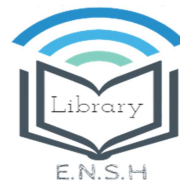


Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري

The title (العنوان):

Etude de la coherence entre la vulnérabilité à la pollution at la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de l'oued El Hachem (w. Tipaza) .

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0024-18

APA Citation (توثيق APA):

Khedraoui, Meriem (2019). Etude de la coherence entre la vulnérabilité à la pollution at la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de l'oued El Hachem (w. Tipaza)[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics.

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات بيداغوجية، مقالات البوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR
HYDRAULICS

"The Mujahid Abdellah ARBAOUI"



المدرسة الوطنية العليا للري
"المجاهد عبد الله عرابوي"

ⵎⵓⵔ ⵏ ⵙⵉⵔ ⵏ ⵙⵉⵔ ⵏ ⵙⵉⵔ ⵏ ⵙⵉⵔ ⵏ ⵙⵉⵔ

MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option : ASSAINISSEMENT

THEME :

**ETUDE DE LA COHERENCE ENTRE LA VULNERABILITE
A LA POLLUTION ET LA QUALITE DES EAUX
SOUTERRAINES DE LA NAPPE ALLUVIALE DE L'OUED EL
HACHEM (w.TIPAZA)**

Présenté par :

KHEDRAOUI Meriem

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
SALAH Boualem	Professeur	Président
HACHEMI Abdelkader	M.C.B	Examineur
MOKRANE Wahiba	M.A.A	Examineur
TAFAT Leila	M.A.A	Examineur
BOUFEKANE Abdelmadjid	M.C.B	Promoteur

Session Septembre 2019

المخلص

ان طبقة المياه الجوفية لواد الهاشم التي تتوسط كل من ولاية تيبازة ومدينة شرشال تعاني في ان واحد من الاستغلال المفرط لها ومشكل التلوث الذي يتجلى من خلال مياه الصرف الصحي والاستعمال اللاعقلاني للأسمدة الزراعية.

للتصدي لهذا المشكل كان من الضروري وضع برنامج صارم لتهيئة، ادارة وحماية هذه الطبقة من المياه الجوفية. من هذا المنظور فان الدراسة الحالية تهدف الى استحداث اداة سهلة وسريعة تسمح بإعطاء الخصائص المتعلقة بالمناطق الأكثر عرضة للتلوث واتخاذ التدابير الوقائية اللازمة.

في هذا الإطار تعتمد التقنية المستخدمة على طريقة التعيين التلقائي المعروفة باسم دراستيك والتي تأخذ بعين الاعتبار المعطيات الهيدروجيولوجية الرئيسية المتحكمة في التدفقات الجوفية. تبين الخرائط التي تم الحصول عليها باستخدام طريقة دراستيك ان جزءا كبيرا من سهل واد الهاشم يتميز بدرجة هشاشة منخفضة الى متوسطة الى مرتفعة جدا على مستوى مجرى الواد. وعليه ومن اجل الاستغلال الامثل لهذا المجرى المائي وجب اتخاذ تدابير وقائية كالرقابة الهيدروكيميائية والتكنولوجية للأنشطة وانتهاج سياسة تهدف لحماية المناطق المعرضة للخطر وتنظيم الانشطة الزراعية المحاذية للمجمعات المائية.

الكلمات المفتاحية: درجة الهشاشة، الرقابة الهيدروكيميائية، تلوث، مياه جوفية.

Résumé

La petite nappe alluviale de l'oued El Hachem, située dans la wilaya de Tipaza à mi-chemin du chef-lieu de la wilaya et de la ville de Cherchell, est actuellement surexploitée et en même temps exposée à un sérieux problème de pollution qui se manifeste par des rejets d'eaux usées et particulièrement l'usage abusif de fertilisants en agriculture. Face à cette situation, l'établissement d'un programme de gestion rigoureuse et de protection de la nappe, doit faire l'objet de toute l'attention voulue. C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude, dont l'objectif est d'élaborer un outil permettant de caractériser de façon simple mais précise, les zones où la nappe est particulièrement vulnérable, afin de circonscrire les zones à haut risque de contamination et de pouvoir agir de façon préventive.

Dans cette optique, la technique utilisée s'appuie sur la méthode de cartographie automatique dite "DRASTIC", qui prend en compte les principaux paramètres hydrogéologiques régissant les écoulements souterrains.

Les documents cartographiques obtenus par la méthode DRASTIC montrent que la grande partie de la plaine de l'oued El Hachem est caractérisée par les degrés de vulnérabilité faible et moyenne. Elles présentent un taux de 43 % et 48 % de la surface totale, respectivement. Au contraire, le degré de vulnérabilité élevé ne présente que 9 % de la surface totale), avec une présentation juste au niveau du lit de l'oued El Hachem. Enfin, pour une meilleure gestion de cette nappe, des mesures de protection doivent être prises pour toute activité concernée sur la plaine, comme la surveillance hydrochimique et bactériologique régulière, la mise en place d'une politique de protection des zones vulnérables et la réglementation des activités agricoles, autour des champs de captages.

Mots clé : vulnérabilité, catrographie, eaux souterraines ,pollution

Abstract:

The small alluvial aquifer of El Hachem wadi, located in the wilaya of Tipaza midway between the capital of the wilaya and the city of Cherchell, is currently overexploited

and at the same time exposed to a serious pollution problem that is caused by wastewater discharges and particularly the misuse of fertilizers in agriculture. According to this situation, the establishment of a rigorous management and protection program for the water table must be given all due attention. It is in this perspective that the present study, whose objective is to develop a tool to characterize in a simple but precise way, the areas where the water table is particularly vulnerable, to circumscribe high-risk areas contamination and to be able to act preventively.

In this perspective, the technique used is based on the automatic mapping method known as "DRASTIC", which takes into account the main hydrogeological parameters governing underground flows.

The cartographic documents obtained by the DRASTIC method show that a large part of the plain of El Hachem wadi is characterized by a low to medium degree of vulnerability and a high vulnerability just at the El Hachem riverbed. Finally, for better management of this water table, protective measures must be taken for any activity concerned on the plain, such as regular hydrochemical and bacteriological monitoring, the implementation of a policy of protection of vulnerable areas and the regulation of agricultural activities, around the catchment fields.

Key word: pollution, vulnerability, underground waters.

Sommaire

Introduction générale.....	01
Présentation du milieu physique du site.....	03
I.1. Situation géographique	04
I.2. Situation climatique.....	04
a) Précipitation.....	04
b) Température	05
I.3. Géologie	06
I.4. Aperçu géophysique.....	09
I.5. Hydrogéologie.....	12
a) Etat de la nappe alluviale de l'oued El Hachem	12
b) Interprétation de la carte piézométrique du mois d'octobre 2014	13
c) Bilan hydrologique de la nappe alluviale de l'oued El Hachem	14
Recherche bibliographique	15
II. Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.....	16
II.1. Notions de vulnérabilité	16
II.2. Objectifs des cartes de vulnérabilité	16
I.3. Les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité	17
II.3.2. Méthodes basées sur un système de cotation numérique.....	19
II.3.3. Méthodes fondées sur la caractérisation des rejets	22
II.4. Choix des méthodes adaptables aux conditions hydrogéologiques en Algérie	23
• Discussion.....	24
II.5. Description et aspect théorique de la méthode « Drastic ».....	25
II.6. Calcul de l'indice « Drastic »	29

II.7. description des paramètres de la méthode Drastic	30
II.7.1. Les critères de la méthode DRASTIC	30
II.7.2. Profondeur de la nappe.....	30
II.7.3. Recharge nette	30
II.7.4. Matériaux de l'aquifère.....	30
II.7.5. Matériaux du sol.....	31
II.7.6. Topographie.....	31
II.7.7. Impact de la zone non saturée	31
II.7.8. Conductivité hydraulique de l'aquifère.....	31
II.7.9. Interaction entre les paramètres.....	32
II.8. Interprétation de l'indice « Drastic ».....	32
II.9. Principales étapes pour la construction des cartes de vulnérabilité	33
II.9.1. Acquisition des données	33
II.9.3. Réalisation des cartes thématiques	34
II.9.3.1. Méthode manuelle	34
II.9.3.2. Méthode informatique	34
II.10. Conclusion.....	34
Résultats et discussions.....	35
III.1. Etablissement de la carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines selon le modèle DRASTIC	36
III.1.2. Paramètres du modèle DRASTIC.....	36
III.1.2.1. Paramètre "Profondeur des eaux souterraines (D)".....	36
III.1.2.2. Le paramètre "Recharge efficace de l'aquifère (R)".....	37
III.1.2.3. Le paramètre "Nature du matériel aquifère (A)".....	38
III.1.2.4. Le paramètre "Nature du sol (S)".....	39
III.1.2.5. Le paramètre "Topographie (T)".....	40
III.1.2.6. Le paramètre "Impact de la zone vadose (I)".....	41
III.1.2.7. Le paramètre "Conductivité hydraulique (C)".....	41
III.1.2.8. Carte synthèse de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.....	43
III.1.9. Les précautions à prendre	43

Figure III.6. Carte du paramètre impact de la zone vadose "I".....	41
Figure III.7. Carte du paramètre conductivité hydraulique " C"	42
Figure III.8. Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines par la méthode DRASTIC de la plaine Alluviale de l'oued El Hachem	44
Figure III.9. Classification des eaux selon le diagramme vertical de Scheöller-Berkaloff	49

Liste des tableaux

Tableau II.1. Poids relatifs des paramètres Prast.....	20
Tableau II.2. Symbole de classification de la perméabilité des terrains.....	21
Tableau II.3. Récapitulatif de quelques méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité	23
Tableau II.4. Paramètres DRASTIC et leurs poids relatif.....	26
Tableau II.5. Cotes (Rating) de la profondeur de la nappe (Depth to groundwater).....	26
Tableau II.6. Cotes (Rating) de la recharge nette.....	26
Tableau II.7. Cotes (Rating) des matériaux de l'aquifère.....	27
Tableau II.8. Cotes (Rating) des matériaux du sol.....	27
Tableau II.9. Cotes (Rating) de la Topographie.....	28
Tableau II.10. Cotes (Rating) de l'impact des matériaux de la zone non saturée.....	28
Tableau II.11. Cotes (Rating) de la conductivité hydraulique (perméabilité).....	28
Tableau II.12. Information sur les sources de données.....	33
Tableau II.13. Couleurs utilisées par la méthode DRASTIC.....	34
Tableau III.1. Analyses physico-chimique des eaux de la nappe alluviale de l'oued El Hachem (Octobre 2014)	45
Tableau III.2. Normes de potabilité des eaux selon l'OMS.....	46
Tableau III.3. Classification des eaux souterraines selon la formule caractéristique de Stabler	48

Introduction générale

Les eaux souterraines sont clairement vues pour être, pour notre pays et l'ensemble des pays à climat semi-aride, voir pour tous les pays du monde, comme la ressource la plus précieuse.

