcaires n'affleurent que dans les parties élevées, on les rencontre au-dessous de la côte 750m (Mattauer, 1958).

b. **Les grés mio-pliocènes.** Ils sont observés à l'Est de la plaine sur Djebel Gantas, les grés pliocènes peuvent atteindre 200m d'épaisseur au Nord, en rive gauche ils sont inexistantes puisque les alluvions quaternaires sont discordantes sur le Miocène marneux (Mattauer, 1958).

c. **Les alluvions quaternaires.** La nappe alluvionnaire constitue le plus important aquifère ; elle est caractérisée essentiellement par des alluvions grossières et galets au centre de la vallée avec une épaisseur de 50 et 145m, une couche d'argile et de limon recouvre les alluvions grossières au Sud-Ouest avec une épaisseur de 7 et 20m. Cette nappe alluvionnaire est disposée sur un substratum d'argile parfois graveleux ou de marnes (Mattauer, 1958).

Nous signalons que les deux aquifères (alluvions quaternaires et grés miocènes) sont séparés par un niveau imperméable.

1.2.1 Etude Piézométrique

Dans le but d'étudier le comportement hydrodynamique de l'aquifère quaternaire du haut Cheliff, nous avons exploité des mesures piézométriques de l'ANRH effectuées en 2016.

L'inventaire réalisé par l'ANRH recense un réseau moyennement dense réparti sur toute la plaine du Haut Chélif. Il comporte 16 puits et 02 piézomètres.

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 des eaux souterraines, les zones d'alimentation et de dépressions, et permet d'avoir aussi une idée sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère.

La cartographie piézométrique a été illustrée sur la base des relevés piézométriques des campagnes basses eaux et hautes eaux 2016, par interpolation selon la méthode l'inverse distance (IDW).

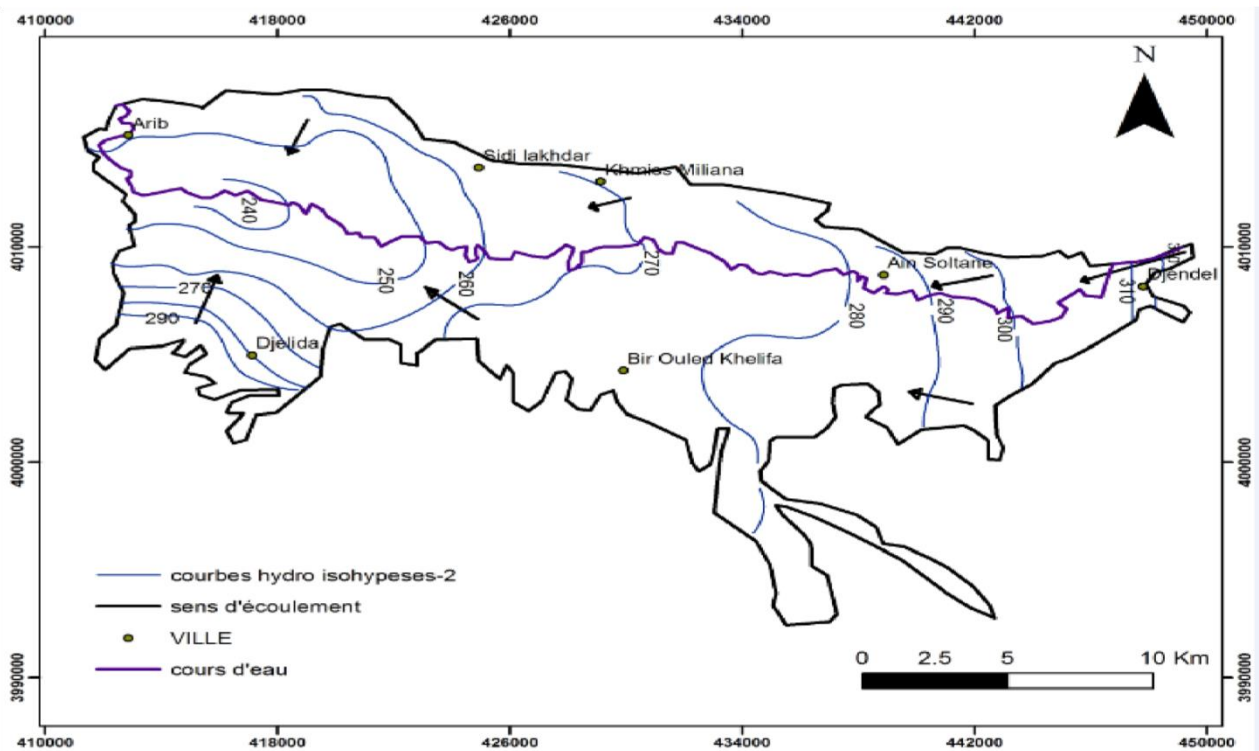


Figure 17: Carte piézométrique de la nappe alluviale du Haut-Chélif.

(Période des hautes eaux, Avril 2016)

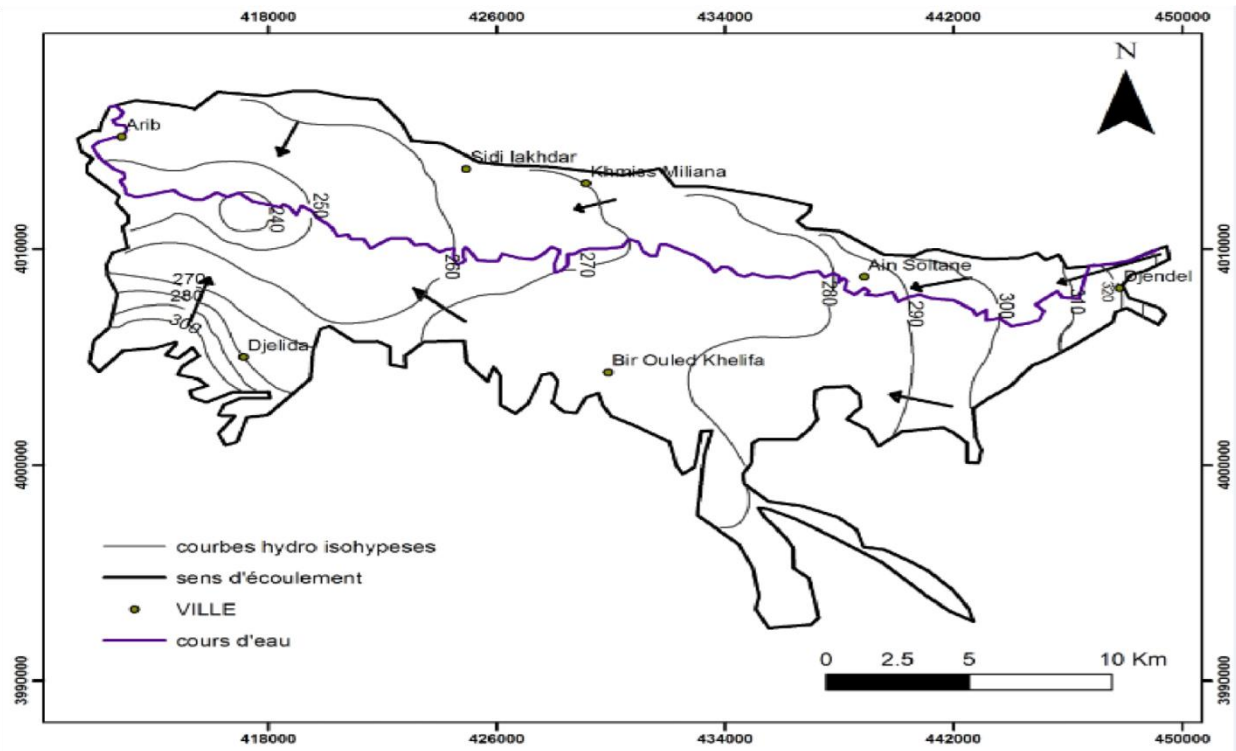


Figure 18: Carte piézométrique de la nappe alluviale du Haut-Chélif.

(Période des basses eaux : Octobre 2016)

1.2.1.1 Interprétation de la carte piézométrique

L'analyse de la carte piézométrique de la période des hautes eaux (Avril 2016) montre que la circulation des eaux souterraines dans la nappe alluviale de Khemis-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 près de la ville de Djendel due à la remontée du substratum et montre aussi une alimentation de cette nappe dans cette zone. Alors que dans la partie sud-est, dans la région de Djelida, un gradient hydraulique de l'ordre de 0,08 a été observé, il est expliqué par la remontée du substratum et de faible épaisseur de l'aquifère. Dans la partie centrale les courbes iso-pièzes sont espacées avec un gradient hydraulique de 0,008 il est expliqué par la faible pente du substratum et aussi par l'importante épaisseur de l'aquifère. Cette carte, ne montre pas une nette relation entre les deux plans d'eau (souterraine et de surface) (**Fig. 17**).

La carte piézométrique de la période des basses eaux (Octobre 2016) montre les mêmes conclusions que celle faite sur la carte précédente (période des hautes eaux), avec la même morphologie. Néanmoins, une diminution de niveau d'eau dans l'ensemble de la nappe a été

observée, et cela est due à l'influence de l'exploitation qui s'accompagne avec l'absence recharge durant de l'été, de Mai à Septembre (**Fig. 18**).

1.2.1.2 Hydro-climatologie

La température est un des éléments fondamentaux dans l'établissement du bilan hydrologique et dans la détermination du caractère climatique d'une région. Les données existantes sont celles des stations gérées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).

La plaine de KHMIS MILIANA est caractérisée par un climat semi-aride méditerranéen, avec un été chaud et sec (influences sahariennes), et un hiver froid et pluvieux (avec des influences méditerranéennes). La température moyenne annuelle et les précipitations sont de 19°C et 390mm respectivement (1980-2014).

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

L'étude pluviométrique de la plaine de Khemis-Miliana est basée sur les données de quelque station, ces données proviennent de l'ANRH pour une période de 34 ans assurée par ONM (Sahraoui, 2015). Les (**Fig. 19** et **Fig. 20**) portes les valeurs moyennes mensuelles (en mm) de la pluviométrie enregistrée pour les neuf stations existant dans la région durant la période allant de 1980 à 2014.

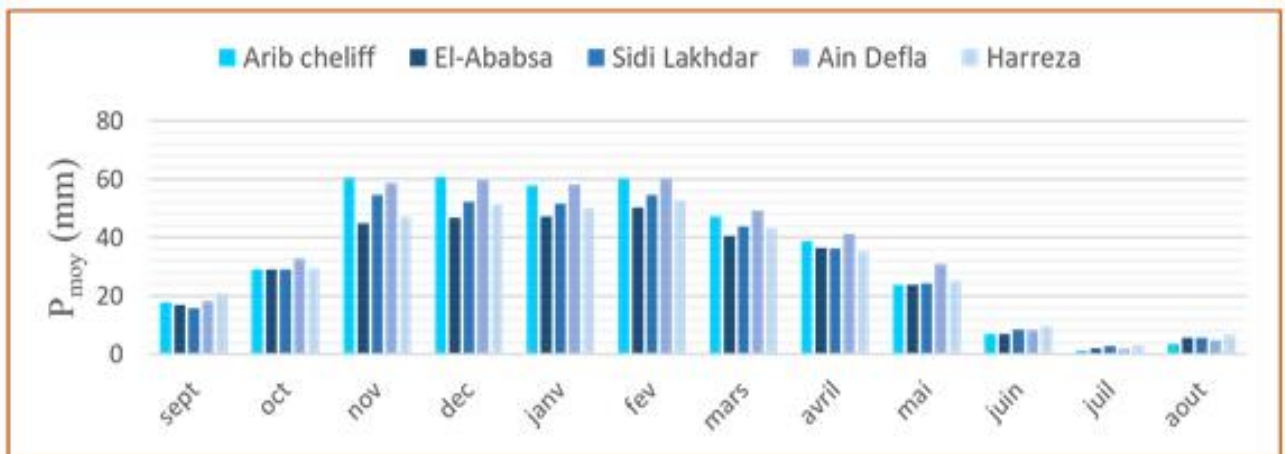


Figure 19: Répartition mensuelle des Précipitations (1980-2014) (1).

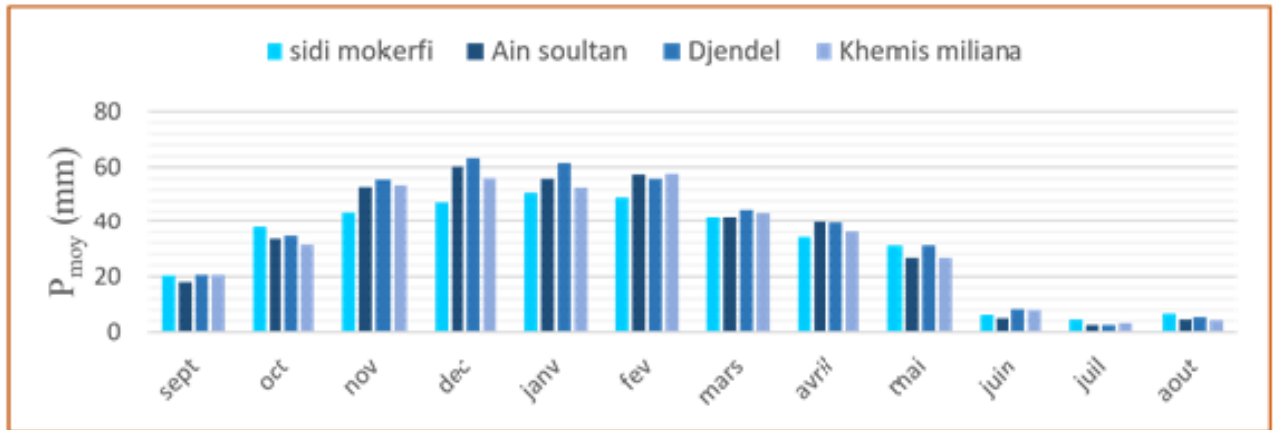


Figure 20: Répartition mensuelle des Précipitations (1980-2014) (2).

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

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

Nous pouvons aisément, distinguer quatre saisons de l'année :

- ✓ Un automne, s'étalant du mois de septembre au mois de novembre, avec une température moyenne saisonnière de 23,16 C° ;
- ✓ Un hiver, qui s'échelonne du mois de décembre au mois de février, avec une température moyenne mensuelle de 12,41 C° ;
- ✓ Un printemps, qui se développe du mois de mars au mois de mai, avec une température moyenne mensuelle de 19,12 C° ;
- ✓ Et enfin un été chaud, réparti du mois de juin au mois d'août, avec une température moyenne mensuelle qui atteint 30,91 C° ;

Nous pouvons conclure que, le secteur d'étude correspond à une zone semi-aride ou la température moyenne annuelle varie à la proximité de 21 , 42°C.

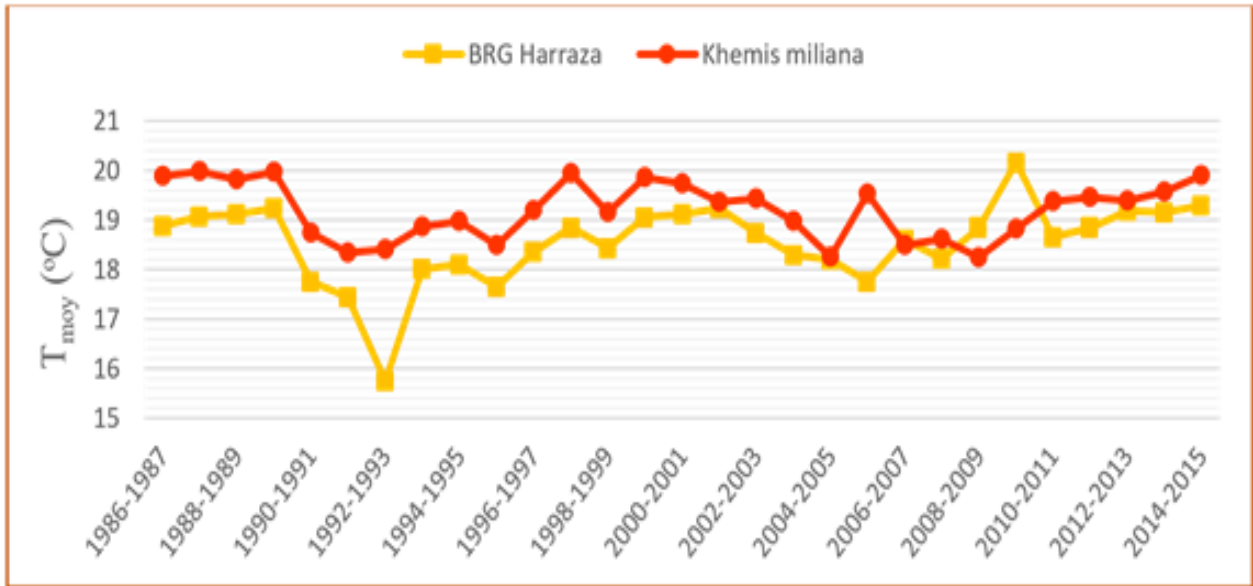


Figure 21: Variation spatio-temporelle des Températures Moyennes Annuelles (1980-2014).