Les eaux souterraines, donc, sont désormais reconnues comme une ressource économique et un patrimoine écologique qu'il importe de gérer et de préserver, surtout pour un pays à climat semi-aride comme le nôtre qui soutire ses besoins en eau principalement des nappes souterraines.

En effet, dans tout le territoire national, on exploite les nappes d'eau souterraines pour l'alimentation en eau potable, pour l'irrigation et pour les besoins industriels. Un important pourcentage et dans certains cas 100 % des besoins proviennent du sous-sol.

Le développement socio-économique rapide, de notre pays, a induit une pollution d'origine diverse dont l'acuité représente une menace permanente pour ces eaux souterraines qui sont donc comme les eaux de surface susceptibles d'être contaminées par les activités humaines ayant cours sur le territoire.

La présente étude nous permet de donner une idée sur l'état actuel de la nappe alluviale d'oued el Hachem concernant la sensibilité à la contamination extérieure par les polluants en utilisant la méthode DRASTIC. Cette méthode est actuellement utilisée partout dans le monde. Elle a été réalisée spécialement pour assister les planificateurs, les gestionnaires et les administrateurs dans leur tâche.

Parce que la prévention est une clé pour aider à assurer, que les futures activités, ne contamineront pas les eaux souterraines. Il est maintenant très important plus que jamais à utiliser la planification et cet outil de gestion pour aider à reconnaître les places ou certaines activités posent un haut risque. La vulnérabilité peut nous prémunir contre la pollution et protéger les eaux souterraines pour les futures générations.

L'étude de la vulnérabilité à la pollution des nappes permet une meilleure gestion des eaux souterraines et des interventions convenables dans le cas de contamination. Elle permet aussi de préciser les zones sollicitées à être contaminées suite à des activités anthropiques. Une fois identifiées, ces régions peuvent être visées avec prudence par les planificateurs et les utilisateurs de la terre. Les cartes de vulnérabilité des aquifères sont des outils standard pour protéger les eaux souterraines contre toute éventuelle source de pollution. Elles sont précieuses pour toute décision future.

La région d'étude correspondant à la plaine alluviale de l'oued El Hachem, qui située dans le sous bassin versant du Côtier Cherchell (02.03), appartenant au grand bassin versant du Côtiers Algérois (02a), dans la wilaya de Tipaza.

L'objectif de notre étude est de réaliser la carte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution de la nappe alluviale de l'oued El Hachem (W. Tipaza), que soient interprétatives et permettant d'estimer la vulnérabilité de la nappe à la contamination par des polluants d'extérieur. Elles constituent un appui pour la gestion des eaux souterraines et la définition des mesures de protection des réserves en eau.

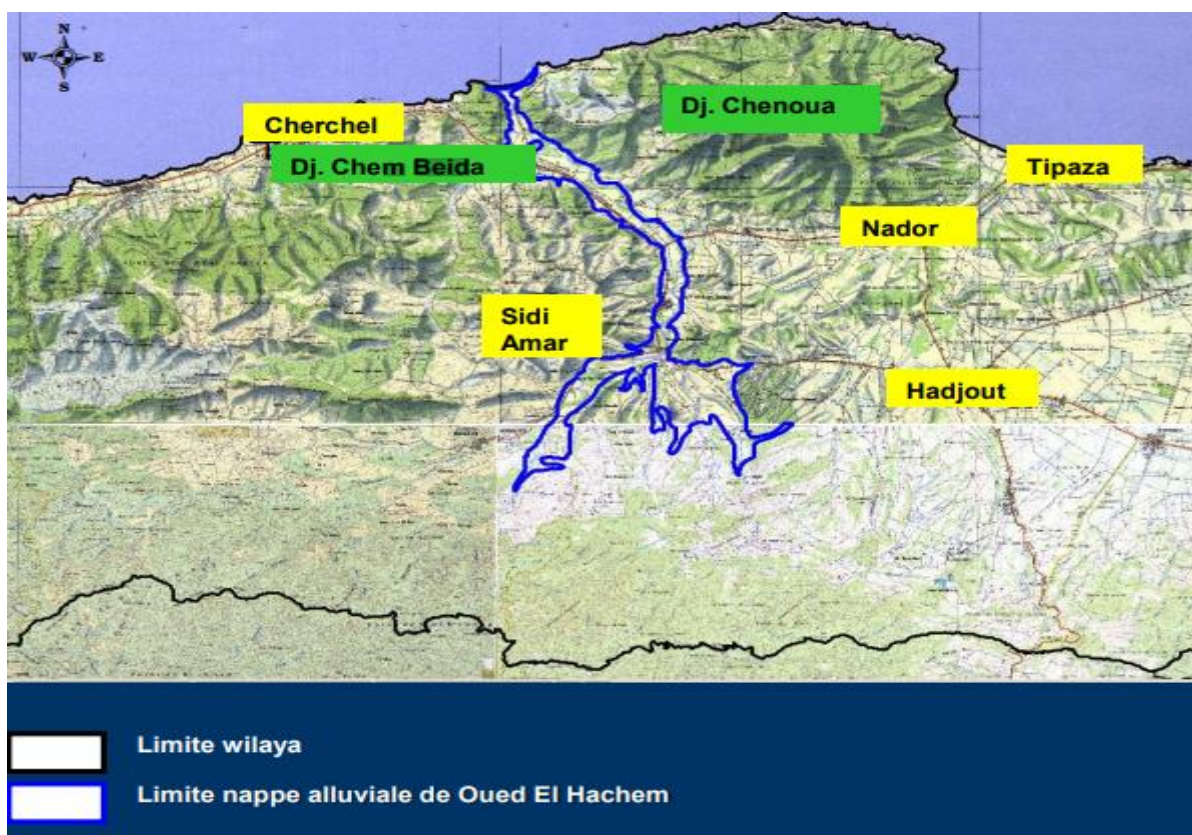
Présentation du milieu physique du site

I.1. Situation géographique

La plaine de l'oued El Hachem est située dans la wilaya de Tipaza à mi-chemin du chef-lieu de la wilaya et de la ville de Cherchell. Elle fait partie de l'Atlas littoral et se trouve au pied du versant sud du massif du Chenoua.

Elle est imitée :

- Au Sud, par Djebel Boumaâd,
- Au Nord, par la mer méditerranéenne,
- A l'Est, par Djebel Chenoua,
- A l'Ouest, par Djebel Chem Beida.



Source :ANRH BLIDA

Figure 1.1. Situation de la zone d'étude

I.2. Situation climatique

c) Précipitation

La pluviométrie moyenne interannuelle est de l'ordre de 553 mm/an. Cette valeur a été enregistrée à la station pluviométrique de Boukourdane (02.03.29) durant la période 1990 -

PRESENTATION DU MILIEU PHYSIQUE DU SITE

2013, dont 79 % (435 mm) de la pluviométrie annuelle tombe entre les mois de novembre et avril.

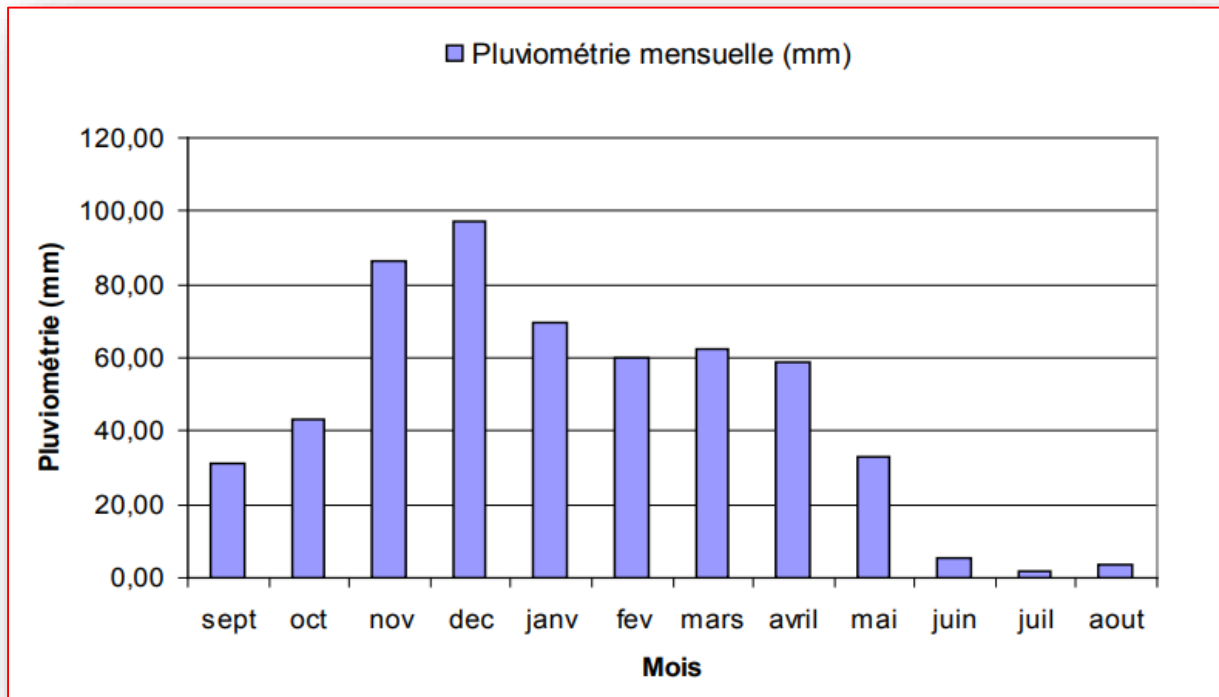


Figure 1.2. Précipitation moyenne mensuelle à la station de Boukourdane (Période 1990 – 2013)

b) Température

La température moyenne annuelle est de près de 18 °C pour la période 1990 – 2013, avec des températures moyennes autour de 11 °C en hiver (décembre - février) et de 25 °C en été (juin - août). Huit mois humides d'octobre à mai et quatre mois secs de juin à septembre.