L'analyse graphique des températures moyennes annuelles de la période 1980-2014, montre que la Température moyenne annuelle varie à la proximité de 19.98°C dans la station de Khemis Miliana pour l'année 1987 est 20.17 °C, pour la station de barrage Harreza de l'année 2009, la température minimale atteint 15.75 °C à l'année 1992, et qui correspond à une zone semi-aride. Les températures moyennes mensuelles calculées à partir des mesures portant sur la période de 28 ans d'observation (1986-2014) au niveau des stations du barrage Harreza et Khemis-Miliana sont représentées dans la (Fig. 22).

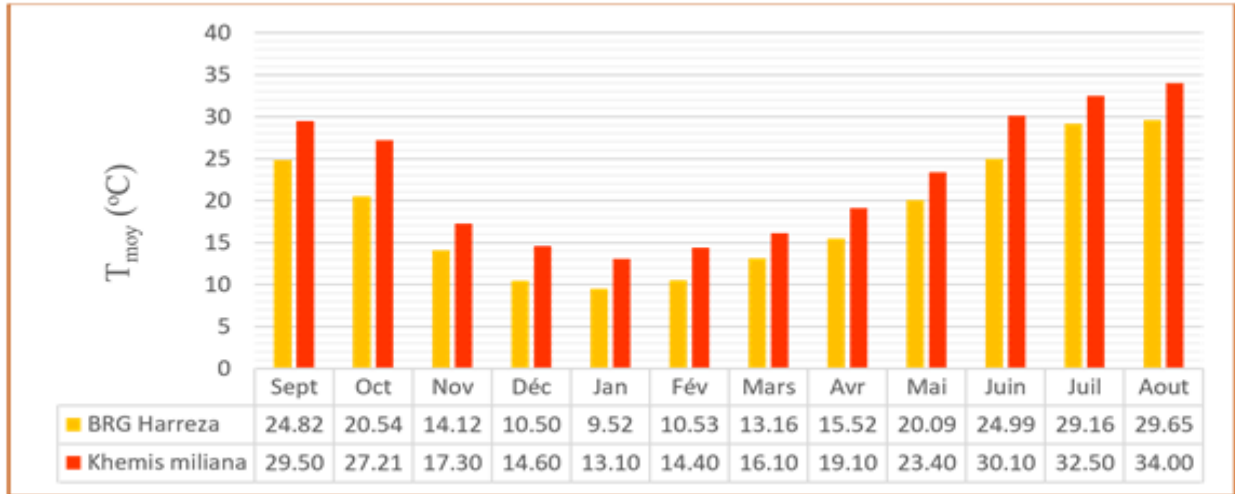


Figure 22: Histogrammes de Variations des Température Moyennes Mensuelles (1986-2014).

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

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

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

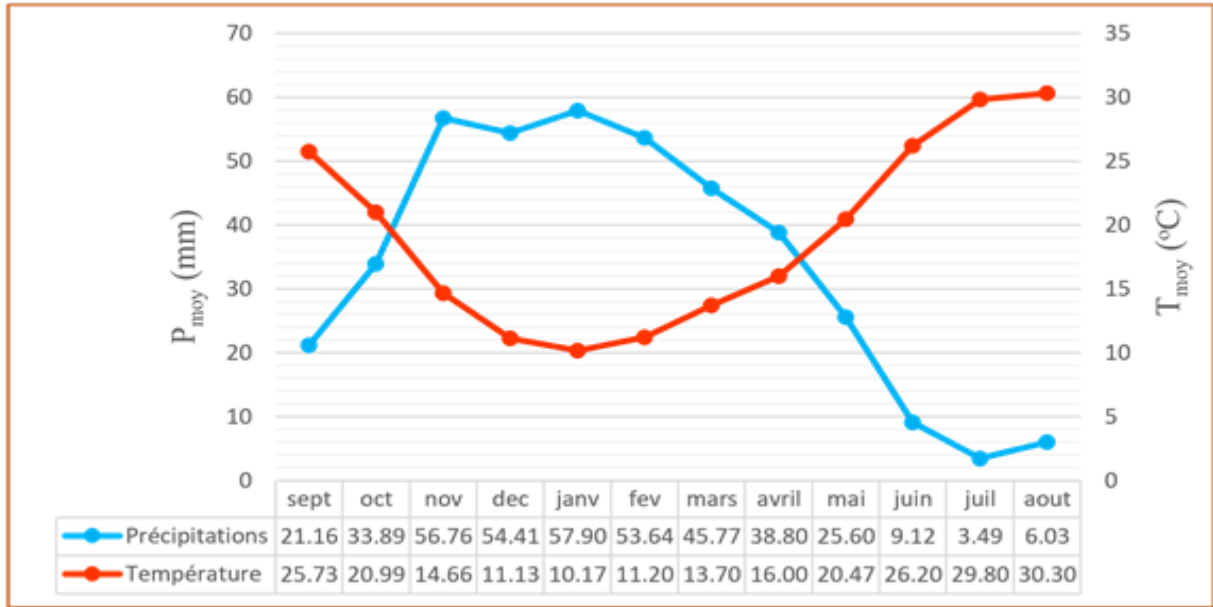


Figure 23: Diagramme Ombrothermique de Gausson, Station de Khemis (1986-2014).

1.2.2 Précipitations moyennes annuelles

Le tableau ci-dessous nous montre toutes les stations pluviométriques utilisées dans le calcul de la pluie moyenne annuelle ou module pluviométrique, de la zone d'étude. D'après l'analyse des données, la majorité des stations sont en observation continue au minimum 26 ans, pour la présente étude, les caractéristiques des stations hydrométéorologiques retenues sont résumées dans le tableau ci-dessous

Tableau 8: Caractéristiques des stations pluviométriques, d'après A.N.R.H Période (1981-2013).

Stations	Code	X(m)	Y(m)	Z(m)	Pm (mm)
Ababssa	01-17-15	414166,16	4002034,50	317	354,9
Arib Chellif	01-17-02	412561,16	4016440,25	230	410,5
Khemis Miliana	01-17-17	431848,16	4012029,25	285	418
Barrage de Harraza	01-17-18	428376,88	4005240,25	315	373,1
Ain Sultane	01-15-12	437142,94	4010312,50	295	412,1
Sidi Lakhdar	01-17-11	425052,56	4013500,50	250	384,9
Ain Defla	01-18-04	407652,56	4013805,00	270	424,8
Sidi Mokrifi	01-16-06	436173,91	3988065,25	540	375,3
Bordj Emir Khaled	01-17-03	428853,28	3997638,50	500	335,7
Gherib Cheliff	01-14-07	460267,69	4002141,50	460	459,6

L'analyse temporelle des précipitations des stations pluviométriques d'Ain Sultane, nous

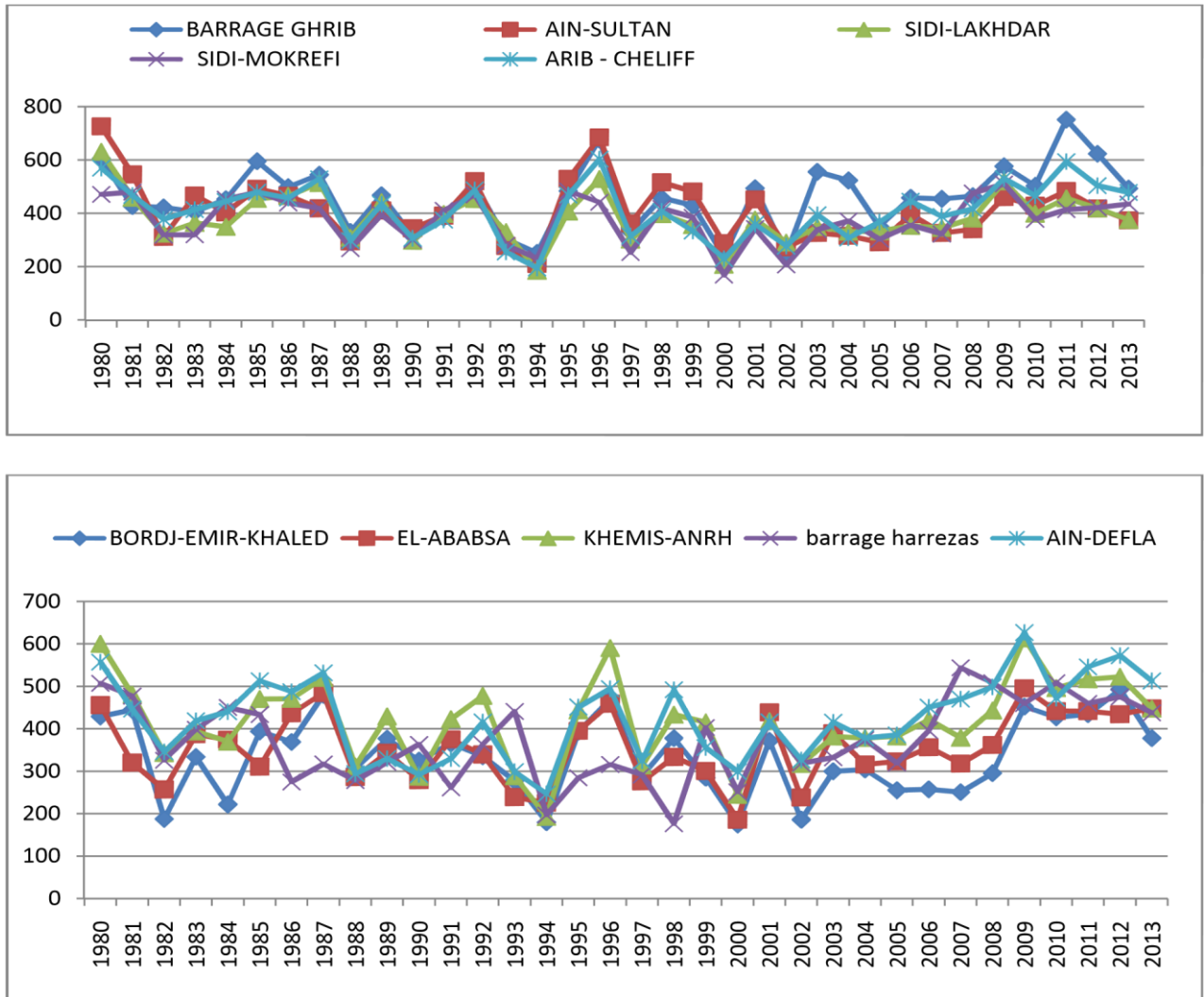


Figure 24: Variation temporelle des précipitations moyennes annuelles.

montre que l'année 1994 est l'année la plus sèche, tandis que celle de 1995 est la plus humide avec une précipitation annuelle de 684.5 mm pour une période qui s'étale de 1980-2013. Celle de la station de Khemis-Miliana, l'année 1994 est considérée comme la plus sèche pour la même station, les années 1996 et 2009 sont plus humides avec des précipitations annuelles de 590.5 mm et 612.9 mm respectivement. La station des Aribs Chélif nous révélait aussi que l'année 1993 est la plus sèche, celles de 1995 et 2010 sont les plus humides avec des précipitations de 602.5 mm et 612.9 mm. Et enfin la station d'El Ababsa, l'année 2000 est considérée la plus sèche, par contre, et pour la même station, les années 1987 et 1996 ont été identifiées comme humides avec des précipitations annuelles de 484.6 mm, 459.3 mm, respectivement (**Fig. 24**).

1.2.3 Litho-stratigraphie

La coupe lithologique transversale effectuée dans la plaine fait apparaître la dépression subsidence 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.
- Surmonté par un Miocène, mais n'affleurant pas ou très peu en surface ;
- 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 captive dans quelques endroits. **(BONG. N et MEZIANI. S, 2013).**

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

Les séries stratigraphiques de la plaine du Haut Cheliff s'étalent du Primaire jusqu'au l'âge du Quaternaire (**Fig. 25**).

- ✓ **Le Primaire** : est constitué d'une alternance des schistes noirs graphiteux et des bancs de quartzites et d'argiles.
- ✓ **Le Trias** : est généralement constitué des dolomies et des calcaires dolomitiques, il affleure dans le massif de Doui et de Zaccar.
- ✓ **Le Jurassique** : il est constitué dans le massif du Zaccar par des calcaires massifs, compactés, fracturés et karstiques, surmontés par des schistes gréseux et des marnocalcaires. L'ensemble de la série atteint une épaisseur de 700 m environ.
- ✓ Dans le Djebel Doui, le Jurassique est représenté essentiellement par des niveaux de calcaires dolomitiques d'épaisseur avoisinant à 80 m.

✓ **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 grès 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 plaine. 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 et calcaires et les 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, degrés 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 sont 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 affleure dans la partie nord-ouest du secteur et passant dans la partie supérieure 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 Soltane, cette série montre une épaisseur de 100 mètres (Batran.S, Mazaini.B, 2008).

✓ **Mio-Pliocène**

- 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, Mazaini.B, 2008)

✓ **Quaternaire ancien**

- 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, Mazaini.B, 2008).

✓ **Quaternaire récent**

- 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 (Batan.S. Mazaini.B, 2008).

Epaisseur (m)	Log	Lithologie	Age		Comportement Hydrogéologique
10 à 20		Limons et argiles	Quaternaire récent	Quaternaire	Semi - perméable
100		Alluvions grossières (grès et poudingues) Alluvions argileuses (sables, graviers, argiles)	Quaternaire ancien		Perméable
100		Argiles Grès et conglomérats	Pliocène		Imperméable
100		Grès et poudingues			Perméable
200		Argiles Grès et poudingues	Miocène supérieur (Vindobonien)		Imperméable
?		Calcaires			Perméable
300		Marnes	Miocène inférieur (Burdigalien)		Imperméable
1000		Grès et poudingues			Perméable
20		Calcaires	Eocène		Perméable
?		Grès et quartzitiques Argiles et schistes			Imperméable
?		Marnes et calcaires marneux	Sénonien		Imperméable
20à60		Calcaires et marnes calcaire	Cénomannien		Imperméable
1000		Schistes et bancs de quartzites	Albien		Imperméable
800 à 1000		Argiles schisteuses	Néocomien		Imperméable
1000		Calcaires	Jurassique		Perméable
?		Gypse et argiles	Trias		Semi-perméable
500		Schistes et quartzites	Permo-Trias		Imperméable

Figure 25: Log litho-stratigraphique et hydrogéologique de la plaine alluviale de Khemis Miliana (Mattauer 1958, Perrodon 1967)

Chapitre 3 : Matériels et Méthodes

Introduction Générale

Hydrogéologie spécialisée répondant à un besoin particulier et visant un public varié. Ces cartes peuvent combler des besoins d'inventaire et guider les organismes de réglementation à assurer une gestion globale de l'ensemble de la ressource en eau souterraine d'un territoire. Elles sont utilisées par les organisations intéressées pour se donner les moyens de mieux comprendre les dynamiques hydrogéologiques et par conséquent d'assurer la protection des nappes. Il est évident que cet outil doit trouver un intérêt auprès des aménageurs pour mieux gérer les territoires et réviser leurs schémas d'aménagement.

Il faut noter que la cartographie de la vulnérabilité à la pollution permet d'identifier les zones à haut risque de contamination, indépendamment du type du polluant. Elle devrait en principe conditionner les plans d'occupation des sols ou du moins permettre de cibler les zones où des mesures rigoureuses de protections devraient être adoptées et ceci dans le cadre de la prévision des propagations des polluants à partir d'aménagements ou d'exploitations existantes ou projetées.

1 Présentation de la méthode SINTACS

La méthode SINTACS, développée par Civita (1994) (In Hamza, et Al, 2007), est la version italienne de la méthode DRASTIC avec des poids et des cotes différentes ; c'est une adaptation de cette méthode aux conditions méditerranées. Cette méthode de vulnérabilité verticale intrinsèque prend en considération les mêmes paramètres que la méthode DRASTIC. Un poids compris entre 1 et 5 est attribué à chaque d'eux, chaque paramètre est classé en plusieurs classes, dont chacune est associé à une cote variant de 1 à 10. L'acronyme SINTACS correspond aux initiales des sept facteurs suivant :

S : (Soggiacenzia) la profondeur du plan.

I : (infiltrazione) la recharge efficace de l'aquifère (infiltration)

N : (effeto di autoepurazione del non-saturo) l'effet de l'autoépuration de la zone vadose (zone non saturée)

T : (typologia dell'acopertura) le type de sol (texture de sol)

A : (caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero) les caractéristiques hydrogéologique de l'aquifère (typed'aquifère)

C : (conductibilità dell'acquifero) la conductivité hydraulique de l'aquifère

S : (l'acclivité de la superficie topographique) la topographie du sol

Chaque paramètre cartographie et classé en notes (de 1 à 10) et qui ont un impact sur la pollution. Des multiplicateurs de poids sont ensuite utilisés pour chaque paramètre afin d'équilibrer et d'améliorer leur importance. L'indice de vulnérabilité final SINTACS est une somme pondérée des sept paramètres et peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$I_{\text{SINTACS}} = \sum_{i=1}^7 P_{(i,7)} \cdot W_{(1,n)}$$

(Eq.1)

Où $P_{(1,7)}$ est le score des 7 paramètres utilisées et $W_{(1, n)}$ est le poids de chaque catégorie. Les cinq catégories de poids utilisés par SINTACS dépendent des caractéristiques hydrogéologiques (milieux poreux, fissurés ou karstifié) et aux conditions d'impact (environnement non contaminé ou urbanisé). Dans le même plan, les différentes catégories de poids dans tous les secteurs de notre région peuvent être utilisées.

Cette méthode consiste au fait qu'elle propose cinq scénarios différents :

- Scénarios **Impact Normal** : scénarios relatif aux aquifères constitués par des sédiments non consolidés avec une profondeur de la nappe qui n'est pas très élevée, localisés dans des zones à sol épais. Les zones relatives à ce scénario correspondent aux régions stables, de points de vue occupation des sols, avec existence ou non de terres cultivées, une utilisation faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et des périmètres urbains très dispersés.
- Scénarios **Impact Sévère** : correspond aux mêmes types d'aquifère soumis à une occupation des terres intensive, avec des terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, des implantations industrielles et urbaines denses, et des dépôts liquides et solides de déchets.
- Scénarios **Drainage Important à partir d'un réseau superficiel** : scénarios relatif aux zones où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un réseau superficiel d'eau.
- Scénarios **Terrains Très Karstifié**.
- scénarios **terrains fissuré**.

Tableau 9: poids attribués aux paramètres SINTACS dans les différents scénarios des méthodes.
(MOHAMED.H.H ET AL ,2008).

Scénarios paramètre	Impact normal	Impact sévère	Drainage important	karsts	Terrains fissurés
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

1.1 Cote attribuée à chaque paramètre de la méthode SINTACS

S		I		N		T		A		C		S	
Intervalles	Cote	Intervalles	Cote	Nature de Zone	Cote	Nature de sol	Cote	Nature d'aquifère	Cote	Range	Cote	Intervalles	Cote
0-13	10	0-30	01	Dépôt alluviale Grossier	8-9	Sol à faible épaisseur ou absent	9,8-10	Alluvion grossier	8-9	Gravier	10	0-5	10
1,3-2,6	09	30-50	02	Calcaire Krstique	9-10	Gravier pur	9,7-10	Karstique	4-7	Congloméra	6-9	6-10	8
2,6-3,9	08	50-80	03	Dolomie Fracturée (fissrée)	4-7	Sable pur	8,9-9,5	Alluvion d'un amont	6-8	Grés	7-4	11-20	5
3,9-5,6	07	81-100	04	Moyen a fin alluvion	6-8	Sol sableux	8-8,5	Sable complexe	7-9	Sol marneux	4-2	21-30	3
5,6-8,2	06	101-120	05	Calcaire fracturé	9-6	Schiste sableux	6,2-7	Grés, conglomér at	4-9	Sol terreux	3-2	>100	1
8,2-10,8	05	121-150	06	Complexe Sableux	7-8	Sableux terreux	5,5-6	Flysch (séquence turbidique)	5-8				
10,8-16,5	04	151-180	07	Grés- Conglomérats	4-9	Limons- schiste-sable	4,5-5,2	Marne, argile	1-3				
16,5-24,3	03	181-210	08	Roche plutonique fissuré	2-4	Sol limoneux	3,5-4,2						
24,3-41,47	02	211-250	09	Séquence turbiditique fissure	5-8	Limono- terreux	3-4						
41,47-100	01	251-300	10	Roche volcanique fissurée	8-10	Limoneux argileux	2-3						

1.1.1 Système de cotation

L'indice SINTACS est basé sur l'évaluation des sept paramètres (la profondeur « **S** », l'infiltration « **I** », la zone non saturée « **N** », la texture de sol « **T** », type d'aquifère « **A** », la conductivité hydraulique « **C** », topographie du sol « **S** »). attribue un poids relatif à chaque paramètre, la valeur correspondante, compris entre 1 et 5, plus son importance dans le processus d'attribuée au paramètre de référence 5 et une pondération de 2 est attribuée au paramètre ayant le moins d'effet sur le devenir des polluants (**voir tableau 08**).

La classe 1 correspond aux conditions les moins sensibles, tandis que la classification 10 reflète

A partir de celui-ci, l'indice SINTACS partiel de chaque paramètre est obtenu en multipliant sa cote par son poids relatif.

Indice partiel = poids * cote

L'indice SINTACS global résulte de la somme pondérée des indices partiels correspondant à chaque paramètre.

Indice SINTACS général est le suivant :

$$I_S = (S_c \cdot S_p) + (I_c \cdot I_p) + (N_c \cdot N_p) + (T_c \cdot T_p) + (A_c \cdot A_p) + (C_c \cdot C_p) + (S_c \cdot S_p)$$

D'où :

S, I, N, T, A, C, S : Paramètres, **c** :
Cote du paramètre considéré,

S_c: Est la cote du paramètre S et **S_p** est son poids.

1.1.2 Interprétation de l'indice SINTACS

L'appréciation de l'indice SINTACS, n'est possible que par l'analyse comparative entre différents sites. A cet effet, un système de représentation offrant à l'utilisateur une visualisation immédiate du degré de vulnérabilité. Quatre (4) classes de degrés de vulnérabilité ont été identifiées selon les valeurs des indices de vulnérabilité.

Tableau 10: Critères d'évaluation de la vulnérabilité pour la méthode SINTACS (DANIELA DUCCI, 2010).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	41-105
Moyen	106-140
Elevé	141-186
Trés élevé	187-210

L'application de ce tableau consiste à comparer la valeur indicielle de chaque zone par le degré de vulnérabilité indique dans le tableau précédent. Les cartes obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'indice.

1.1.3 Cartographies des paramètres du modèle SINTACS dans la plaine alluviale de Khemis Miliana

Les données recueillies dans la plaine alluviale ont été traités à l'aide de plusieurs plateformes géo informatiques (ESRI ArcGIS , MapInfo, Surfer, RockWorks ... etc.). Ces donnée 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 Raster et complétés par des superpositions spatiales avec leurs attributs nécessaires. Il est évident de vous rappeler que toutes les couches d'information des paramètres du modèle-SINTACS ont été converties vers le mode Raster avec une résolution spatiale de pixel de 90 m pour chaque paramètre distinct. Le résultat final sera obtenu par la cartographie algèbre en utilisant la calculatrice-Raster incluse dans le module spatial analyste en se basant sur des requêtes mathématiques (addition des Raster pour chaque paramètre).

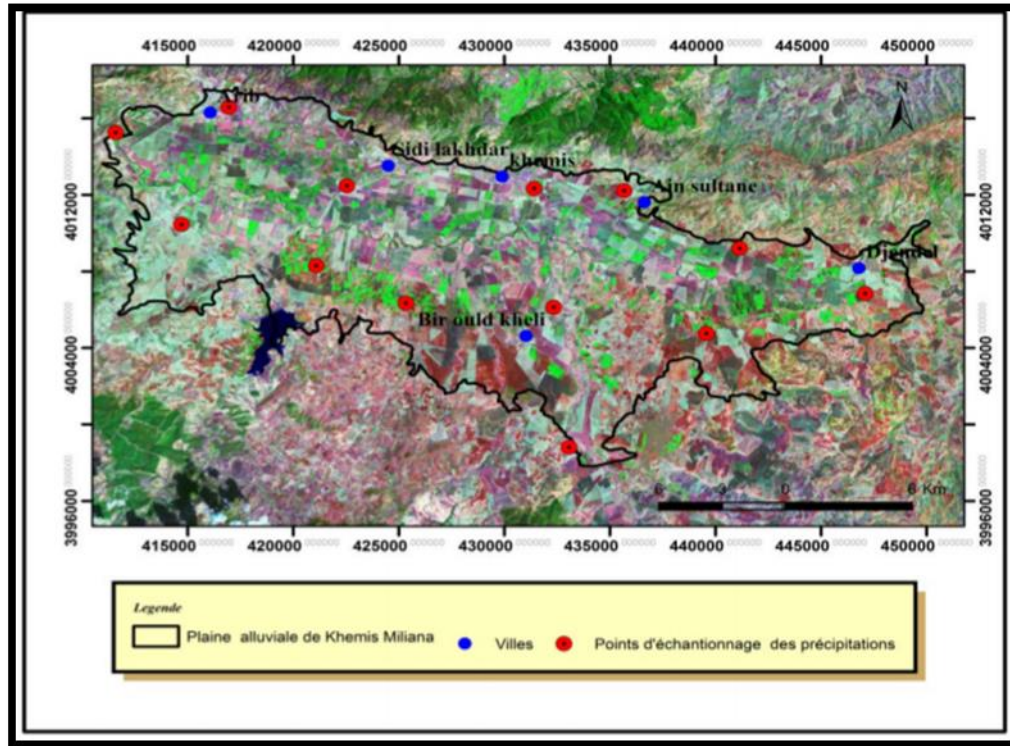


Figure 26: Répartition spatiale des points d'échantillonnage des précipitations destinés Pour l'analyse des chlorures dans la zone d'étude

1.1.3.1 Profondeur des eaux souterraines (S)

Par rapport à ce paramètre, la méthode de SINTACS indique qu'une diminution ou augmentation sur la profondeur de plan d'eau souterraine, induit un élargissement sur l'épaisseur dans la zone non saturée.

Par conséquent, lors de la sélection des données à utiliser dans le modèle SINTACS, nous avons pris des valeurs moyennes annuelles de la profondeur des eaux souterraines de 36 points d'eau, répartis d'un façon homogène dans la plane pour la période de 2002 jusqu'au 2013, il nous a été nécessaire de tenir compte de la profondeur minimale des eaux souterraines qui a été pris 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 grand dans l'aquifère, mieux l'aquifère est bien protégé et vice versa.

Nous avons procédé à une méthode d'interpolation des valeurs de profondeur de 36 points d'eau par analyse géostatistique, sous la plateforme Spatial Analyst, la carte issue des profondeurs d'eau souterraine a été générée sous forme rastérisée avec un pixel de 90 m de résolution spatiale. (Voir Fig. 27 et 28)

1.1.3.2 Recharge efficace de l'aquifère (I)

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'infiltration efficace (recharge) dans notre zone d'étude a été calculé selon la méthode dite C.M.B Chloride Mass Blance (WOOD et SANFORD ,1995) selon l'équation suivante :

$$I = (p) \times (CI_P) / CI_{ES}$$

(Eq .2)

Ou :

I : le flux de la recharge en mm/an

P : en mm la précipitation moyenne annuelle pour la période qui s'étale de (1980-2013).

CI_P : La concentration des chlorures des précipitations en mg/L.

CI_{ES} : représente la concentration des chlorures des eaux souterraines en mg/L pour les basses eaux 2012.

Pour l'établissement de la carte de la répartition spatiale dans la région de ce paramètre, nous avons procédé à la réalisation de trois cartes et qui sont :

- Carte de la répartition spatiale des précipitations en utilisant la méthode de Thiessen par algorithme de triangulation pour les valeurs de précipitations des dix stations pluviométriques réparties dans notre zone d'étude.
- Carte de la répartition spatiale des concentrations de chlorure des eaux souterraines de 16 points d'eau échantillonnés par la méthode de Krigeage.
- Carte de répartition spatial de concentration de chlorures des précipitations tombée dans notre secteur d'étude, pour l'établissement de cette carte, nous avons procédé à réaliser une campagne d'analyse hydro-chimique pour déterminer les concentrations des chlorures dans les précipitation, 13 points pluviométrique ont été analysés dans

laboratoire de (chimie 3) de l'université de Khemis Miliana durant les mois de mars et avril des années 2014 et celle de 2013, période où les précipitations sont abondantes, en suivant le cycle pluviométrique de la région. L'échantillonnage a été basé sur un maillage qui recouvre presque toute la zone d'étude, avec une bonne répartition spatiale et une accessibilité facile durant les prélèvements. (voir Fig. 26)

Au total, un nombre de 13 échantillons a été fixé et plus tard réalisé, en tenant compte de la bonne répartition spatiale dans le secteur étudié. L'emplacement géographique des points d'échantillonnage couvre les parties Amont, aval et centrale de la plaine pour en fin avoir un bon résultat sur l'objectif visé.

Les valeurs de la concentration des chlorures des précipitations ont été interpolées par la méthode de Thiessen et converties elles-mêmes en mode Raster.

Des requêtes mathématiques sous Spatial Analyst et Raster Calculator ont été exécutées (multiplication et division des Raster) pour en obtenir la carte finale de la répartition spatiale de la recharge en mm/an (Voir Fig. 29 et 30)

1.1.3.3 Effet l'autoépuration de la zone vadose (N)

Une fois que la profondeur de l'eau soit connue, il est possible de procéder à une division initiale en sous zone non saturée. Après avoir déterminé l'épaisseur de la zone non saturée et les variations lithologiques relatives de la stratigraphie hydrogéologique de la région.

Pour déterminer la répartition spatiale de ce paramètre, nous étions obligés de passer par des consultations des logs litho-stratigraphiques existants dans la région et de plus de 29 logs de forage, en étudiant leurs variations lithologiques sous Excel, des interconnexions ont été exécutées entre ce dernier, MapInfo et Rock Works, pour suivre les variations latérales des faciès lithologiques, il nous a été indispensable de passer à la modélisation tridimensionnelle sous Rock Works, les passages lithologiques dans la région ont été extraits sous forme polygonale.

(Voir fig. 31 et 32)

1.1.3.4 Type de sol (T)

Le sol est en fonction de l'abri du sédiment qui le recouvre joue un rôle très efficace sur la capacité de ralentir et/ou de retenir la vitesse des polluants à travers le système hydrogéologique, très important pour l'estimation de la vulnérabilité. Le sol est souvent représenté comme un environnement convenable pour l'accumulation et la transformation de matière. (Voir Fig. 33)

La carte pédologique de la plaine alluviale d’Afferville (**J.BOULAINÉ ,1995**) a été vectorisée sous la plateforme ArcGis dans le format. SHP. Un reclassement a été attribué à chaque type de sol de telle façon, que cette manipulation nous a permis à réduire le nombre de polygones typologiques du sol à moins de 10 classes.(**Voir Fig. 34**)

1.1.3.5 Caractéristiques hydrogéologiques de l’aquifère (A)

L’élaboration des données relatives au paramètre A (milieu_ aquifère) suit le même parcours que celui de l’élaboration du paramètre N (zone vadose). Compte tenu de l’hétérogénéité partielle de la zone saturée, qui a également eu lieu pour l’analyse de la zone non saturée et l’étude de la carte géologique vectorisée de la plaine d’Afferville nous ont permis de déterminer 4 formations importantes pour le paramètre A.(**Voir Fig. 35 et 36**)

1.1.3.6 Conductivité hydraulique (C)

La détermination du paramètre C est principalement basée sur l’élaboration d’une cartographie de la répartition des conductivités hydrauliques obtenues à partir des essais de pompage faits dans la plaine. Les données nous semblaient insuffisantes dès le départ avec 11 essais pompage, Logs stratigraphiques des forages et puits, les cartes hydrogéologiques d’Alger et celle d’Energoparc pour l’ensemble de la zone d’étude ont été aussi intégrés.

Les valeurs de la conductivité hydraulique ont été déterminées dans 26 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 Krigeage. (**Voir Fig. 37 et 38**)

1.1.3.7 Pente (S)

La pente de terrain est un facteur très important pour l’estimation de la vulnérabilité puis qu’elle définit la surface finale comme une partie de précipitation, et donc détermine les régions dans lequel il y a une plus grande possibilité pour que les polluants puissent s’infiltrer de la surface vers la nappe. Les plus grandes valeurs du paramètre S sont allouées aux pentes les plus douces ou la possibilité des polluants à se disséminer est réduite. En plus, la pente peut être une bonne indicatrice du type du sol et détermine indirectement la capacité du système hydrogéologique à retenir les polluants.

Pour la détermination des degrés de pente de la plaine, nous avons passé par le traitement du Modèle Numérique du Terrain (DEM) extrait et clipper à partir du DEM Nord-Algérie dont il est caractérisé par une résolution de 90 m, puis nous avons procédé à un reclassement en pourcentage de chaque grille de ce DEM dans la plateforme spatial Analyst. (**Voir Fig. 39 et 40**)

1.2 Cartographie de l'Indice de la Qualité des eaux souterraines (GWQI)

Plusieurs étapes ont été suivies pour le calcul de l'indice de la Qualité des eaux souterraines l'IQES. Ce dernier est une somme pondérée de plusieurs paramètres, un poids relatif a été attribué (W_i) pour chaque paramètre en fonction de son rapport d'importance dans la qualité globale de l'eau destinée en Alimentation en eau potable. Un poids maximum de 5 a été attribué au paramètre nitrate en raison de son importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau. Le poids relatif est calculé à partir de l'équation suivante

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \qquad S_{li} = W_i \times q_i \qquad q_i = (C_i/S_i) \times 100$$

$$WQI = \sum S_{li} \qquad \text{(Eq.3)}$$

Les valeurs calculées des poids relatifs W_i et les scores q_i , sont données dans le tableau en annexe.