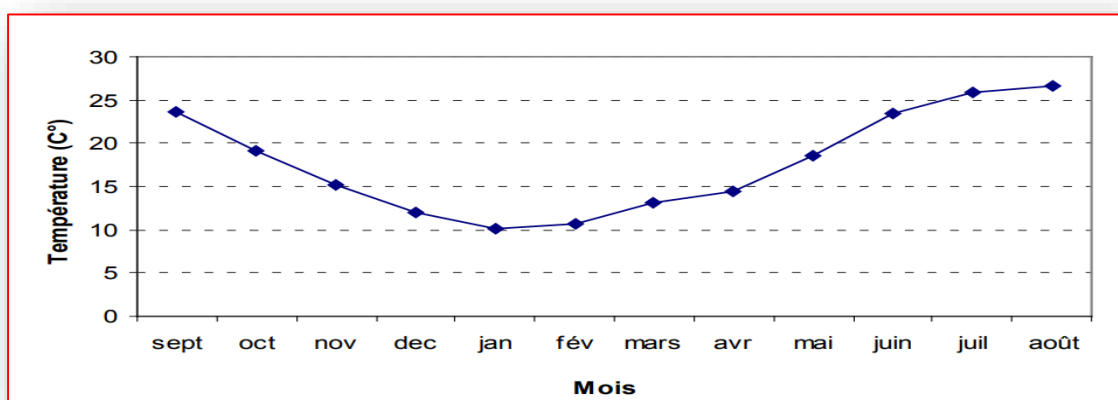


Figure 1.3. Température moyenne mensuelle à la station de Boukourdane (Période 1990 – 2013)

PRESENTATION DU MILIEU PHYSIQUE DU SITE

TERRAINS SÉDIMENTAIRES



A	Alluvions actuelles: lacs, marécages, dayas, chotts, sebkhas, limons et croûtes gypso-salines
D	Dunes récentes
qt	Quaternaire continental: alluvions, regs, terrasses
qm	Quaternaire marin: plages anciennes et formations dunaires consolidées qui les accompagnent
qC	Calabrien: grès marins et formations dunaires associées
qV	Villafranchien: calcaires lacustres, argiles à lignite, couches rouges
pV	Pliocène continental et Villafranchien non séparés (pV)
pc	Pliocène continental: poudingues, calcaires lacustres
p	Pliocène marin conglomérats, marnes bleues, mollasses, grès et formations dunaires subordonnées
mp	Pontien (localement équivalent du mc)
ms	Miocène terminal marin et lagunaire: couches à <i>Trp. it.</i> , marnes à gypse
mm	Miocène supérieur marin: calcaires, grès, argiles
mc	mc Miocène continental antépontien
mi	Miocène inférieur marin (Burdigalien)
oa	Aquitainien continental (pouvant inclure localement la base du Burdigalien)
oc	Oligocène continental (pouvant inclure localement l'Éocène sup ^r continental)
o	Oligocène marin incluant localement l'Éocène supérieur)
em	Éocène moyen marin
ec	ec Éocène moyen et inférieur continental
ei	Éocène inférieur marin
cs	cs Crétacé supérieur marin
csc	csc Crétacé supérieur continental
esm	esm Crétacé supérieur marin non subdivisé
cm	cm Crétacé moyen (marin ou lagunaire)
ct	ct Turponien
en	en Cénomannien
c	c Crétacé marin non subdivisé
ci	ci Crétacé inférieur (Vraconien à Berriasien)
cir	cir " récifaux ou subrécifaux
cic	cic " continentaux ou lagunaires
ca	ca Albien et Crétacé inf ^r éventuellement séparés en $\frac{ca}{ci}$
cj	Crétacé et Jurassique non séparés
js ₃	js ₃ Portlandien et Kimmeridgien (pouvant inclure localement le Berriasien)
js ₂	js ₂ Lusitanien
js ₁	js ₁ Oxfordien et Callovien
js	js Jurassique supérieur non divisé
jms	jms Jurassique supérieur et moyen marins non séparés
jm	jm Jurassique moyen (pouvant inclure localement l'Aalénien supérieur)
ji ₃	ji ₃ Aalénien et Toarcien
ji ₂	ji ₂ Domérien et Pliensbachien
ji ₁	ji ₁ Lotharingien à Rhétien
ji	ji Jurassique inf ^r marin
ji ₃₋₂	ji ₃₋₂ Aalénien à Domérien
ji ₂₋₁	ji ₂₋₁ Pliensbachien à Rhétien
t	Trias marin ou lagunaire
rt	Permo-Trias: grès rouges, conglomérats

ASSEMBLAGE

PRESENTATION DU MILIEU PHYSIQUE DU SITE

ko	Cambro - Ordovicien
ks	Acadien
ki	Géorgien
kx	<i>Conglomérat de base du Géorgien</i>
x	Primaire non subdivisé
x _{3a} x ₃	Précambrien supérieur { <i>Schistes et grès</i> <i>Conglomérats</i>
x ₂	Précambrien moyen: <i>schistes et séricitoschistes</i>

TERRAINS MÉTAMORPHIQUES

	<i>Métamorphisme faible de cj et ci (Région d'Oran)</i>
	<i>Métamorphisme de contact</i>
§	<i>Micaschistes, schistes satinés</i>
§	<i>Gneiss</i>
γ ₁	<i>Pegmatites</i>
c	<i>Calcaires métamorphiques (calcschistes, cipolins)</i>
ε	<i>Amphibolites, pyroxénites, grenatites, etc...</i>

ROCHES IGNÉES

γ μγ	<i>γ Granites, granodiorites</i> <i>μγ Microgranites, microgranodiorites</i>
δ	<i>Diorites, gabbros, dolérites</i>
ρ	<i>Rhyolites, dellénites, dacites et tufs associés</i>
α	<i>Andésites et tufs associés</i>
β	<i>Basaltes et tufs associés</i>
φ	<i>Phonolites</i>
σ	<i>Serpentines</i>
τω	<i>Roches associées au Trias (diorites, ophites, gabbros, etc...)</i>

Les lettres: q (Quaternaire), t (Tertiaire), s (Secondaire), rt (Permo-Trias), h (Dévonien et Carbonifère), x₁₋₂₋₃ (Précambrien), ajoutées aux indices des roches éruptives précisent l'âge chaque fois qu'il a été possible de le faire.

I.4. Aperçu géophysique

L'étude géophysique de la Compagne Générale de Géophysique (C.G.G) de l'année 1967, réalisée dans la vallée de l'oued El Hachem, met en évidence l'existence de plusieurs terrains électriquement distincts :

➔ Coupe 1

La coupe géophysique réalisée dans la partie amont de la nappe alluviale de l'oued El Hachem, qui comporte le sondage électrique étalon n° SE 41 (Figures 1.5, et 1.6), montre les niveaux suivants :