S_{li} : est le sous-indice du paramètre ^{nième}.

q_i : est la notation basée sur la concentration du paramètre ^{nième}.

n : le nombre de paramètres

Où :

C_i : est la concentration de chaque paramètre chimique dans l'échantillon d'eau en mg/L,

S_i : est la norme de l'eau potable Algérienne pour chaque paramètre chimique en mg/L selon les lignes directrices de la norme algérienne fixée dans le décret. Un indice de qualité des eaux souterraines pour chaque échantillon a été calculé, en somme, 19 points de mesure ont été sélectionnés pour le calcul. Une spatialisations de cet indice par interpolation IDW a été générée.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

1 Etablissement de carte de la vulnérabilité selon le modèle SINTACS

La carte des indices de degré de la vulnérabilité SINTACS à la polluant des eaux souterraines de la plaine alluviale de Khemis Milian a été réalisé en se basant sur la cartographie de chaque paramètre individuellement, nous allons dans ce chapitre exposer et discuter les résultats de chaque paramètre :

2 Paramètre de SINTACS

2.1 Paramètre de Profondeur « S »

La profondeur est un paramètre très important dans le modèle SINTACS. A travers le relevé géographique statistique de la plaine alluviale de Khemis Miliana, les profondeurs des eaux souterraines ont été estimées : elles varient entre 1 m et 40 m de la plaine dans la partie centrale se caractérise par un seuil non fixe allant de 1 m et elle peut atteindre une valeur des 20 m les plus élevés localement, Oued Massine et Deurdeur.

Les profondeurs peuvent atteindre des valeurs maximales de 38 m dans la partie orientale de la zone d'étude vers le sud - est le long de la ville de Djendel.

En revanche, la partie ouest vers le sud-ouest de la ville d'Aris, la partie basse, se caractérise par de faibles profondeurs qui ne dépassent pas 10 mètres. (**Voir fig. 27**).

Les scores adéquats pour les intervalles de profondeur qui varient dans la zone d'étude avec les gammes : 1-10-20-30 et 30-40 m ont été reportés sur la carte représentant la répartition spatiale des profondeurs par des scores 6, 4,3 et 2, respectivement, avec un poids multiplicateur égale à 5 selon le scénario Normal pour le modèle SINTACS, choisi dans notre étude. (**Voir fig. 28**)

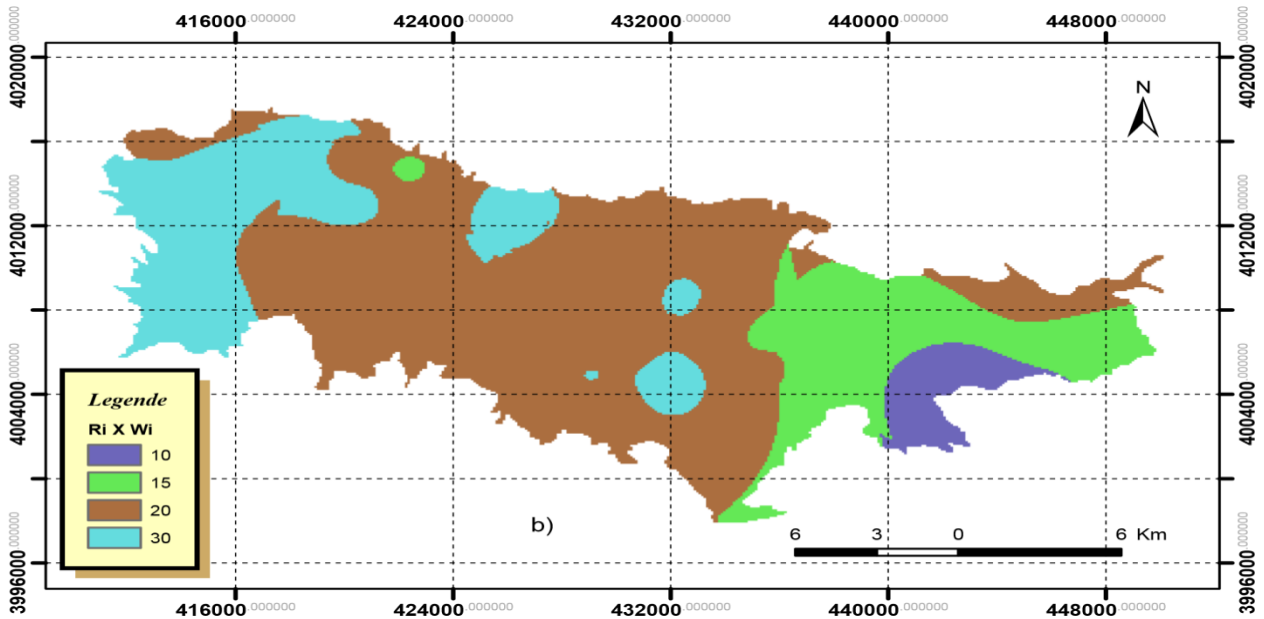


Figure 27: Répartition spatiale des profondeurs d'eaux souterraines de la Région d'étude

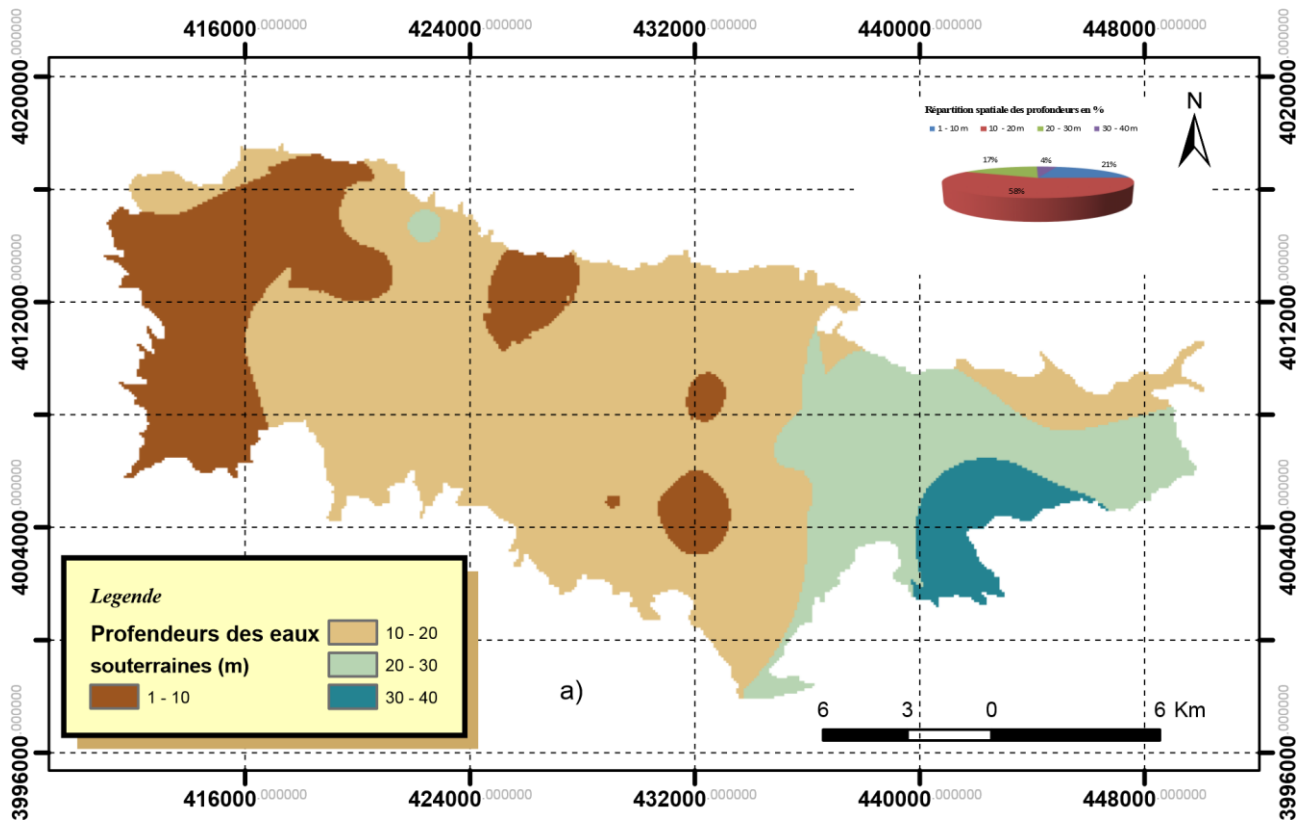


Figure 28: Répartition spatiale des profondeurs d'eaux souterraines assignées à leurs Rates et Poids.

2.2 Paramètre Recharge efficace de l'aquifère « I »

La répartition de la recharge dans cette zone est la suivante :

(15-37 mm/ an) représente les valeurs de recharge les plus élevées, localisée dans le nord de la plaine près de la ville d'Arib, et dans le sud-ouest près de Djebel Doui.

Quant aux valeurs les plus faibles, elles se situent au sud et au Nord-est, La région sud est caractérisée par une très faible recharge. (Voir fig. 29)

Puisque, les variations de la recharge dans toute la zone d'étude sont estimées à moins de 50 mm/an, nous avons leurs assignées un seul score égal à 2 avec un poids multiplicateur égale 4 selon le scénario Normal. (Voir fig. 30)

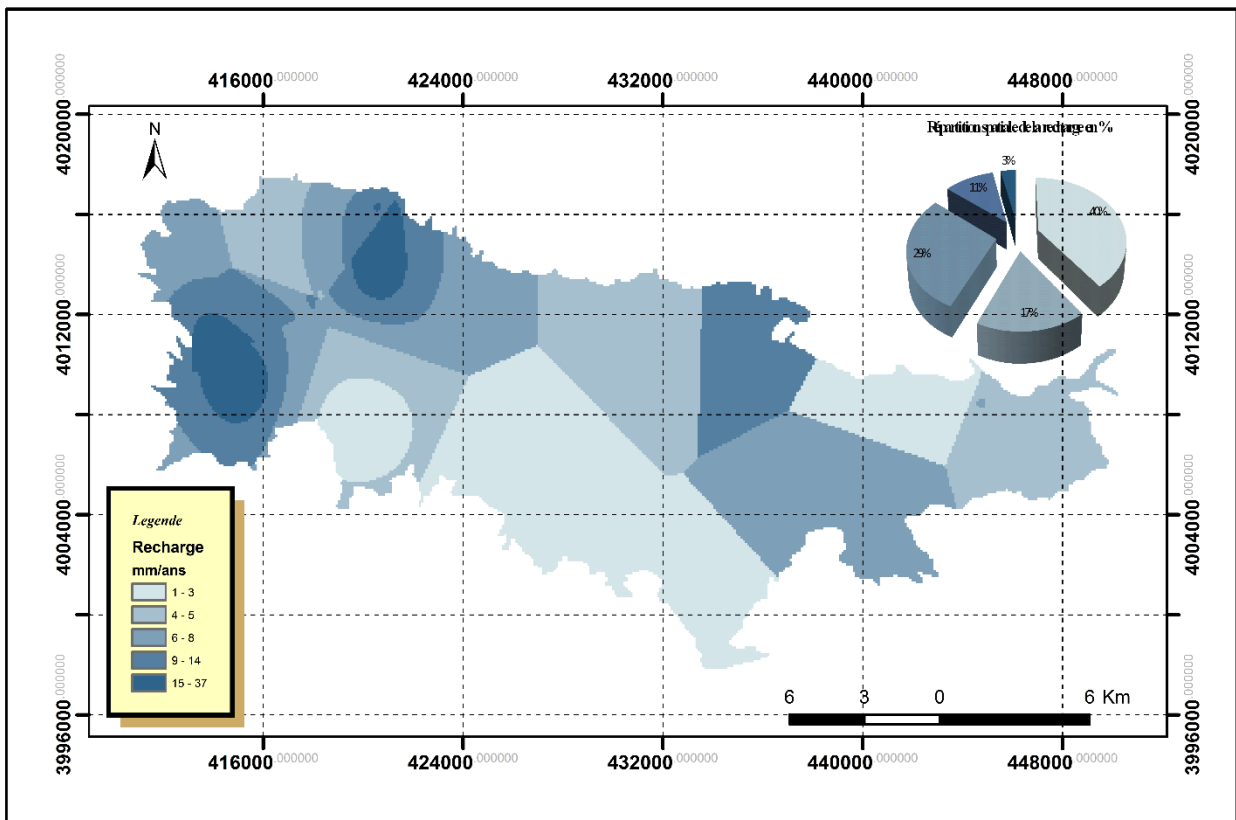


Figure 29: Répartition spatiale de la Recharge efficace de l'aquifère de la région d'étude.

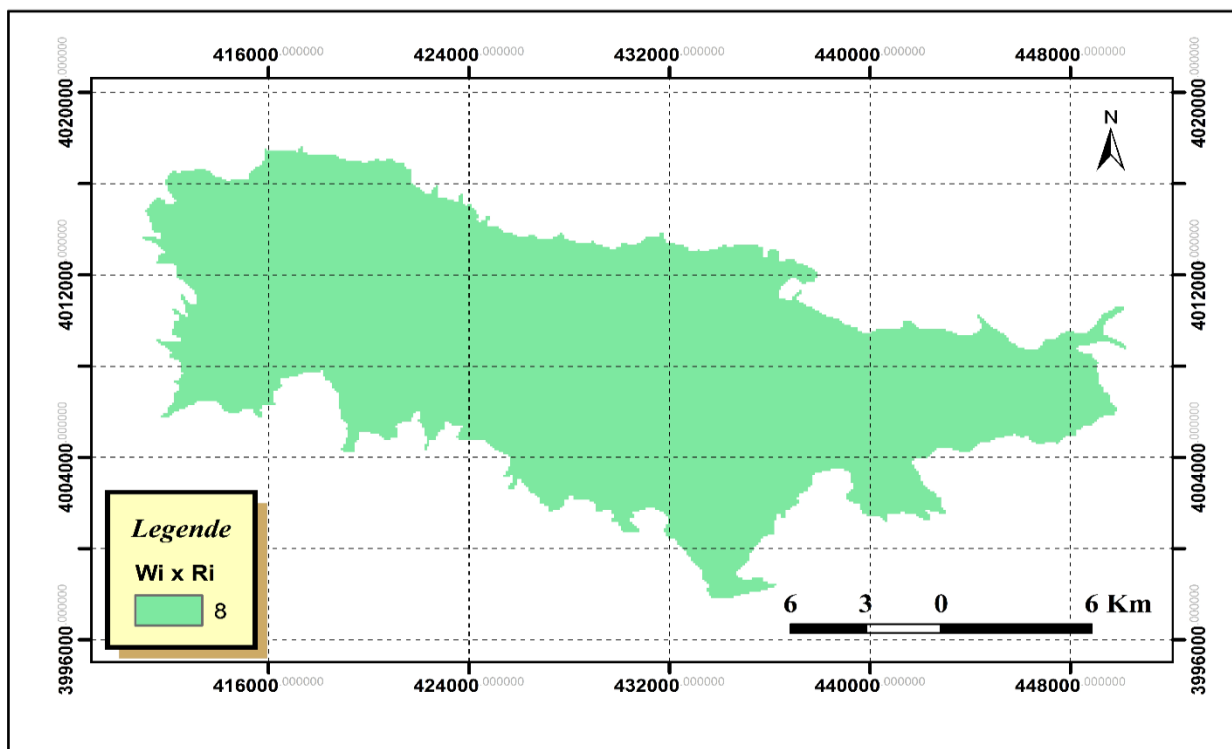


Figure 30: Répartition spatiale de la Recharge efficace de l'aquifère assignées à leurs scores et poids.

2.3 Paramètre de zone non saturée « N »

Du fait de la nature et de l'épaisseur de la zone comprise entre la surface de la terre et l'aquifère, l'effet de la zone saturée est un paramètre très important. La zone non saturée joue un rôle dans le contrôle de la vulnérabilité des aquifères à la pollution. Une classification de 5 entités lithologiques (voir Tableau 11) est établie :

- **La première zone** : représente 37,36% de la surface total ((134,32 Km²) et se caractérise par des Argile, limons et Argile-limons qui occupent le nord et aussi la région (Arib, Sidi Lakhedar, Khemis Miliana, Ain sultan, Djendel) du nord-ouest. Cette entité est caractérisée par un sous-indice 10
- **La deuxième zone** : Elle s'apparente aux argiles graveleuses et argiles-sableuse, qui s'étend le long de la partie centrale de la plaine, et représente 23,70% (85,15 Km²) Cette caractéristique a l'attribution du sub-indice 15.
- **La troisième zone** : Elle est située sur une petite partie au milieu de la plaine entre Djelida et Sidi Lakhedar et représente 2,92% de la surface totale de la plaine (10,52Km²) et cette zone est caractérisée par des graviers
- **La quatrième zone** : Représentée par le sub-indice 35, cette région est caractérisée par des graviers argileux qui recouvrent entièrement la partie sud de la plaine à proximité à région de Djelida, Bir Ouled Kheilifa 35,36% de la superficie totale (127,008 Km²)

- **La cinquième zone** : Il est situé dans le reste de la plaine. Il est caractérisé par des sables Argileux, occupant 0,66 % de la surface totale (2,38 Km²) avec un indice de 40.