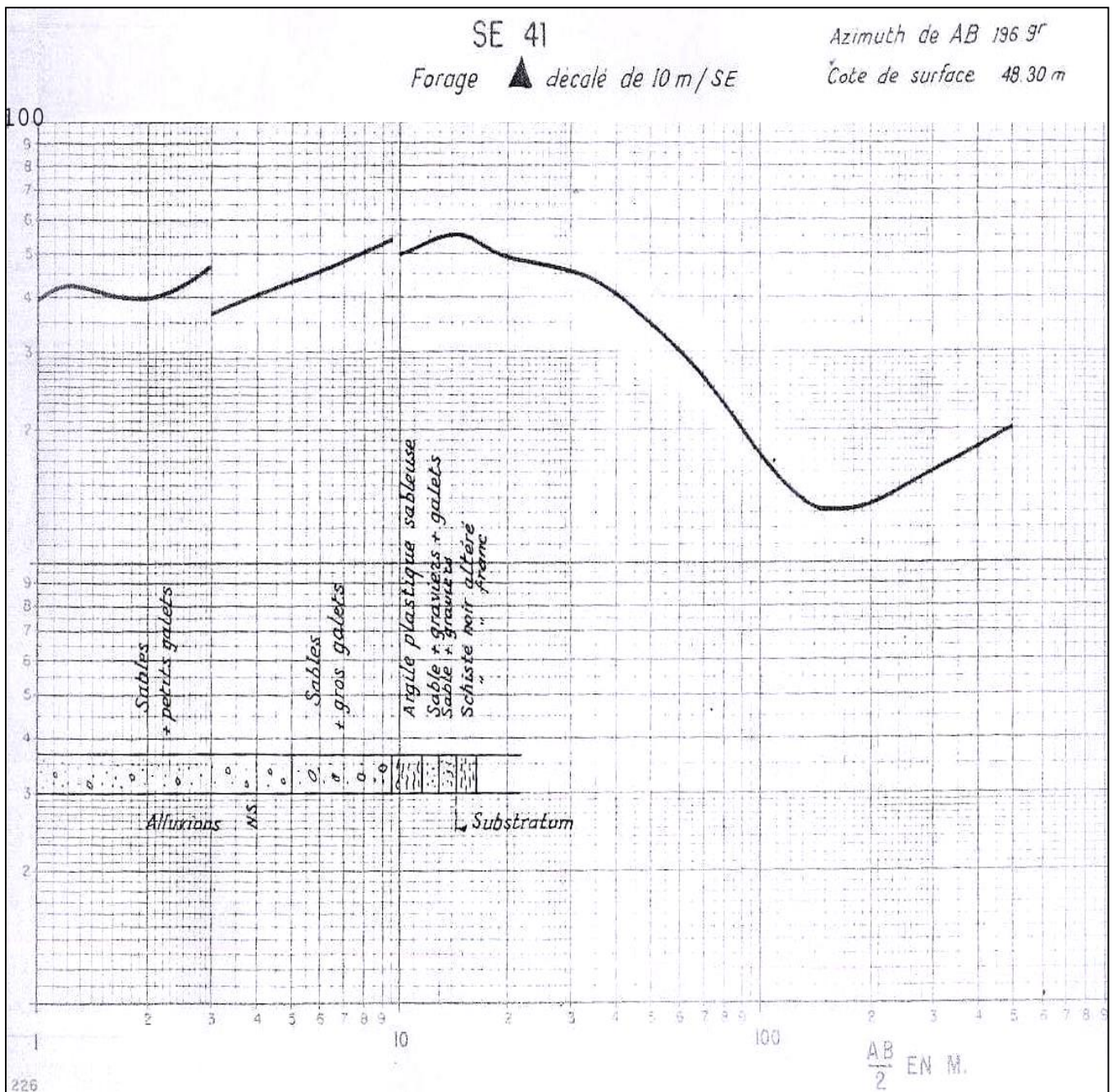
- ❖ Un substratum d'âge Pliocène d'une résistivité qui varie de 10 à 25 Ohm.m avec des vitesses sismiques de 2300 à 2600 m/s ;
- ❖ Un niveau de résistivité qui allant de 50 à 100 Ohm.m et des vitesses sismiques de 1200 à 1800 m/s, indiquant un milieu aquifère ;
- ❖ Un niveau supérieur de faible épaisseur.

➔ Coupe 2

L'examen de la coupe géophysique réalisée dans la partie aval de la nappe alluviale de l'oued El Hachem montre l'existence des niveaux suivants (Figure 1.6) :

- ❖ Un substratum d'âge Pliocène d'une résistivité moyenne de l'ordre de 3 Ohm.m ;
- ❖ Un niveau grossier de résistivité varie de 50 à 60 Ohm.m et de 3 à 14 m d'épaisseur, représente le réservoir aquifère ;
- ❖ Un niveau supérieur de résistivité qui varie de 5 à 10 Ohm.m indiquant un matériel alluvionnaire plus fin d'une épaisseur moyenne de 17 m, avec des passages grossiers vers le centre de la plaine alluviale.

PRESENTATION DU MILIEU PHYSIQUE DU SITE



Source : ANRH BLIDA

Figure 1.5. Sondage électrique étalon n° E 41

I.5. Hydrogéologie

d) Etat de la nappe alluviale de l'oued El Hachem

Le cours d'eau d'El Hachem a formé par les dépôts alluvionnaires à l'extrême Ouest de la Plaine de la Mitidja, en lessivant les sédiments carbonatés aux alentours. L'aquifère d'alluvions est d'une superficie de 13,1 km². La nappe est libre entre Bouaroua et Sidi Amar (vers le sud) et captive au Nord.

Les alluvions de cette aquifère sont formées de la base au sommet par :

- Argiles rouges (par endroit) ;
- Galets et graviers de 5 à 20 m constituent le réservoir aquifère ;
- Argile et sable, avec intercalation de quelques lits de graviers.

Le substratum est formé en majorité par les marnes du Crétacé, les calcaires de l'Eocène et les marnes du Plaisancien.

La carte de la transmissivité met en évidence un chenal de bonne transmissivité qui varie de 10^{-2} et 10^{-3} m²/s, en bordure elle est de 10^{-5} m²/s.

L'examen de la figure des fluctuations du niveau statique moyenne (Figure 1.7), pour la période 1998 – 2014, montre un abaissement variable allant entre 1,8 m et 4,1 m. Le niveau statique annuel est proche du niveau moyen ce qui indique une certaine stabilité entre les apports (entrants) et les prélèvements (sortants).

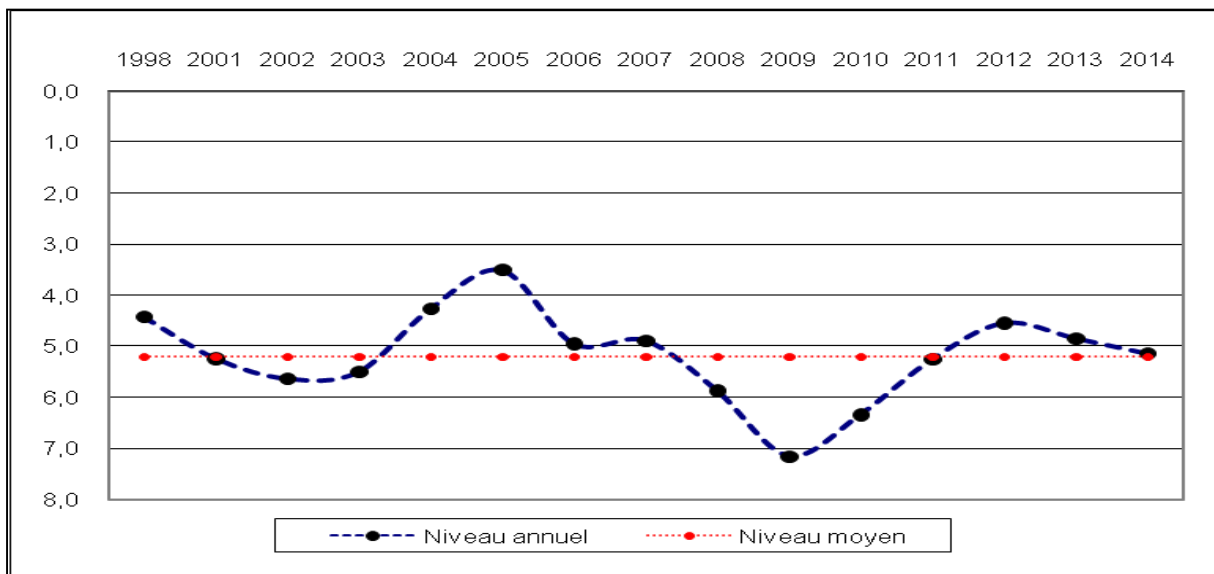


Figure I.7. Variation de la profondeur du niveau statique (Période 1998 -2014)
(D'après ANRH, 2015)

e) **Interprétation de la carte piézométrique du mois d'octobre 2014**

L'examen de la carte piézométrique, de la période des basses, eaux du mois d'octobre 2014 (Figure 8), montre l'existence de deux axes d'écoulements principaux :

- Pour la partie Sud, 1^{er} axe principal d'écoulement d'une direction S.SE - N.NW, avec un gradient hydraulique de l'ordre de 10 ‰ entre les points d'eaux P 12 et P 02.
- Pour la partie Nord, 2^{ème} axe principal d'écoulement d'une direction N.NE - S.SW, avec un gradient hydraulique de l'ordre de 25 ‰ entre les points d'eaux P 09 et F 03.