Tableau 11: Classification spécifiques (cotes, poids) pour le paramètre « N ».

Nature de la Zone	Cote	Poids	Indice	Superficie (%)	Surface (km ²)
Argile et limons et argile limons	2	5	10	37,36	134,32
Argile graveleuse et argile sableux	3		15	23,70	85,15
Graviers	4		20	2,92	10,52
Gravier argileux	7		35	35,36	127,008
Sable argileux	8		40	0,66	2,38

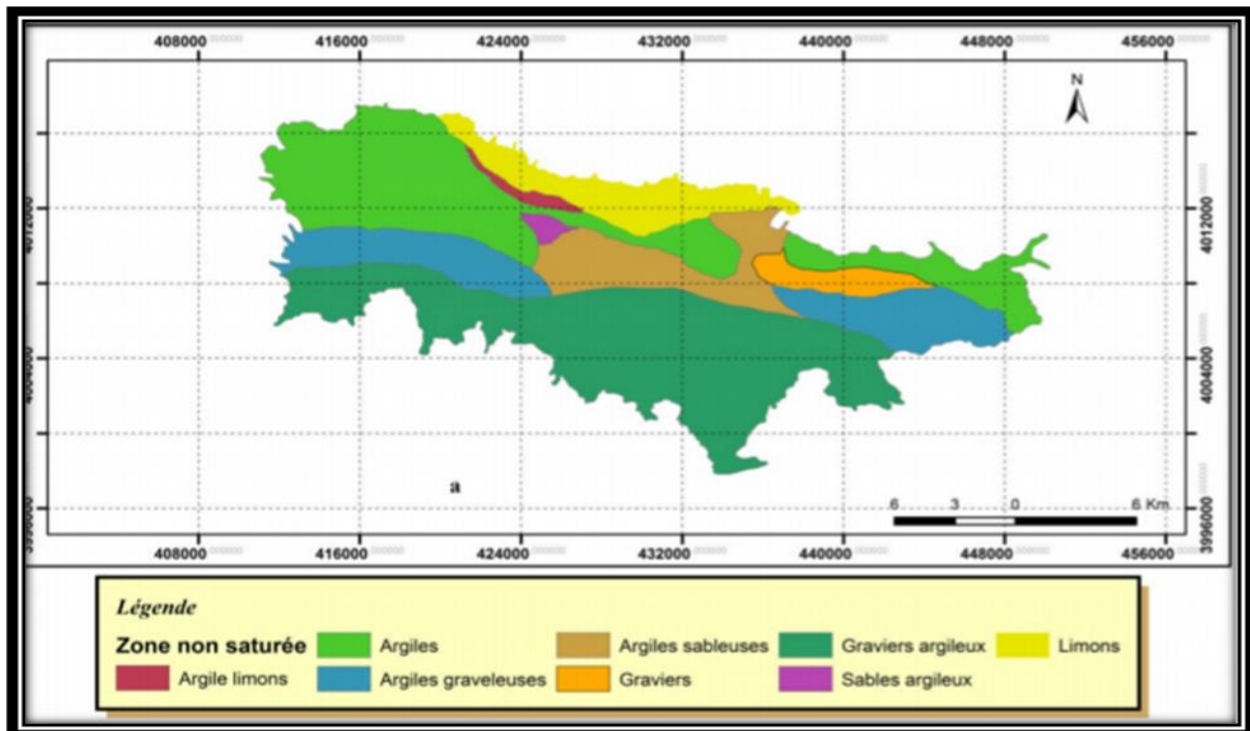


Figure 31: Répartition spatiale des zones non saturées de la région d'étude.

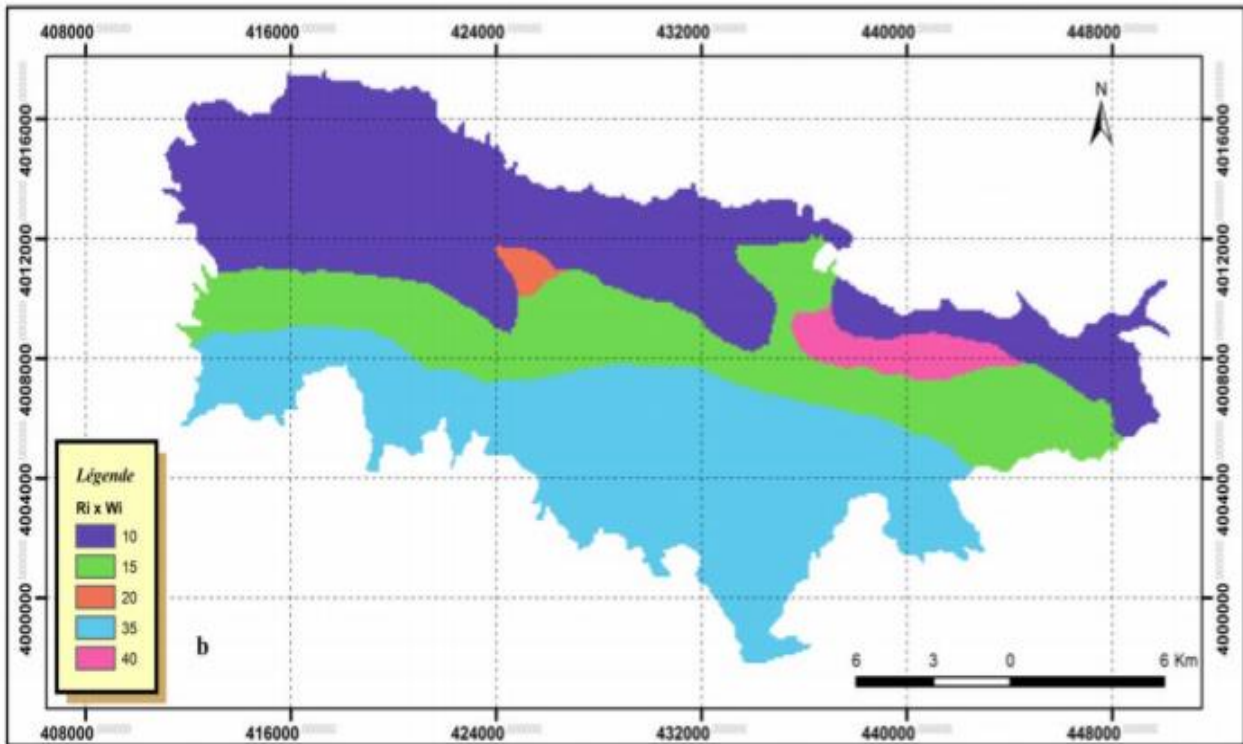


Figure 32: Répartition spatiale des zones non saturées assignées à leurs scores et poids.

2.4 Paramètre de texture de sol « T »

La description du sol constituant la plaine alluviale de Khemis Miliana a été réalisée à partir des cartes de sol (J .Boulaine, 1995). Ce paramètre joue un rôle très efficacement sur la capacité de ralentir et /ou de retenir la vitesse des polluants à travers le système hydrogéologique. Il est très important dans l'estimation de la vulnérabilité.

En observant et analysant la carte pédologique du sol de la plaine de Khemis Miliana, on voit l'émergence de plusieurs classes et types de sols, les principaux types de sol de la zone étudiée sont :

- ❖ Les limons argileux et argile
- ❖ Limons sableux
- ❖ Sol argileux
- ❖ Limons argiles et carapaces calcaires
- ❖ Sol sableux

Plus le sol est riche en Argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande.

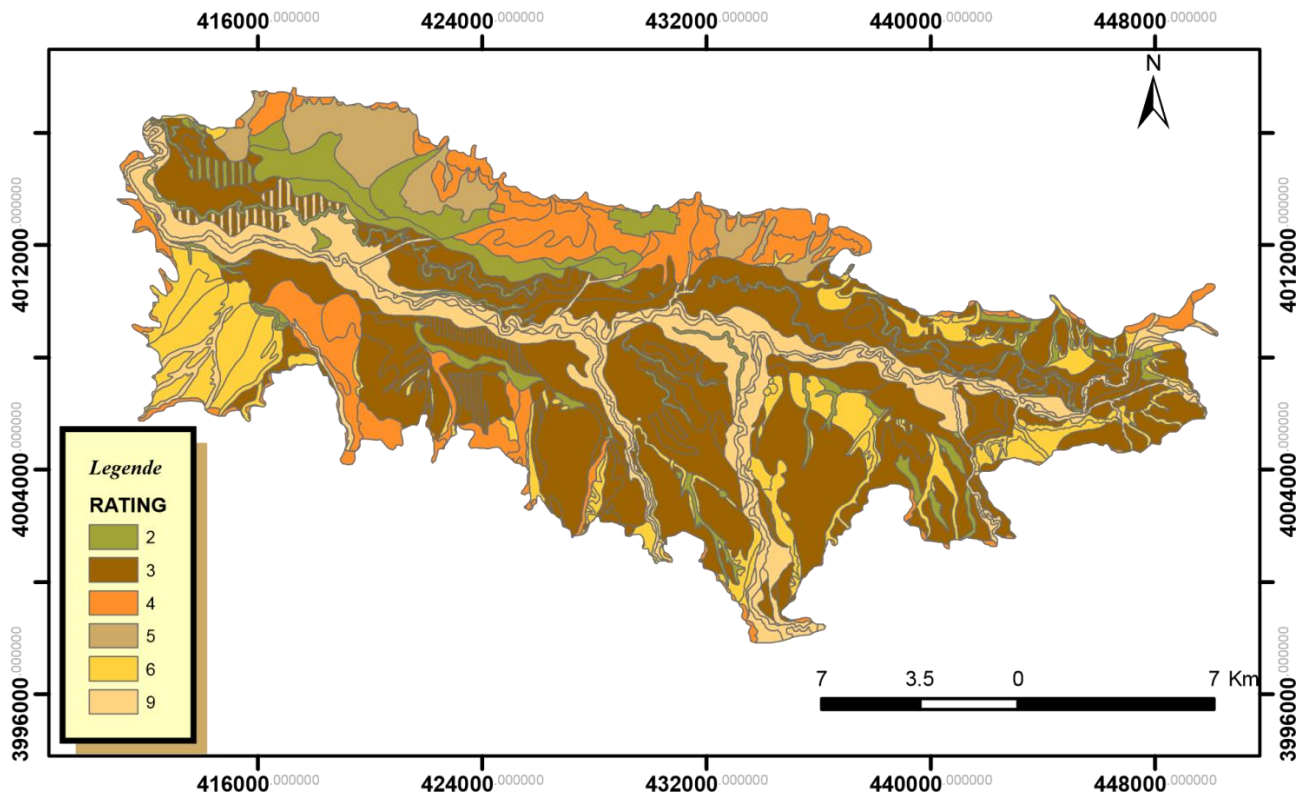


Figure 33: Répartition spatiale des types du sol de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

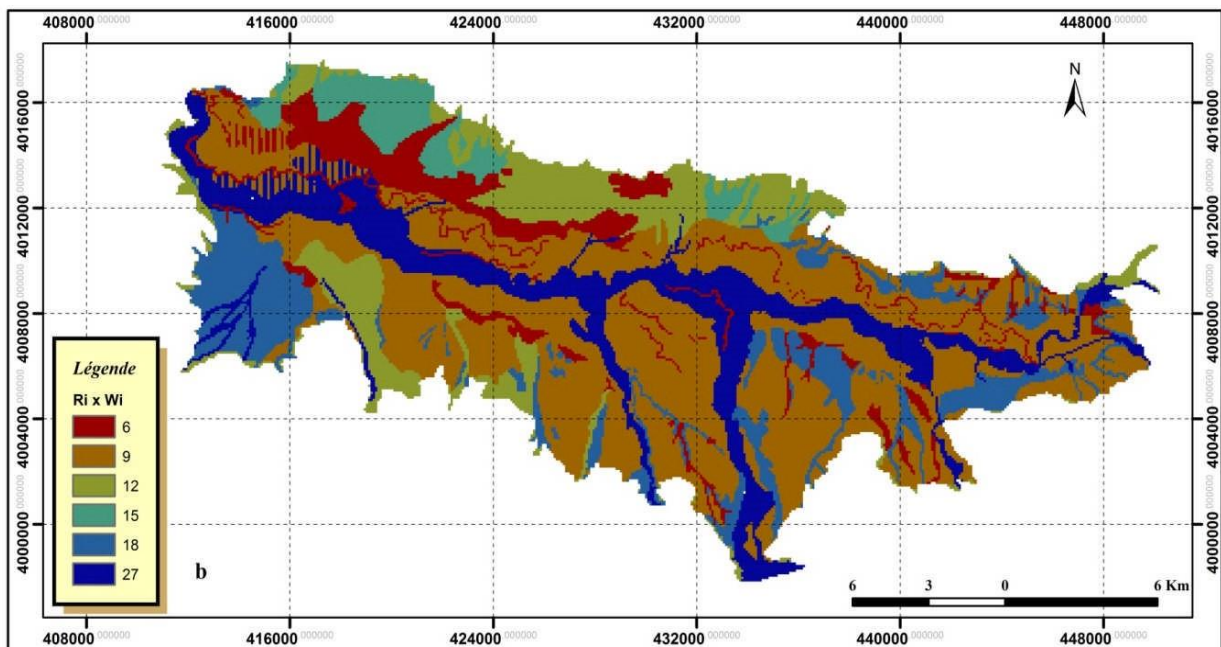


Figure 34: Répartition spatiale des types du sol assigné à leurs Rates et Poids de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

2.5 Paramètre de type d'aquifère « A »

Lors du calcul de l'indice partiel pour ce paramètre nous extrayant quatre (04) zones :

- 1) La première zone : il est représenté dans la zone des alluvions anciennes qui occupe 29,54% de la surface total de la plaine (106km²) avec un indice 21.
- 2) La deuxième zone : les alluvions récentes qui correspondent à l'indice est de 18. occupe 47,86% de la surface totale de la plaine (171,93km²).
- 3) La troisième zone : il est représenté les carapaces calcaires qui occupe 20,82% de la surface total de la plaine (74,79km²) avec un indice de 21.
- 4) La quatrième zone : cône de déjection qui correspond à l'indice 9 occupe 1,77% de la surface totale (6,36km²) réparti dans la région nord-est et sud-ouest.

Tableau 12: Classification spécifiques (cotes, poids) pour le paramètre « A ».

Nature d'aquifère	Cotes	Poids	Indice	Superficie(%)	Surface (km ²)
Alluvions anciennes	7	3	21	29,54	106,12
Alluvions récentes	6		18	47,86	171,93
Carapaces calcaires	9		27	1,77	6,39
Cône de déjection	3		9	20,82	74,79

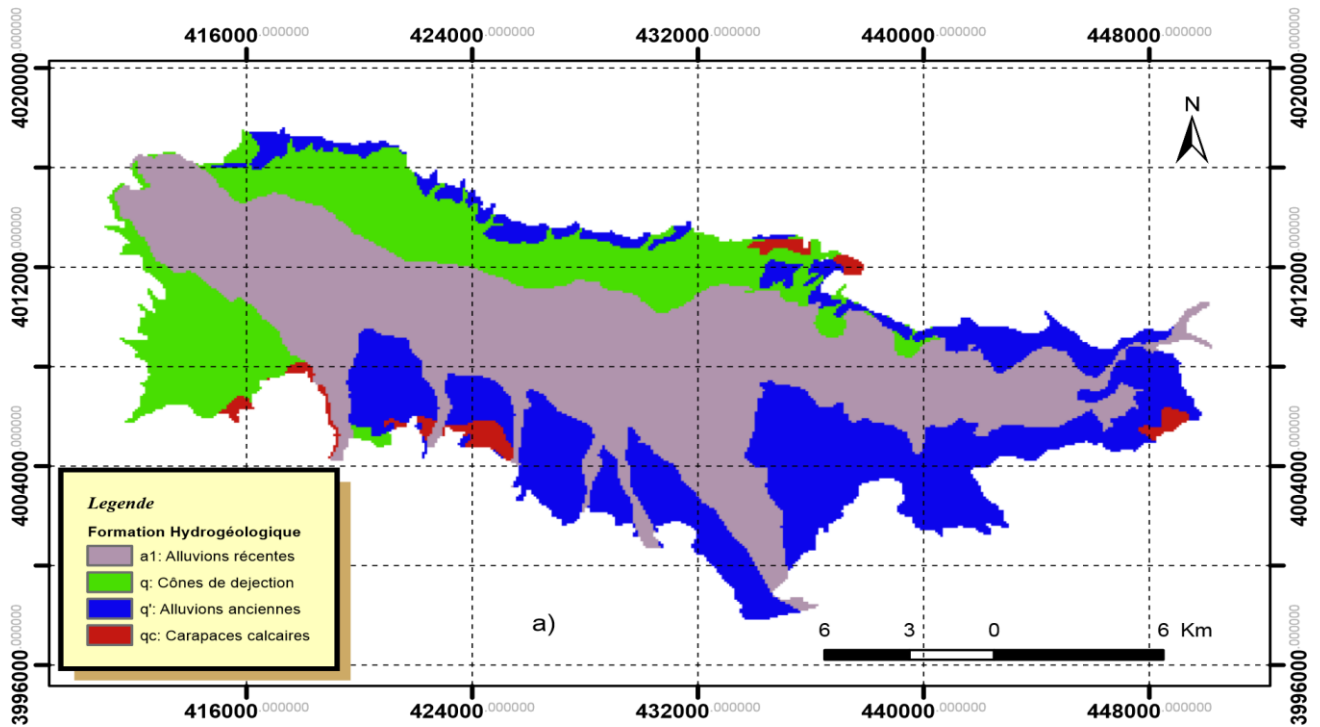


Figure 35: Répartition des formations hydrogéologiques de la Région d'étude.