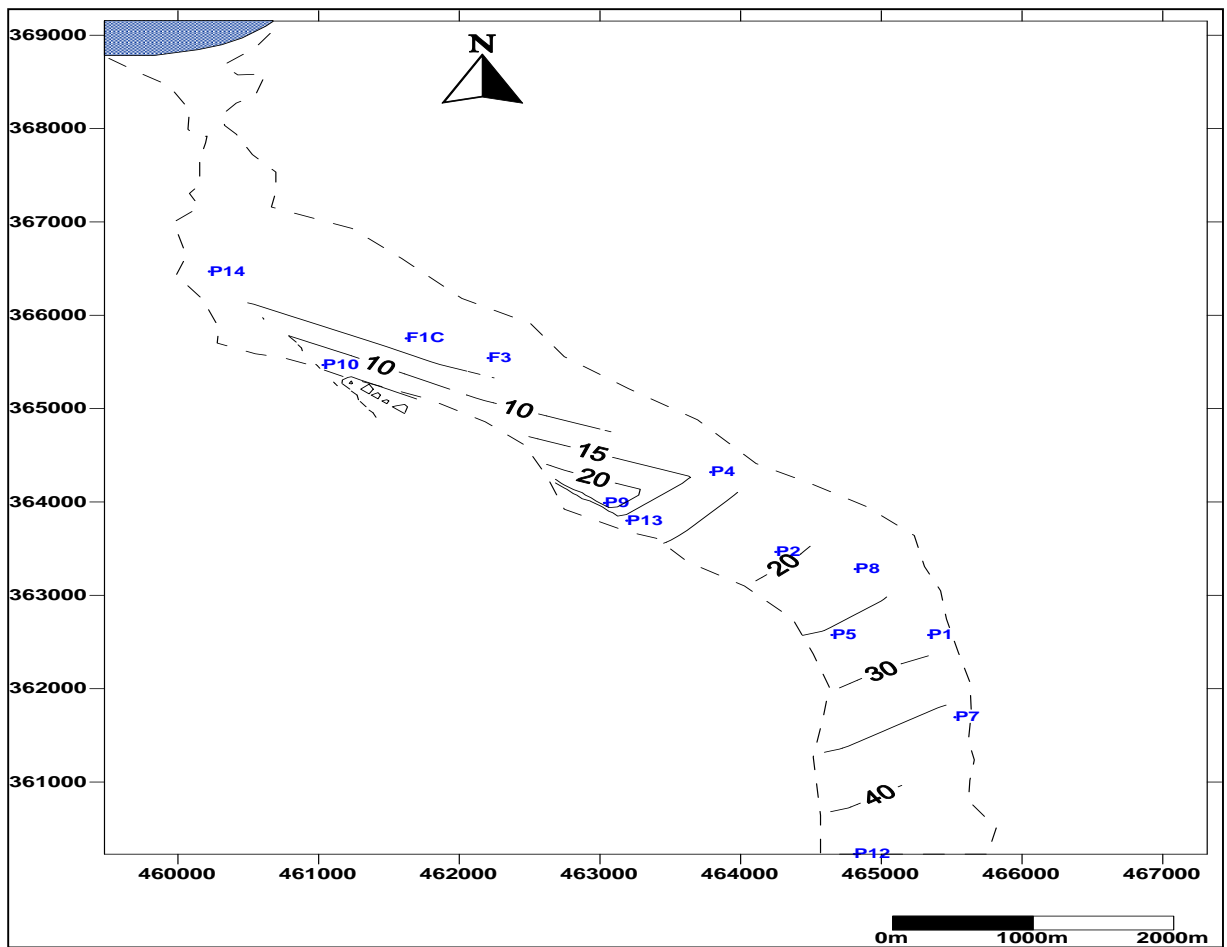


Figure I.8. Carte piézométrique de la nappe alluviale de l'oued El Hachem du mois d'Octobre 2014 (D'après ANRH, 2015)

f) Bilan hydrologique de la nappe alluviale de l'oued El Hachem

Le niveau de la nappe est influencé par les facteurs suivants :

- Les précipitations en période pluvieuse avec une moyennes de 553 mm/an (station barrage de Boukourdene), sur un impluvium réduit représenté par la plaine et ses deux versants estimés à 60 Km², soit 27 % du bassin versant de l'oued El Hachem, cela se traduit par une faibles recharge ;
- La recharge de la nappe par les lâchées du barrage de Boukourdene en période estivale ;
- Les prélèvements dans les forages et puits pour l'A.E.P. et l'irrigation de la région.

Recherche bibliographique

II. Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines

II.1. Notions de vulnérabilité

La vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine est une notion complexe par le nombre de facteurs qu'elle fait intervenir et par l'importance variable qui peut être attribuée à chacun.

Dans la littérature nous pouvons rencontrer plusieurs définitions de la vulnérabilité des nappes à la pollution bien que convergeant vers le même sens.

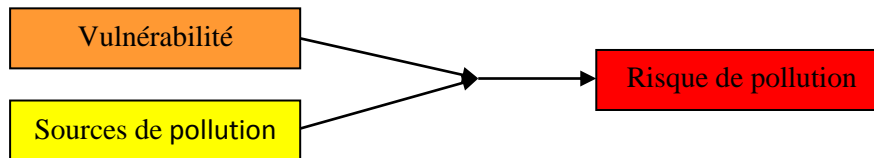
- *En 1968, J. MARGAT* indiquait qu'on pouvait la définir « comme le fait pour une nappe souterraine d'être plus ou moins exposée par les conditions naturelles à un risque donné d'être polluée ».
- *En 1970, M. ALBINET*, reprend cette définition sous la forme suivante « la vulnérabilité des nappes correspond aux possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans les terrains rencontrés en surface et pour les réservoirs dans lesquels sont contenus la première nappe d'eau souterraine généralement libre ».
- *En 1980, M.F PARASCANDOLA* précisait que « définir le degré de vulnérabilité suppose que l'on ait su caractériser les agressions et les défenses, que l'on ait su convoquer les fonctions d'agressions et de défenses, que l'on ait défini une fonction de vulnérabilité que l'on ait fixé une échelle de vulnérabilité ».
- *En 1982, G.CASTANY* écrivait « la vulnérabilité des nappes à la pollution est leur sensibilité aux différents facteurs physiques stables, déterminant la mesure où elles sont dans des conditions naturelles plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. Elle étudie les possibilités de propagation dans l'espace souterrain. Celle-ci est, en premier lieu, liée à l'autoépuration naturelle du sol, donc à la présence de conditions indispensables à son action. En second lieu, elle est favorisée par la circulation de l'eau ».

II.2. Objectifs des cartes de vulnérabilité

L'objectif principal du calcul de la vulnérabilité est de créer un système qui peut être utilisé pour évaluer une potentielle pollution des eaux souterraines dans n'importe quelle région.

La convenance d'un site pour une décharge public ou pour une unité polluante n'est pas basée uniquement sur une potentielle pollution des eaux souterraines d'une région mais aussi sur d'autres critères.

La carte de vulnérabilité, généralement d'une nappe libre, donne une idée sur la répartition spatiale de l'indice qui exprime le degré de vulnérabilité des sols et sous-sols des différentes zones. Une zonation de la vulnérabilité est ainsi obtenue qui, comparée à un inventaire des sources de pollution (carte de situation 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.



Ainsi les aménagistes, grâce à cet outil, pourront planifier l'implantation d'entreprise dans un territoire donné en fonction de ce qu'elles rejettent comme polluant d'une part, et du degré de vulnérabilité propre au site considéré, d'autre part.

Il est risqué pour une nappe d'eau souterraine, surtout libre, de prévoir des unités industrielles polluantes dans des zones très vulnérables alors que nous pouvons planifier leur réalisation sur des sites où l'indice de vulnérabilité est faible. Ce type de carte va donc participer à la protection des eaux souterraines.

I.3. Les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

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

La littérature afférente au sujet montre l'existence de plusieurs méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des nappes aux risques de pollution. Nous choisissons de présenter les méthodes empiriques simples, inventoriées jusqu'à ce jour. Ces méthodes peuvent être regroupées comme suite :

II.3.1. Méthodes basées sur les documents cartographiques

Ce sont des méthodes qui reposent essentiellement sur des variables stables ou non, caractérisant les conditions hydrogéologiques telles que la profondeur de la nappe, la nature géologique et la couverture végétale.

- **Albinet et Margat (1970)** : Les grands principes cartographiques proposés consistent à représenter une vue générale des paramètres qui conditionnent la vulnérabilité. Ces paramètres sont : la nature géologique du sous-sol, la profondeur de la nappe et le drainage de surface.
- **BRGM (1971 – 1983)** : En 1971, Lichardt et Collin reprennent la méthode proposée par Albinet et Margat et l'adoptent dans le but de cartographier la vulnérabilité des nappes d'eau souterraines de la région lyonnaise (France) à l'échelle du 1/50 000^{ème}. (**haddouche, 2011**) Le document, qu'ils ont obtenu, résulte de la superposition de trois cartes de même échelle :

BIBLIOGRAPHIE

- La première traduit l'altitude des terrains à se laisser traverser par un contaminant. Elle s'appuie sur la géologie et le faciès des réservoirs ;
 - La deuxième représente la répartition spatiale des ressources exploitées ;
 - La troisième concerne les contraintes d'aménagement.
- **Parascandola (1980)** : Cet auteur suppose que la représentation de la vulnérabilité qui, tient compte de chaque type de pollution des eaux souterraines à des fins d'intervention sur le milieu demanderait une mise à jour fréquente. Constatant une difficulté dans l'estimation et la mise en relation des paramètres de vulnérabilité relatifs à la nature des contaminants et des conditions du milieu, Parascandola et Albinet (1983)(Haddouche .A,2011)ont suggéré que seule la vulnérabilité en liaison avec la structure hydrogéologique et physiographique du milieu peut être rendue de façon synthétique.
- **La méthode Wipp (environnement Ontario, 1982)** : Une série de carte de vulnérabilitéde plusieurs aquifères à l'échelle 1/5 000^{ème} a été publiée par le Ministère de l'Environnement de l'Ontario en 1982, s'appuyant sur les paramètres suivants :
- La perméabilité du sol de surface ;
 - Le mouvement de l'eau souterraine ;
 - La profondeur de la nappe ;
 - L'utilisation de l'eau souterraine régionale.

Pour une région donnée, trois type de vulnérabilité peuvent être associés : fort, moyen et faible.

- **Environnement Québec Me Cormack (1985)** : A partir d'une étude pilote menée sur la région de Granby (1985), deux cartes de vulnérabilité ont été publiées sur la base de la composition du matériel de surface, la topographie et la perméabilité.

Le degré de vulnérabilité est représenté par un dégradé de couleur dont la teinte passe du blanc (vulnérabilité faible) au gris foncé (vulnérabilité forte). Des symboles complémentaires ont été ajoutés pour identifier certaines activités humaines (industries,..., etc) pouvant influencer le degré de vulnérabilité d'un site été ajoutés. (Haddouche .A,2011)

- **La méthode anglaise NRA (National Rivers Authority, 1992)** : Elle est basée essentiellement sur les caractéristiques de la couche du sol recouvrant le milieu aquifère. Elle tient compte également de :
- La nature du sol;
 - La présence d'une source potentielle de pollution;
 - La nature géologique des couches formant la zone non-saturée;
 - L'épaisseur de la zone non saturée ou l'épaisseur du toit dans le cas d'une nappe captive. (Haddouche .A,2011)

II.3.2. Méthodes basées sur un système de cotation numérique

L'objectif principal visé par les concepteurs est de rehausser l'importance relative des paramètres physiques d'un aquifère pour la classification relative des régions considérées et de donner un cadre plus rigoureux aux méthodes cartographiques. (O.Haddad, 2017)

➤ *Silka et Swearigen (1978)* : L'approche, simple et peu coûteuse, se fait en huit étapes :

1. Description de la zone non saturée : on attribue une cote entre 1 et 10 selon sa composition lithologique (exemple gravier = 10) ;
2. Détermination de l'extension de l'aquifère : une cote maximale de 6 pour une nappe ayant une grande extension verticale et une cote de 1 pour un aquifère de faible extension verticale ;
3. Caractérisation de la qualité physico-chimique de l'eau : une eau impropre à la consommation nécessite un degré de protection moindre (cote = 1), alors qu'une eau potable nécessite une plus grande protection (cote = 5) ;
4. Concernant les pesticides : une cote variable de 5 à 8 est attribuée suivant 5 critères : suivants : toxicité, mobilité, persistance, volume et concentration du polluant ;
5. Effectuer la sommation des cotes évaluées dans les quatre premières étapes. Une cote de 29, pouvant ainsi être obtenue, signifiant une vulnérabilité élevée ;
6. On attribue une cote maximale de 9 pour désigner la distance d'une région vulnérable à un utilisateur d'eau situé à proximité ;
7. Evaluation du degré de confiance pour chacune des estimations des paramètres en introduisant une lettre d'appréciation (exemple : A = bonne estimation) ;
8. L'étape finale consiste à présenter les résultats de chacune des étapes sous forme de tableau permettant de visualiser l'importance de chaque paramètre. L'index de vulnérabilité permet une classification rapide des régions mais aucun outil cartographique n'est envisagé pour cette méthode.

➤ *La méthode Drastic (NWWA, 1985)* : Cette méthode a été conçue dans le but d'offrir une base pour l'évaluation comparative de certaines régions en regard du potentiel de pollution des eaux souterraines. Elle a été appliquée et expérimentée sur douze bassins hydrogéologiques différents des Etats Unis d'Amérique.

Les concepteurs emploient sept paramètres hydrogéologiques et physiographiques considérés comme importants dans les mécanismes de défense mis à la disposition du système aquifère contre une éventuelle pollution déversée en surface

➤ *La méthode du pouvoir épurateur (Rehse, 1977)* : Le pouvoir épurateur du sol et de la zone non saturée est important pour éviter la propagation d'une pollution en direction des nappes.

BIBLIOGRAPHIE

La méthode proposée par Rehse tient compte de divers processus physiques, mécaniques et biochimiques qui agissent sur le transport des bactéries, sur la dégradation des composés organiques et chimiques qui interfèrent sur le transfert des solutés.

➤ **Méthode de Prast (Lallemand-Barres, 1989)** : C'est une méthode empirique mise au point par Rehse en 1977 et qui consiste à estimer dans quelle mesure un polluant déversé en surface du sol verra sa teneur diminuer après un parcours vertical jusqu'à la nappe puis un parcours horizontal dans la nappe jusqu'au point de prélèvement. Le paramètre le plus utilisé est le pouvoir épurateur vertical du sous-sol (P) qui intègre la nature du matériel de la zone non saturée, son épaisseur, sa perméabilité verticale et la profondeur de la nappe. Elle utilise également cinq paramètres qui sont :

- Pouvoir épurateur (P);
- La recharge nette (R);
- Le type de l'aquifère (A);
- Le type de sol (S);
- La topographie (T);

Le pouvoir épurateur des terrains est calculé par la formule :

$$M_x = M_d + M_r$$

Avec :

M_x : pouvoir épurateur sur le trajet vertical ;

M_r : pouvoir épurateur sur la distance horizontale.

L'épurateur est complète si : $M_x = 1$

Chaque paramètre est assigné d'un poids de 1 à 8 et d'une cote de 1 à 10 qui correspond à son importance dans l'atténuation des polluants

Tableau II.1. Poids relatifs des paramètres Prast

Paramètre	Poids	Exemple d'intervalles de cote pour le paramètre P	
		Rang	Cote
P	8	< 0,1	6
R	4	1-2	5
A	3	2-3	3
S	2	3-4	2
T	1	> 4	1

BIBLIOGRAPHIE

L'index Prast est calculé en faisant la somme pondérée des poids par les cotes des 5 paramètres (l'indice maximale = 144 et l'indice minimale = 21).

$$\text{Indice Prast} = P_c.P_p + R_c.R_p + A_c.A_p + S_c.S_p + T_c.T_p$$

Où :

c : cote ; p : poids

On définit alors cinq classes de vulnérabilité : très faible, faible, moyen élevée et très élevée correspond aux intervalles de degré respectif suivant :

$$[21 - 30 [, [30 - 51 [, [51 - 83 [, [83 - 124 [, [124 - 144 [.$$

- **La méthode de Vierhuff (1981)** : Cette méthode tient compte principalement de critères relatifs à la structure physique des aquifères, au régime hydraulique, à la composition du sol et de la zone vadose ainsi qu'à la profondeur de l'eau dans l'aquifère. Vierhuff propose le regroupement de ces paramètres en cinq classes de vulnérabilité de forte à très faible.
- **La méthode de Villumsen et Sonderskov (1982)** : Quatre paramètres ont été retenus par ces auteurs. Le premier étant la charge piézométrique (une cote de 0,5 m est attribuée pour une différence de charge supérieure à 30 m, et de 3,5 dans le cas d'une différence de charge inférieure à 5 m). Les autres paramètres sont la variation de la perméabilité dans la zone vadose, la capacité de réduction et la capacité d'adsorption.

A chacun de ces paramètres, une cote de 0 à 4 est attribuée. L'index de vulnérabilité est calculé à partir de la valeur moyenne des quatre paramètres utilisés.

- **La méthode de Haertlé (1983)** : Deux principaux paramètres sont à la base de cette méthode : la perméabilité et l'épaisseur des couches de la zone non saturée. Pour un terrain donné, trois types de perméabilité peuvent être symbolisés sur carte.

Tableau II.2. Symbole de classification de la perméabilité des terrains

Epaisseur et nature lithologique	Perméabilité	Symbole
Plus de 10m de dépôts grossiers	Forte	*
Entre 5 et 10m de dépôts grossiers	Moyenne	+
Moins de 5m de dépôts grossiers et plus de 5m d'argiles ou de silts	Faible	-

La juxtaposition de ces symboles sur une carte, sur laquelle sont tracés les limites des aquifères, fournit des cartes de vulnérabilité dont les trois classes sont le résultat de l'interprétation des symboles obtenus.

II.3.3. Méthodes fondées sur la caractérisation des rejets

Etant donné la superficie limitée et les impacts violents qu'imposent des aménagements comme dépotoirs, les remblais de mines et les réservoirs supposés étanches, l'élaboration des méthodes spécifiques à ces régions s'avère indispensable.

- **La méthode de JRB associates (1982)** : Elle fait appel à une dizaine de paramètres, regroupés en quatre catégories distinctes et qui sont :
 - Les facteurs récepteurs (distance d'un point d'utilité, population,...etc.) ;
 - Les sites aquifères (profondeur de la nappe, perméabilité,...etc.) ;
 - Les caractéristiques des rejets (toxicité, persistance,...etc.) ;
 - Les modes d'aménagement (qualité de rejets, superficie,...etc.).

A chaque paramètre on attribue une cote de 0 à 3. De plus, on associe à chacun des éléments un poids multiplicatif. On effectue ensuite la somme de chacun des éléments pondérés dans chacune des catégories de paramètres. La vulnérabilité d'un site s'obtient alors en additionnant les scores obtenus dans chaque groupe distinct.

- **La méthode de Legrand (1983)** : Elle est validée uniquement pour les nappes libres, vise la classification relative des régions affectées par les dépotoirs et les sites d'enfouissement sanitaires. Les paramètres retenus sont :
 - La distance des points d'utilisation ;
 - La profondeur de la nappe ;
 - Le gradient hydraulique ;
 - La perméabilité et l'adsorption.

Chaque paramètre est assigné d'une cote qu'on additionne pour évaluer le degré de vulnérabilité. La particularité de cette méthode réside dans le fait qu'elle permet de pondérer l'index de vulnérabilité selon la sévérité du contaminant. Un polluant hautement toxique aura pour effet d'augmenter la vulnérabilité déjà fixée d'après les critères hydrogéologiques.