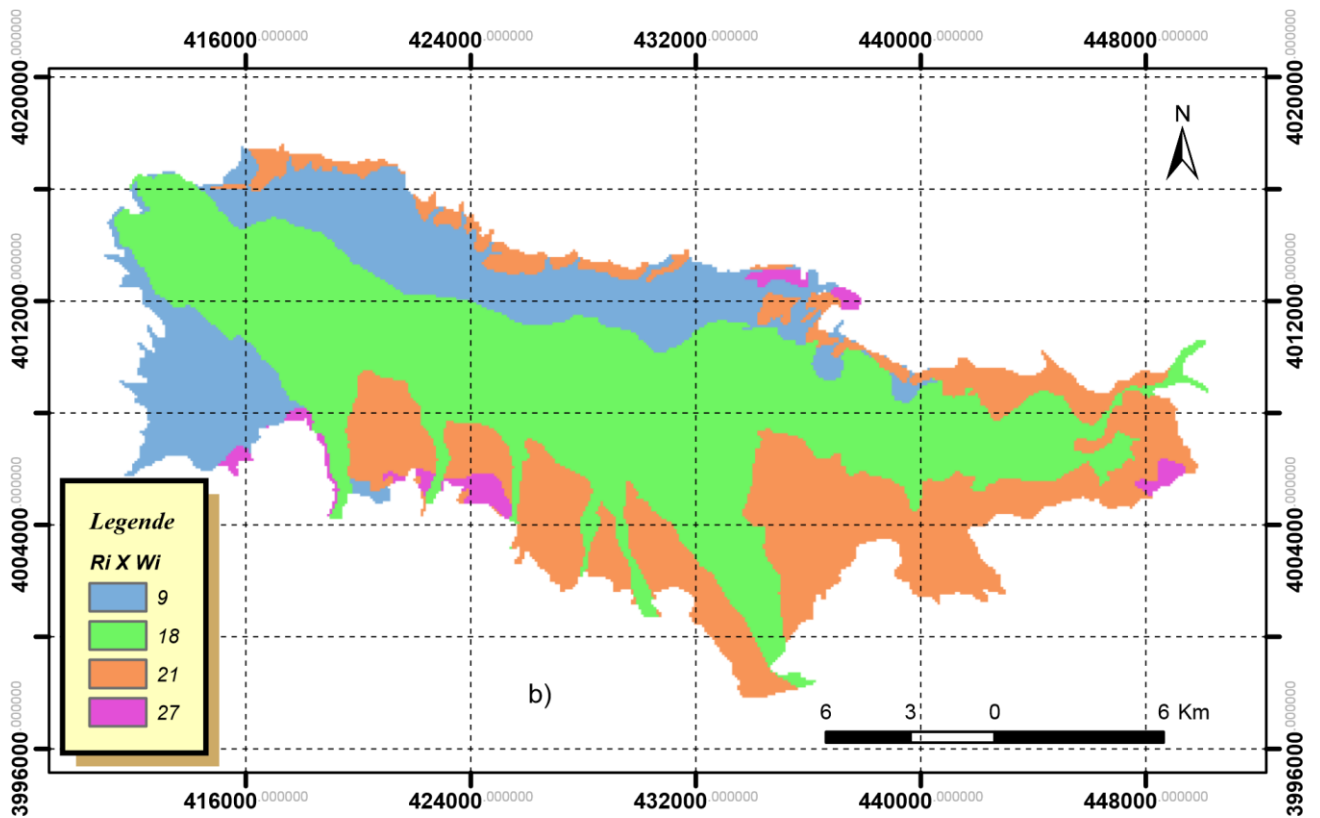


Figure 36: Répartition des formations hydrogéologiques assignées à leurs Rates et Poids.

2.6 Paramètre de la conductivité « C »

Il y a trois zones de conductivité hydraulique (perméabilité) sont distinctes dans la région d'étude. (Tableau 13)

- La première zone (19_ 34 m/j) dans la partie sud de la région « Bir ouled khelifa » marquée par l'indice 21, cette catégorie représente 35,50% de la surface totale de plaine (127,52km²).
- La deuxième zone (34 _ 50 m/j) ce dernier se distingue par l'indice 24 près de « Djendel » et une petite partie dans le centre de la plaine, elle occupe 50,42% de la surface totale (179,86Km²).
- La troisième zone (50_ 68 m/j) contrôler (occupe) le reste de la plaine avec un indice de 27 ce qui correspond à 14,42% de la surface de la plaine (51,8 km²).

Tableau 13: Classification spécifiques (cotes, poids) pour le paramètre « C ».

Conductivité (m/j)	Cotes	Poids	Indices	Superficie (%)	Surface (km ²)
19_ 34	7	3	21	33,50	127,52
34_50	9		24	50,42	179,86
50_68	8		27	14,42	51,8

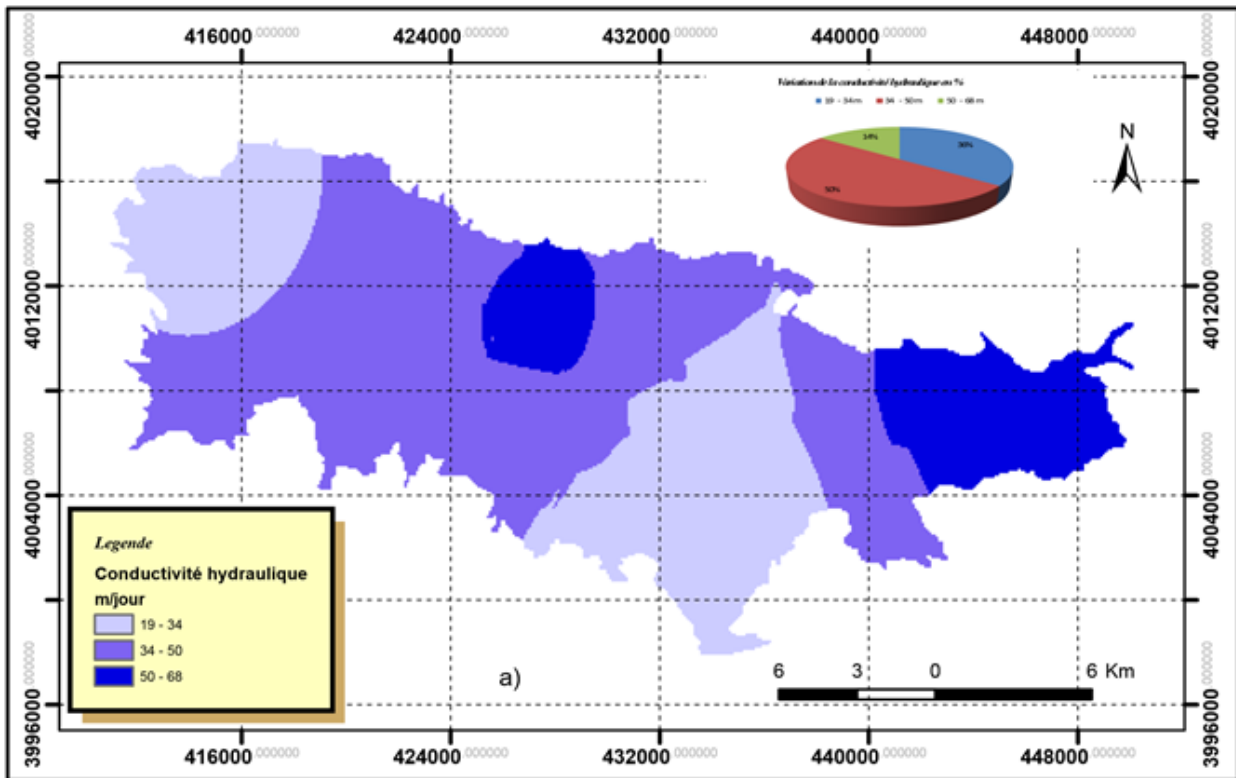


Figure 37: Répartition spatiale de la conductivité hydraulique dans la zone d'étude.

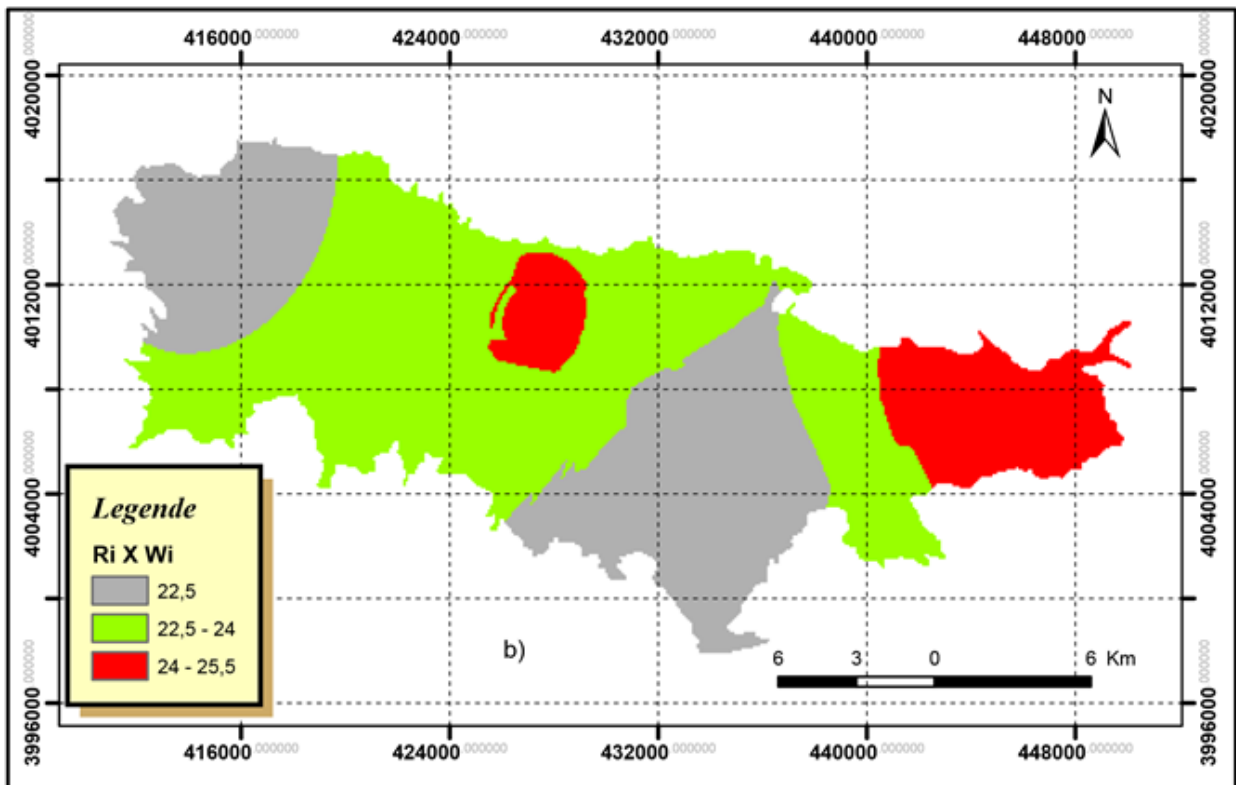


Figure 38: Répartition spatiale de la conductivité hydraulique assignée à leurs Rates et Poids.

2.7 Paramètre de pente « S »

La pente a été attribuée par le poids 2 le plus bas dans le modèle SINTACS, dans notre zone d'étude la pente varie entre 0 à 48%, la carte de pente a été classée en 5 classes, elles sont : (0_5) (5_10) (10_20) (20_30) et (30_48) avec des indices, respectivement de 20_16_10_6_2

(Voir tableau 13).

En effet, plus le pourcentage de pente est élevé plus un polluant ruissellera sous l'effet des pluies et n'aura pas un temps de stabilisation nécessaire à son infiltration et inversement, plus la pente est douce plus un polluant aura tendance à stagner et s'infiltrer dans la nappe.

Tableau 14: Classification spécifiques (cotes, poids et superficie) pour le paramètre « S ».

Pente (%)	Cote	Poids	Indices	Superficie (%)	Surface (km ²)
0_5	10	2	20	91,5	328,77
5_10	8		16	6,8	24 ,39
10_20	5		10	1,47	5,27
20_30	3		06	0,14	0,5
30_48	1		02	0,05	0,18

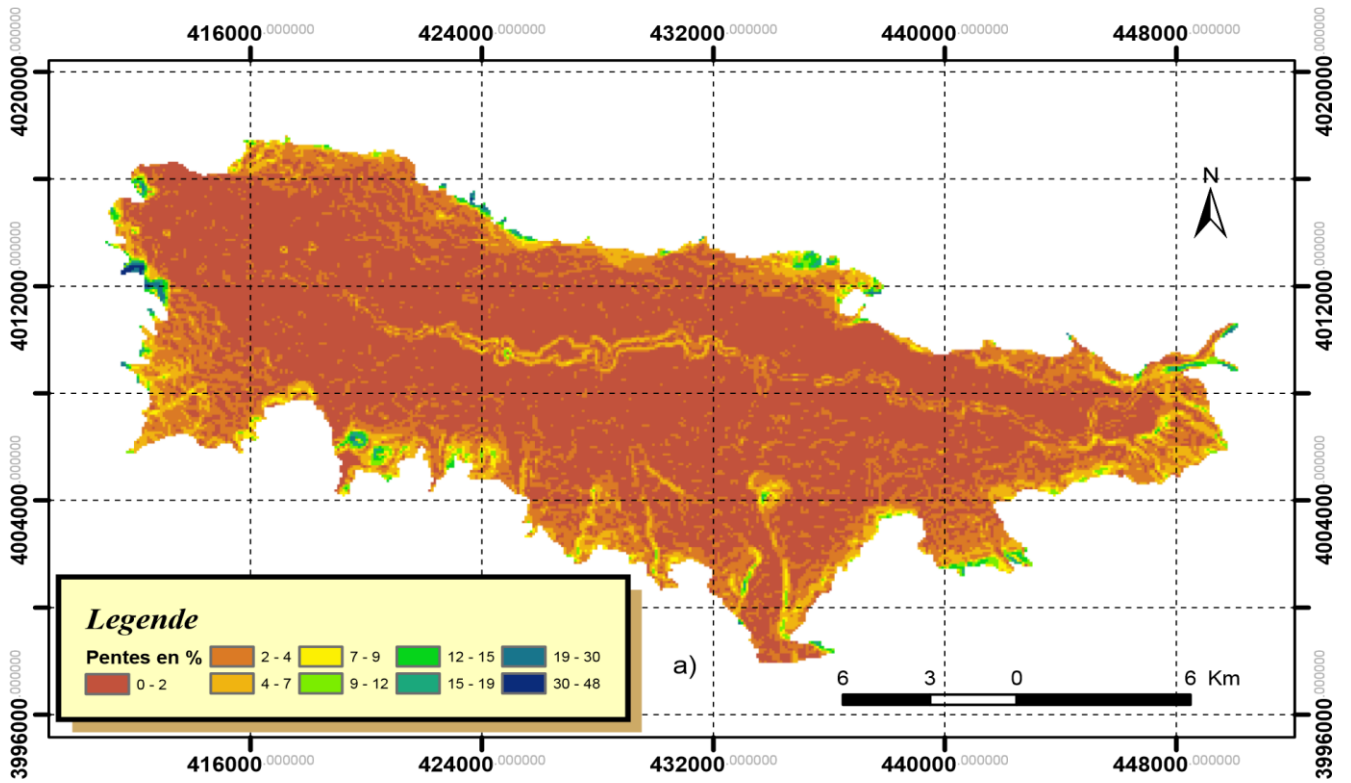


Figure 39: Répartition spatiale des pentes de la plaine alluviale de la Région d'étude.