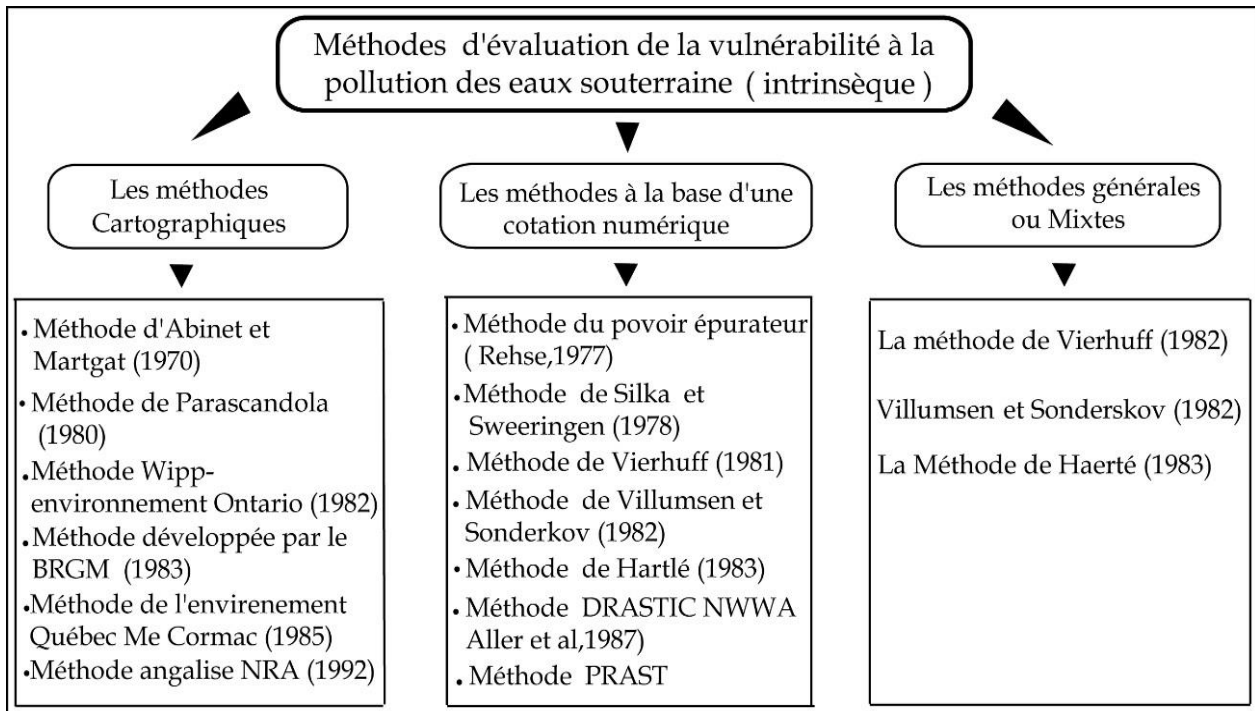
- **Union Carbide (1982)** : La compagnie Union Carbide, producteur de l'aldicarbe (un insecticide utilisé dans la culture du tabac et de la pomme), a mis au point une méthode spécialement adaptée à la prévention d'une éventuelle pollution des aquifères par l'aldicarbe. Elle est basée sur un système de cotation numérique des paramètres suivants :
 - Catégorie 1: comprend le taux d'épandage, superficie traitée, état de culture,
 - Catégorie 2: en particulier les conditions de dégradation du pesticide,
 - Catégorie 3: reflétant les conditions de transport en particulier la précipitation, l'irrigation, le type de sol, l'évapotranspiration potentielle, la profondeur de la nappe et le type d'approvisionnement. Des scores sont attribués à chaque paramètre. Par la sommation de chacun des scores d'une même catégorie, l'index de vulnérabilité est alors obtenu en effectuant le produit des cotes à l'intérieur des trois catégories. Nous remarquons que cette méthode n'accorde pas beaucoup d'intérêt aux caractéristiques hydrogéologiques.

BIBLIOGRAPHIE

- **La méthode du BRGM (Suais, 1990)** : L'auteur fait emploi des formules de pondération des paramètres du sol qui constitue la première barrière et souvent la plus efficace pour s'opposer au transfert des polluants vers la profondeur.

Ces formules font intervenir les paramètres qui entrent en exercice dans les processus (physique, chimique et biologique) d'atténuation des polluants. Ces paramètres sont choisis en fonction de la nature de la substance contaminante.

Tableau II.3. Récapitulatif de quelques méthodes d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité



Les méthodes des deux derniers groupes permettent de calculer des indices de vulnérabilité s'apparaissent aussi bien à la cartographie. Les indices ainsi déterminés permettent même des traitements numériques et donc une cartographie "multicritères".

II.4. Choix des méthodes adaptables aux conditions hydrogéologiques en Algérie

L'une des cartes sur la vulnérabilité des aquifère en Algérie, a été réalisée par Touileb (1997) suivis d'autres applications. La sélection d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité parmi celles que nous venons de citer, a nécessité le développement d'un test qui permet leur classification selon leurs niveaux d'efficacité.

Cette sélection nous permet de distinguer deux types de méthodes :

- Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité "générale", c'est à dire celles qui intègrent uniquement les paramètres qui caractérisent la défense ou la sensibilité d'un aquifère devant un polluant déversé en surface;

- Les méthodes dites "spécifiques", c'est à dire celles qui tiennent compte de la nature du polluant est des différents processus de pollution. Ce type de méthode permet en fait de répondre à des problèmes de pollution spécifique d'une région donnée.

• **Discussion**

Malgré le nombre considérable des méthodes proposées pour l'évolution de la vulnérabilité, un grand effort reste à faire pour la normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité des nappes à la pollution. Cet effort doit porter en premier lieu sur une définition rigoureuse des paramètres à prendre en compte, ayant réellement une relation avec la notion de vulnérabilité, avant de fixer, dans un second temps, des échelles de notation pour chacun des paramètres.

Enfin, il y a lieu de rechercher la meilleure méthode pour conjuguer les différents critères et les notes qu'on leur attribue. Afin d'effectuer un choix plus éclairé sur une méthode présentant les meilleures performances en ce qui concerne surtout son efficacité et sa généralisation à différents types d'aquifères. Les résultats obtenus, présentés sous forme d'histogramme, montrent que se sont les méthodes axées sur une indexion numérique de la vulnérabilité qui obtiennent les Meilleurs scores.

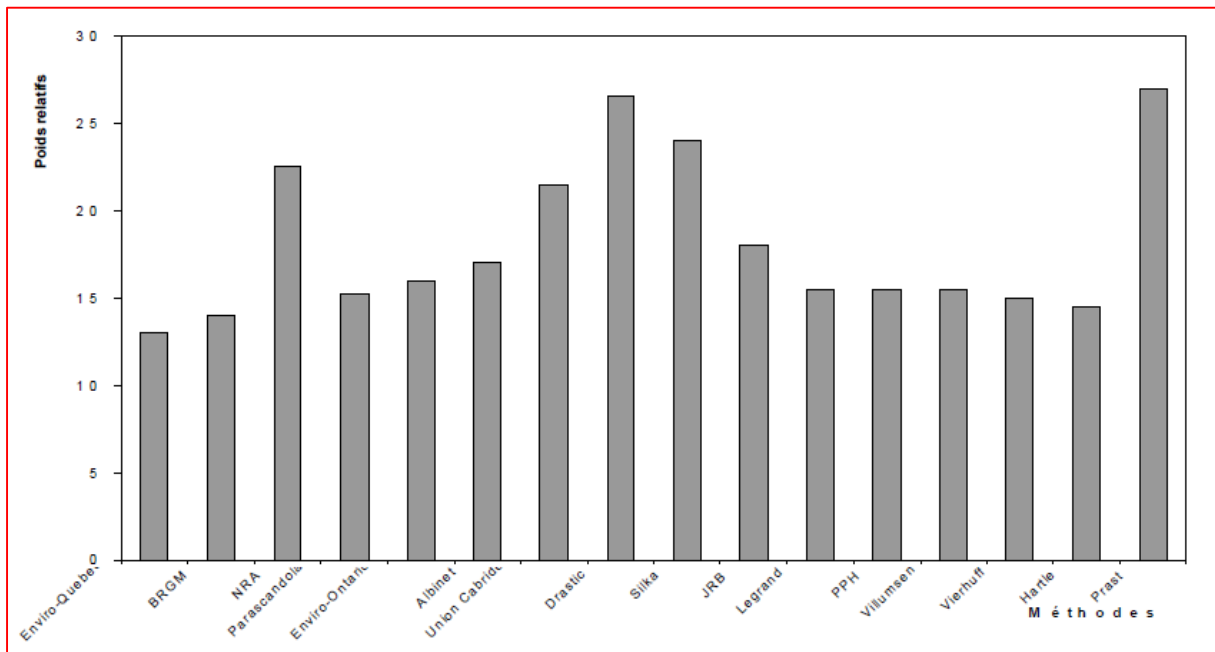


Figure 2.1. Classification des méthodes de vulnérabilité selon le test de Frechette (1987)

II.5. Description et aspect théorique de la méthode « Drastic »

Chaque unité hydrogéologique a ses propres caractéristiques physiques qui peuvent faire augmenter ou atténuer la pollution potentielle des eaux souterraines. Une large bande de dispositions techniques est considérée vu l'importance relative de nombreux caractères physiques qui peuvent conditionner la pollution potentielle. Les agents que renferme l'aquifère sont la chimie, la température, la transmissivité, la tortuosité les phases gazeuses

BIBLIOGRAPHIE

transportées et bien d'autres qui peuvent être évalués. La disponibilité de données cartographiable a été également considérée. Comme résultat de cette évaluation, les plus importants paramètres cartographiables qui influencent la pollution potentielle sont : La profondeur de la nappe (D), le recharge nette (R), les matériaux de l'aquifère (A), les matériaux du sol (S), la topographie (pente) (T), l'impact de la zone non saturée (I) et la conductivité hydraulique de l'aquifère (C). Ces paramètres ont donné DRASTIC qui est la méthode que je traiterais dans ma thèse.

L'indice DRASTIC est basé donc sur l'évaluation de ces sept (07) paramètres hydrogéologiques. Une complète description de ces derniers et de leur mécanisme intrinsèque est résumée dans le paragraphe II.7. Chaque paramètre est assigné d'un poids relatif fixe qui correspond à son importance dans la définition du degré de vulnérabilité ou de la pollution potentielle.

Poids des paramètres : Chaque paramètre a été évalué selon son importance par rapport aux autres aussi il lui a été assigné un poids relatif compris entre 1 et 5 (Tableau 2.4). Le paramètre significatif dans l'évaluation de la pollution potentielle a un poids de 5 et le moins important sera coté à 1. Ces poids sont constants et ne peuvent être changés.

Rang : Chaque paramètre DRASTIC a été subdivisé en plusieurs rangs ou en type de matériaux significatifs ayant un impact dans l'estimation de la pollution potentielle (Tableaux 2.5 à 2.11). Une description des matériaux types est consignée dans le paragraphe (II.7) : matériaux du sol, matériaux de l'aquifère, Impact des matériaux de la zone non saturée.