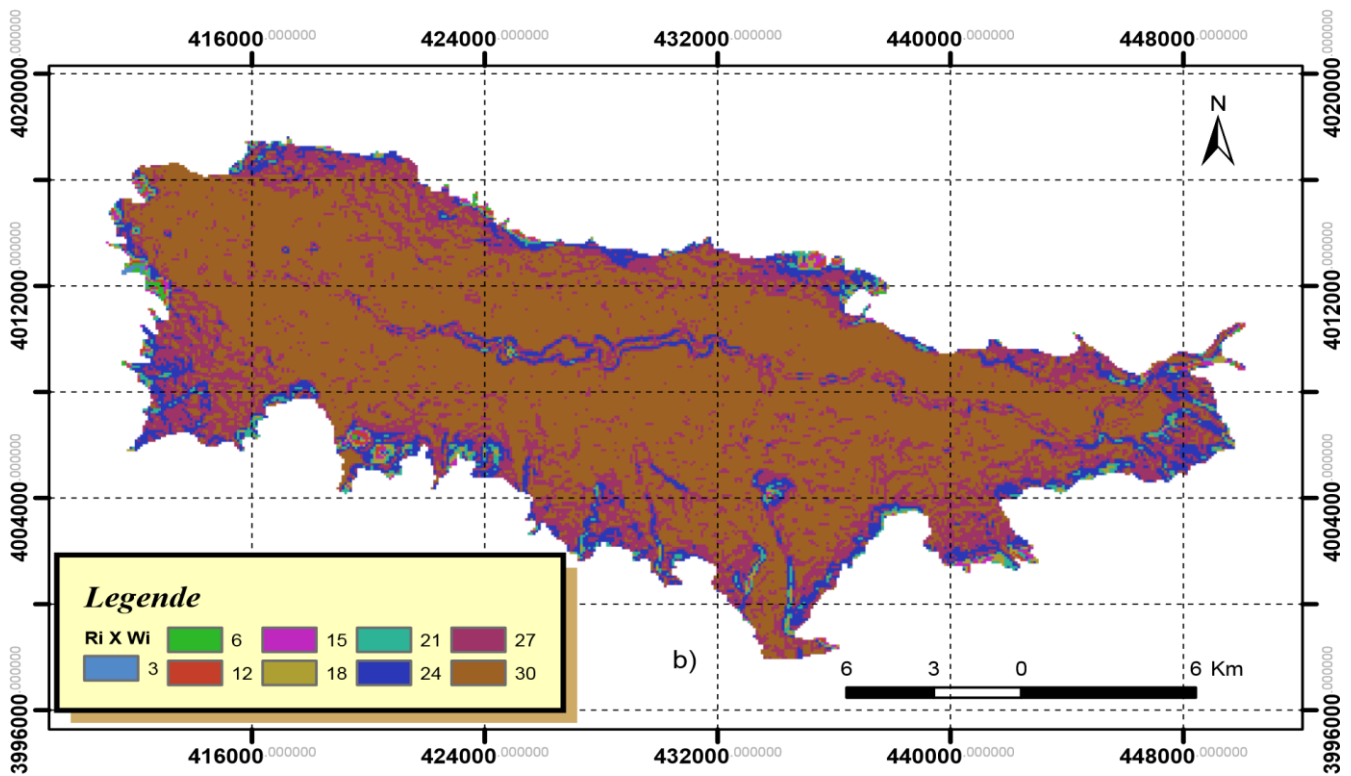


Figure 40: Répartition spatiale des pentes de la plaine alluviale assignées à leurs Rates et Poids.

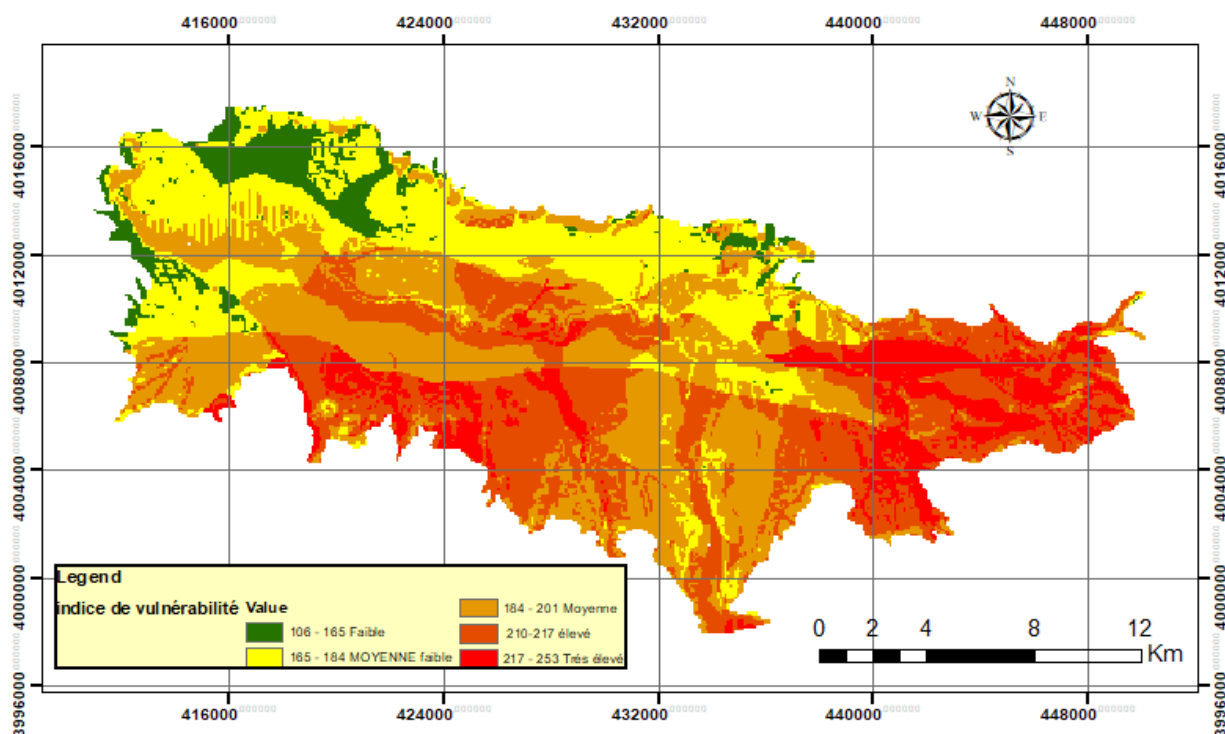


Figure 41: Carte finale de la vulnérabilité selon le Modèle-SINTACS.

Carte finale de la vulnérabilité selon le Modèle-SINTACS

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. Sur cette carte, il est possible de remarquer ce qui suit dans le secteur d'étude :

La majeure partie de la plaine de khemis Miliana est caractérisée par un degré de vulnérabilité élevé, qui représente 68% de la surface totale de la plaine ; qui domine la partie Amont et presque toute la partie sud entre Oued Massine et Deurdeur.

Une vulnérabilité moyennement élevée représente presque 32 %, elle se localise dans la partie aval au Nord-Ouest de la plaine et dans la rive gauche de l'Oued Chéloff ou on peut enregistrer des indices qui s'échelonnent entre 106 et 140, la zone qui se trouve entre la ville d'Ain Sultane et Khemis Miliana est aussi affectée par ce degré de vulnérabilité. Les degrés de vulnérabilité très élevée et faiblement élevée sont négligeables dans la plaine.

A partir de l'analyse de la carte finale de la vulnérabilité, obtenue en appliquant la méthode SINTACS, nous constatons que le Sud de la plaine et qui croît jusqu'aux bordures sud, ainsi que la partie amont, sont les zones les plus vulnérables, donc les plus exposées au risque de contamination des eaux souterraines (Voir Figure 47).

3 L'indice de la qualité de l'eau souterraine :

La cartographie de l'indice de qualité des eaux souterraines à la contamination de la zone d'étude a été évaluée en utilisant l'indice de qualité combiné avec les logiciels des systèmes d'information géographique, onze paramètres (calcium, Magnésium, Sodium, Potassium, Chlorures, Sulfates, Bicarbonates, Nitrates, PH, CE, Résidu Sec) de diverses sources ont été intégrés et

cartographiés, à savoir, l'indice de qualité des eaux souterraines à la pollution de l'aquifère alluviale de la plaine a été réalisée par l'application de la méthode paramétrique indiciel, l'analyse de la carte révèle une qualité des eaux souterraines de tendance moyenne et de bonne qualité avec une répartition de classes de 49,68 % et 44,55 % de la surface totale de la plaine.

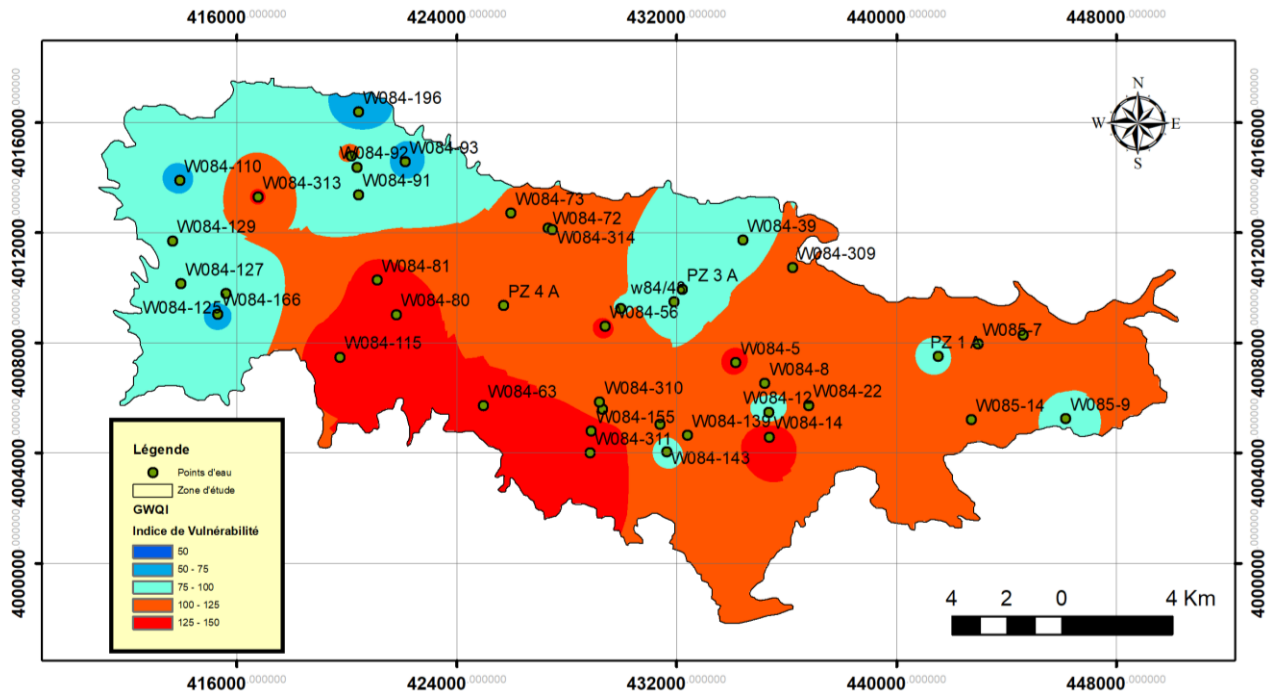


Figure 42: Carte de l'indice de qualité des eaux souterraines.

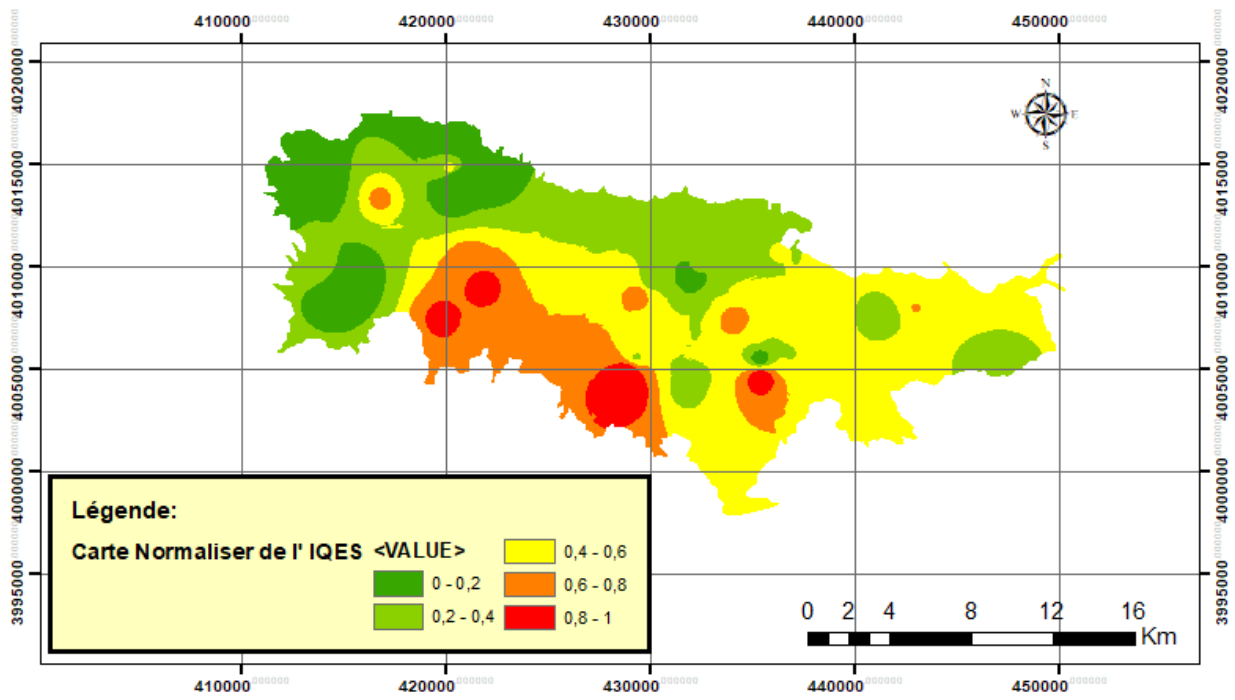


Figure 43: Carte de normalisation de L'IQES de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

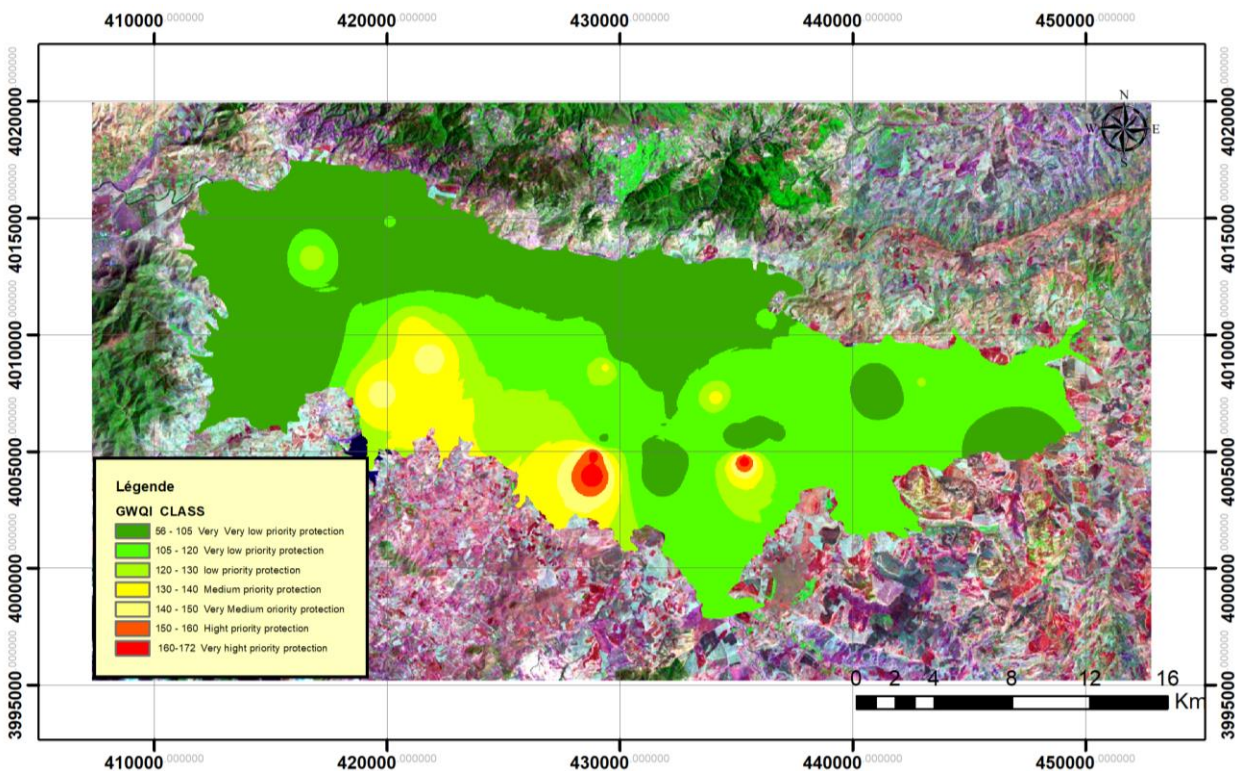


Figure 44: Carte de L'IQES de la plaine alluviale de Khemis Miliana classé.

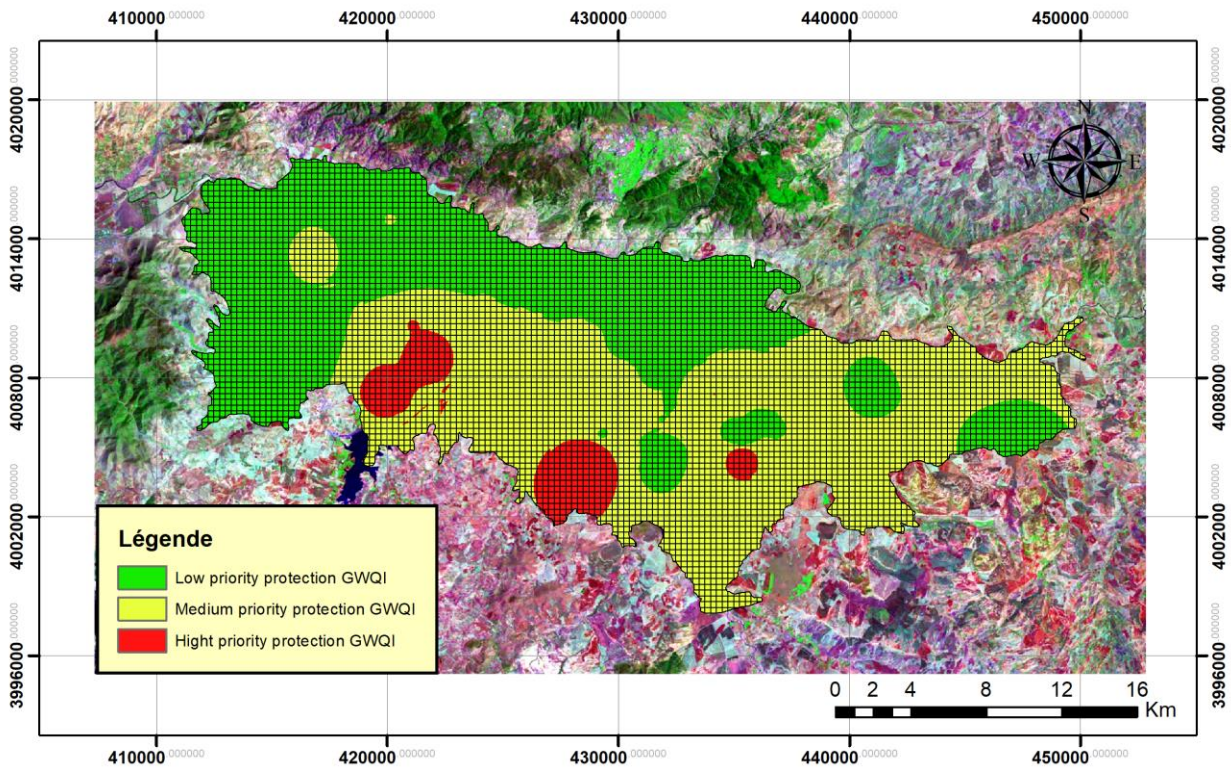


Figure 45: Carte de priorité de Protection selon L'IQES de la Plaine Alluviale de Khemis Miliana.

Respectivement la partie aval de la plaine est de bonne qualité, elle se localise dans la partie aval au Nord-Ouest de la plaine et dans la rive gauche de l'Oued Chélif, ou on peut enregistrer des indices de qualité qui s'échelonnent entre 56 et 150, la zone qui se positionne entre la ville d'Ain Sultane et Khemis Miliana est aussi affectée par cet indice. Les eaux souterraines de cet aquifère sont menacées localement et le risque de contamination est plus ou moins accentué par l'influence du chlorure et de nitrates, le risque est dû à la présence de quelques sources de pollution dans la région à savoir : Oued de Deurdeur et Oued Massine, les activités excessives des produits agricoles générés par les agriculteurs, la vulnérabilité de ces classes peut s'évoluer par effets anthropiques.

Il s'est avéré que, la grande partie de la plaine est caractérisée par un indice de qualité moyennement bonne, qui représente 5,76 % de la surface totale de la plaine et qui prédomine la partie amont et presque toute la partie sud entre Oued Massine et Deurdeur.

4 Degré de priorité de protection selon L'indice de Vulnérabilité selon le modèle SINTACS

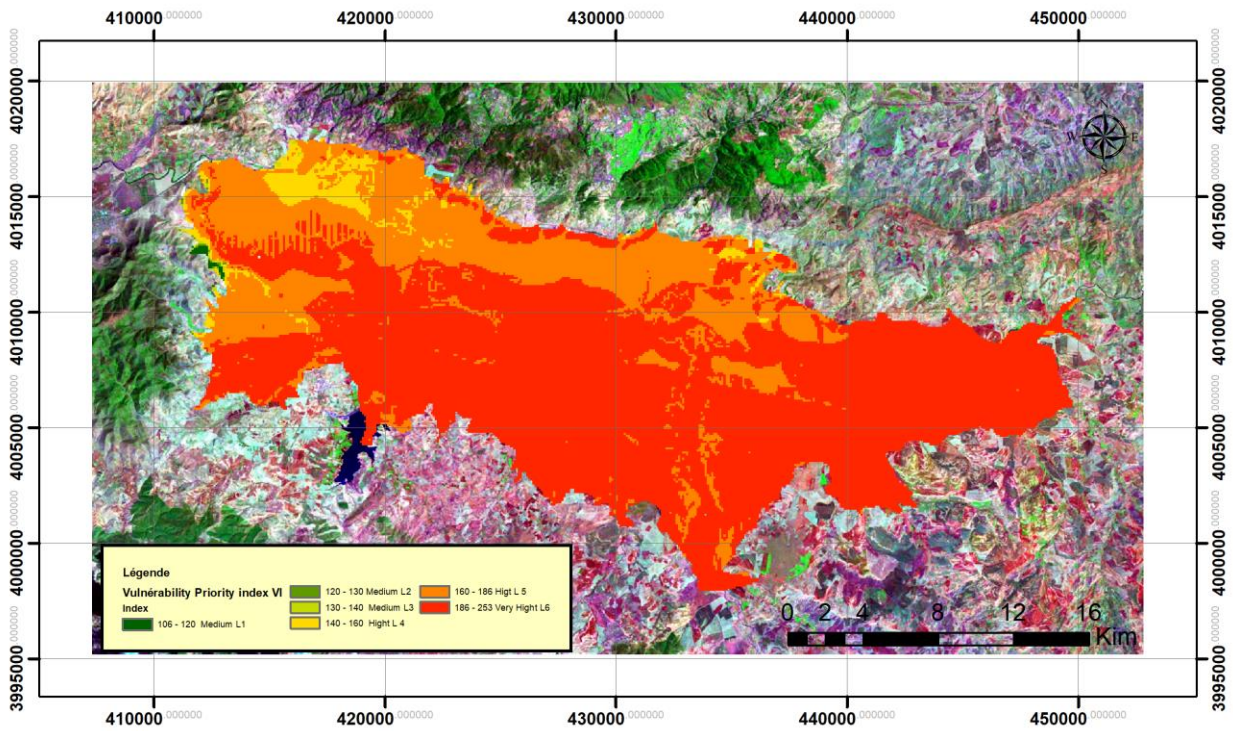


Figure 46: Carte du degré - Priorité de Protection selon la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

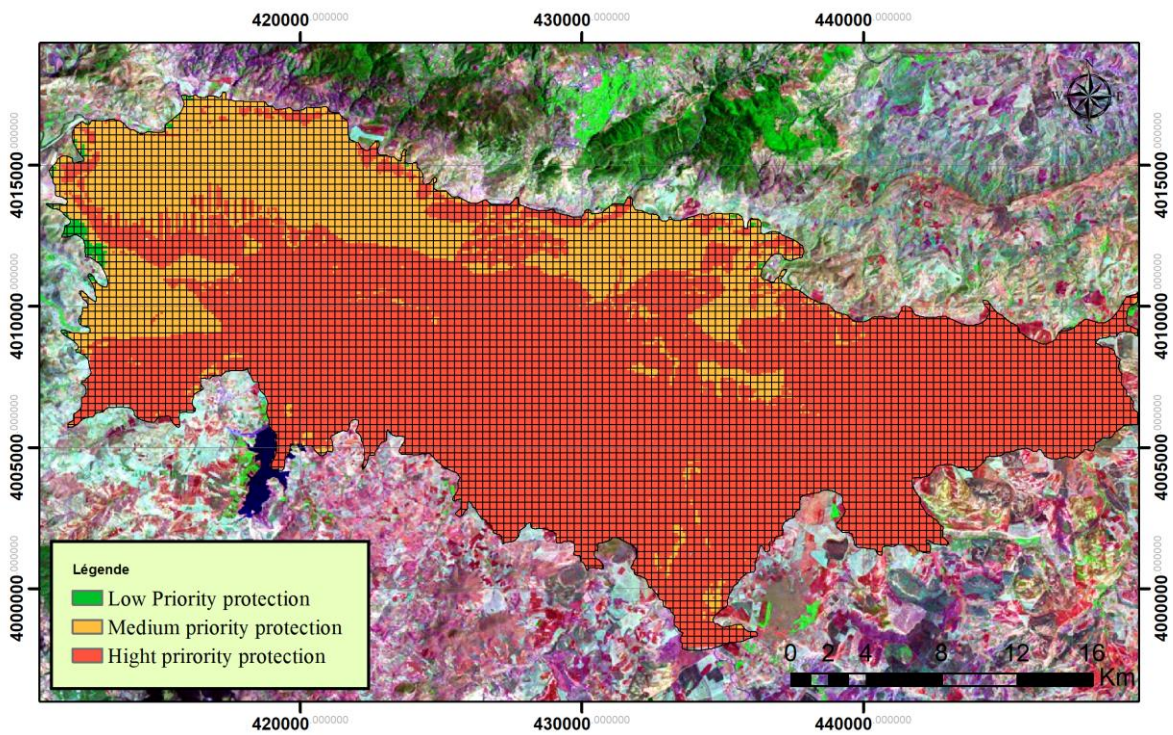


Figure 47: Carte du degré classé du Priorité de Protection selon la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine alluviale de Khemis Miliana.

L'analyse des cartes du degré de prioritarisation de protection des eaux souterraines, nous ont montré que :

En analysant la carte de vulnérabilité obtenue en appliquant le modèle SINTACS, on constate que les zones les plus risquées (risque de pollution des eaux souterraines) sont les zones s'étalant au sud de la plaine et qui s'étend jusqu'aux bordures sud.

La carte de prioritarisation de protection des eaux souterraines selon le modèle de vulnérabilité SINTACS a montré que la plaine est caractérisée par trois zones de protection : Low protection zone avec 0.35%, Medium protection zone 24.20 % et la zone la plus répondeuse qui présente en tête 75% de zonation High protection zone.

La carte de prioritarisation de protection des eaux souterraines quant à elle a montré aussi les trois classes de zonation mais avec des localisations plus étendues : low protection zone 44.55 %, medium protection zone 49.68 %, High protection zone 5.763 %. Il faut signaler que la consistance-cohérence entre les zonations des eaux souterraines des régions à protéger issues des deux modèles VI et IQES, nous a révélé qu'il s'est avéré intéressant d'appliquer une combinaison d'autres modèles afin de chercher une meilleure corrélation spatiale des résultats.

Conclusion générale

Les eaux souterraines sont sensibles à la pollution émanant des activités humaines et naturelles, La prévention de la pollution des eaux souterraines est essentielle à une gestion efficace et durable. Dans cette étude, une approche systématique est proposée pour la cartographie de la prioritarisation de protection des eaux souterraines par zonation afin de déterminer les zones à protéger dans la plaine de Khemis Miliana. L'approche est fondée sur la conception de deux modèles de zonation, zonation fondé sur la base de la vulnérabilité et une zonation sur la base de l'indice de la qualité.

La vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution a été évaluée en utilisant la méthode SNTACS en se concentrant sur les systèmes d'information géographique ArcGIS, dans lesquels sept paramètres ont été combinés et cartographiés, l'approche paramétrique par pondération a été utilisée pour la cartographie de l'indice de la qualité des eaux souterraine.

La carte de prioritarisation de protection des eaux souterraines selon le modèle de vulnérabilité SINTACS a montré que la plaine est caractérisée par trois zones de protection : Low protection zone avec 0.35%, Medium protection zone 24.20 % et la zone la plus répondeur qui présente en tête 75% de zonation Hight protection zone.

Les résultats de l'analyse de la carte des priorités de protection obtenus sur la base de l'indice de la qualité de l'eau souterraines ont montré que la plus grande partie de la plaine est caractérisée par une qualité d'eau moyenne et représente 49,68 % de la superficie totale, avec un besoin d'une priorité de protection de second degré, et elle occupe la plupart des régions du sud.

Quant aux zones du nord de la plaine, elles se caractérisent par une très bonne qualité de l'eau et représentent 44 ,55 % de la superficie totale et n'ont donc pas besoin de protection.

Les zones situées dans le sud , représentées dans la région de Bir Ouled Khelifa, Djendel et des endroits dans la région d'Ain Al-Sultan, sont caractérisées par une très mauvaise qualité de l'eau, et ce sont donc elles qui ont besoin, en premier lieu de la priorité de protection contre la contamination, et représentent une petite zone environ 5,76 % de la superficie.

Références Bibliographiques

- Bouderbala, A. 2017. Assessment of water quality index for the groundwater in the upper Cheliff plain, Algeria. *Journal of the Geological Society of India*, 90, 347356.
 - Bouderbala, A. & Gharbi, B. Y. 2017. Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in the intensive agricultural zone of the Upper Cheliff plain, Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 76, 744.
 - Boudjenane, I. & Maarouf, N. 2015. Utilisation du système d'information géographique et l'indice de qualité des eaux (IQE) pour évaluer la qualité des eaux souterraines dans la plaine Khemis Miliana. Master Djelali Bounâama Khemis Miliana.
 - Meziani, S. & Bong, N. 2013. Application des SIG et des techniques de spatialisation pour l'identification, l'évaluation et le développement des ressources en eau souterraine de la plaine de Khemis-Miliana. 4-8p.
 - Perrodon, A. 1957. Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale.
- Sahraoui, N. 2015. Étude de la cohérence entre la vulnérabilité a la pollution et la qualité des eaux souterraines : plaine de Khemis Miliana, Algérie. Master, Djelali Bounâama
- Mattauer, M. (1958). "Etude géologique de l'Ouarsenis oriental."
 - Papadopoulos, N., et al. (1994). "Mutation of a mutL homolog in hereditary colon cancer." *Science*263(5153): 1625-1629.
 - BONG. N et MEZIANI. S (2013) :Application des SIG et de technique de spatialisation pour l'identification, l'évaluation et le développement des ressources en eau souterraine de la plaine de Khemis Miliana (mémoire de Masterons universitaire de Khemis Miliana).
 - Attafi .S. (2018). : 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. Mémoire fine d'étude.
 - Bourekiza A et Labdi B(2018). : Evaluation des zones potentielles d'eaux souterraines, en utilisant l'analyse spatiale, SIG et les Techniques MCDA, plaine de khemis Miliana. Mémoire fine d'étude.

- Dekkiche I, Mezaour A(2018) : Etude comparative de trois méthodes pour la cartographie de la vulnérabilité de l'aquifère alluviale à la pollution, plaine alluviale de Khemis Miliana. Mémoire fine d'étude.
- Oumar Abdramane A , Berbara F(2014) : Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines et de l'analyse de sensibilité, en utilisant un modèle GIS- Based SINTACS , plaine de khemis Miliana . Mémoire fine d'étude.
- WOOD et SANFORD, (1995): Chemical and Isotopic Method for Quantifying Ground Water in a Regional, Semiarid Environment. *Ground Water*, 33(3): 458-486 p.
- MOHAMED.H.H et al (2008) : Evaluation de 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, DOI : 10.7202/017932ar volume 21, numéro 1, 2008, p.75-86.
- DANIELA DUCCI (2010): Aquifer Vulnerability Assessment Methods: The non-Independence of parameters problem Doi: 10.4236/jwarp.2010.24034 pp302.
- CIVITA (1994) : La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento : Teoria e pratica. Pitagore Editrice, Bologna, 325 p. CIVITA et al, (1994) : Le Carte della vulnerabilità` degli acquiferi all'inquinamento.⊗ Teoria and practica. Pitagora Editrice, Bologna, p 325
- Civita, M. (1994). Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica, Pitagora.
- Srinivasamoorthy et al 2008: Identification of major sources controlling Groundwater Chemistry from a hard rock terrain—A case study from Metturtaluk, Salem district, Tamilnadu, India. *Journal of Earth System Sciences*, 117(1), 49–5
- Sadat-Noori, S. M., et al. . (2014). "Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran." *Environmental Earth Sciences* 71(9): 3827-3843.
- Ketata, M., et al. (2012 "Use of geographical information system and water quality index to assess groundwater quality in El Khairat deep aquifer (Enfidha, Central East Tunisia)." *Arabian Journal of Geosciences* 5(6): 1379-1390.

Référence Bibliographique

- Mishra et Patel; 2001 : Study of the pollution load in the drinking water of Rairangpur, a small tribal dominated town of North Orissa. *Indian Journal of Environment and Ecoplanning*, 5(2), 293–298
- Abasi Abbasi, S. A; Arya, D.S ; 2000: *Environmental Impact Assessment*. Discovery Publishing House, New Delhi.
- Sadat-Noori, S. M., et al (2014). "Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran." *Environmental Earth Sciences* 71(9): 3827-3843.