Cote : Chaque rang pour chaque paramètre a été évalué selon son importance par rapport aux autres aussi il lui a été assigné une cote relative comprise entre 1 et 10. Il a été assigné à tous les paramètres une seule valeur par rang sauf pour les matériaux de l'aquifère et pour l'impact des matériaux de la zone non saturée à qui il a été attribué une cote typique et une gamme variable de cote. Cette variation de cote permet à l'utilisateur de choisir soit la valeur typique soit d'ajuster la valeur sur la base de données spécifiques. La cote est semblable que ce soit pour l'indice DRASTIC **M.Sinan et J.M.Touillard (Mai 1993)**

Tableau II.4. Paramètres DRASTIC et leurs poids relatif

Numéro	Paramètres	Poids (Weight)
1	Profondeur de la nappe (Depth to groundwater)	5
2	Recharge nette (Recharge)	4
3	Matériaux de l'aquifère (Aquifer media)	3
4	Matériaux du sol (Soil media)	2
5	Topographie (Topography)	1
6	Impact de la zone non saturée (Impact of vadose zone media)	5
7	Conductivité hydraulique de l'aquifère (Conductivities of aquifer media)	3

➔ **Estimation des cotes ou « Rating »**

Tableau II.5. Cotes (Rating) de la profondeur de la nappe (Depth to groundwater)

Rang (Range)		Cote (Rating)
Mètre	Feet	
0 - 1,52	0 - 5	10
1,52 - 4,57	5 - 15	9
4,57 - 9,14	15 - 30	7
9,14 - 15,24	30 - 50	5
15,24 - 22,85	50 - 75	3
22,85 - 30,47	75 - 100	2
> 30,47	> 100	1

Tableau II.6. Cotes (Rating) de la recharge nette

Rang	(Range)	Cote
Centimètre	Inches	(Rating)
0 - 5,08	0 - 2	1
5,08 - 10,16	2 - 4	3
10,16 - 17,78	4 - 7	6
17,78 - 25,4	7 - 10	8
>25,4	>10	9

Tableau II.7. Cotes (Rating) des matériaux de l'aquifère

Rang (Range)	Cote (Rating)	Cote Type (Typical rating)
- Argiles schisteuses massives (massive shale)	1-3	2
- Roches métamorphiques ou éruptives (métamorphic / Igneous)	2-5	3
- Roches métamorphiques ou éruptives altérées (weathered métamorphic / Igneous)	3-5	4
- Terre de glacier	4-6	5
- Séquences de couches peu épaisses de grès, calcaires et schistes en alternance (thin bedded sandstone, limestone, shale séquences)	5-9	6
- Grès massif (massive sandstone)	4-9	6
- Calcaire massif (massive limestone)	4-9	6
- Sables et graviers (sand and gravel)	6-9	8
- Basalte (basalt)	8-10	9
- Calcaire karstifié (karst limestone)	9-10	10

BIBLIOGRAPHIE

Tableau II.8. Cotes (Rating) des matériaux du sol

Rang (Range)	Cote (Rating)
- Peu épais ou absent (thin or absent)	10
- Graviers (gravel)	10
- Sables (sand)	9
- tourbe, matières organiques non décomposées (peat)	8
- couches très minces et /ou en association de couches d'argiles (shrinking and/ or aggregated clay)	7
- Terre grasse, limono-sableuses (sandy loam)	6
- Terre grasse équilibré en argile, limon, sables (loam)	5
- Terre vaseuses, limoneuses (silty loam)	4
- Terres argileuses, limono-argileuses (clay loam)	3
- Matières organiques décomposés (muck)	2
- Argile non épais et non en association (No shrinking and no aggregated clay)	1

Tableau II.9. Cotes (Rating) de la Topographie

Rang (Range) en % (percent slope)	Cote (Rating)
0 - 2%	10
2 - 6	9
6 - 12	6
12 - 18	3
>18	1

Tableau II.10. Cotes (Rating) de l'impact des matériaux de la zone non saturée

Rang (Range)	Cote (Rating)	Cote Type (Typical rating)
- Couches captives	1	1
- Limon /Argile (silt / clay)	1 - 2	1
- Schiste (shale)	2 - 5	3
- Calcaire (limestone)	2 - 7	6
- Grés (sandstone)	4 - 8	6
- Couches de calcaires, grés, et schistes en alternance (bedded limestone , sandstone , shale)	4 - 8	6
- Roche métamorphique - gneis (éruptive) (métamorphic /ignéous)	4 - 8	6
- Sables et graviers (sands and gravels)	6 - 9	8
- Basalte (basalt)	2 - 10	9
- Calcaire karstifié (karst limestone)	8 - 10	10

BIBLIOGRAPHIE

Tableau II.11. Cotes (Rating) de la conductivité hydraulique (perméabilité)

Rang (Range)		Cote (Rating)
m/s	Galon per day/ feet2 (gpd/ft2)	
$4,72 \times 10^{-7} - 4,72 \times 10^{-5}$	1 - 100	1
$4,72 \times 10^{-5} - 1,416 \times 10^{-4}$	100 - 300	2
$1,416 \times 10^{-4} - 3,304 \times 10^{-4}$	300 - 700	4
$3,304 \times 10^{-4} - 4,720 \times 10^{-4}$	700 - 1000	6
$4,720 \times 10^{-4} - 9,44 \times 10^{-4}$	1000 - 2000	8
$> 9,44 \times 10^{-4}$	> 2000	10

II.6. Calcul de l'indice « Drastic »

L'indice DRASTIC est numérique. Il représente la somme pondérée de sept (07) cotes correspondant aux sept (07) paramètres hydrogéologiques.

A chaque paramètre est associée une cote variant de 1 à 10 en fonction des conditions locales.

En outre, à chacun est attribué un poids relatif fixe et prédéterminé (Tableaux 2.4 et 2.5) qui correspond à son importance dans le processus de lixiviation et d'atténuation des polluants. Ainsi, un paramètre prépondérant dans le processus de contamination se voit assigner d'un poids de cinq (05), alors qu'un paramètre ayant moins d'impact se voit attribuer un poids de un (01).

Les tableaux (2.5 à 2.11) permettent aux paramètres considérés l'attribution de cotes en fonction de leurs valeurs locales. L'indice local à chaque paramètre est partiel. Il est obtenu en multipliant sa cote par son poids relatif.

L'indice DRASTIC = Pollution potentielle = $P1.C1 + P2.C2 + P3.C3 + P4.C4 + P5.C5 + P6.C6$

D'où : P = poids (weight) ; C = cote (rating)

Ce système ou cette équation permet à l'utilisateur de déterminer une valeur numérique pour n'importe quel site hydrogéologique. Une fois l'indice DRASTIC calculé, il est possible de connaître les zones qui ont, par rapport aux autres, plus de chance d'être susceptible à une contamination des eaux souterraines. Un indice DRASTIC élevé implique une grande pollution potentielle. C'est ainsi que les valeurs extrêmes sont :

Index DRASTIC maximum = 226 (très vulnérable).

Index DRASTIC minimum = 23 (invulnérable).

L'indice DRASTIC « pesticides » peut être utilisé dans les régions où on note une intense activité agricole et où les eaux souterraines sont susceptibles d'être polluées par les pesticides. Il représente un cas spécial de l'indice DRASTIC. La seule différence réside en une attribution différente aux valeurs des poids de quelques paramètres. En effet puisque le sol joue un rôle important dans l'agriculture il lui a été assigné un poids de 5 alors qu'il était à 2.

La topographie, l'impact des matériaux de la zone non saturée et la conductivité hydraulique de l'aquifère ont été légèrement changés parce qu'ils ont leur importance dans l'atténuation ou dans la facilité de passage des pesticides. Le poids des autres paramètres ainsi que les rangs et les cotes restent semblables, sans changement. **M. Albinet... (Jan. 1989)**

II.7. description des paramètres de la méthode Drastic

II.7.1. Les critères de la méthode DRASTIC

L'indice DRASTIC a été développé selon les principaux critères :

1. Le polluant est introduit dans la surface du sol ;
2. Le polluant atteint les eaux souterraines par l'infiltration des eaux de pluies ;
3. Le polluant a une mobilité dans l'eau ;
4. La zone utilisée pour l'évaluation de l'indice DRASTIC est supérieure à 41 ares.

La méthode suppose que le polluant est déversé à la surface du sol, entre dans le sol, traverse la zone non saturée et entre dans l'aquifère en atteignant les eaux souterraines.

II.7.2. Profondeur de la nappe

La profondeur de la nappe est importante, premièrement parce qu'elle détermine l'épaisseur du matériel à travers lequel un polluant doit passer avant d'arriver à l'aquifère et il peut aider à déterminer la durée de contact avec les matériaux environnants. En général, il y a de forte chance que le polluant s'atténue plus la profondeur de la nappe augmente parce que plus le niveau de l'eau est profond plus cela implique une durée de traversée plus grande. La présence d'une couche à faible perméabilité peut rendre captif l'aquifère et limiter la traversée du polluant vers l'aquifère.

II.7.3. Recharge nette

La première source d'alimentation des eaux souterraines est l'infiltration des eaux de pluies à travers le sol et la zone non saturée. La recharge nette représente la somme des eaux, par unité de surface, qui pénètre dans le sous-sol et arrive à la nappe. Ces eaux infiltrées véhiculent le polluant verticalement vers la zone saturée puis horizontalement dans l'aquifère. Par conséquent, ces eaux sont le principal véhicule pour filtrer et transporter un polluant solide ou liquide vers la nappe. Donc plus nous avons une infiltration importante plus il faut s'attendre à une pollution conséquente des eaux souterraines. Cette évidence est valable jusqu'au point où la recharge est assez grande pour causer une dilution du polluant à un tel degré que la potentielle pollution cesse d'augmenter et commence à diminuer.

La méthodologie considère la recharge nette comme la quantité totale des eaux qui s'infiltrent et arrive à la nappe.

II.7.4. Matériaux de l'aquifère

L'écoulement d'eau dans un aquifère est conditionné par les matériaux de l'aquifère. Le cheminement que doit suivre un polluant est donc dépendant du système d'écoulement d'un aquifère. La longueur du cheminement est importante pour maîtriser la détermination du

temps nécessaire à l'atténuation du processus de contamination d'une nappe par adsorption, par réaction chimique et par dispersion. En général plus les grains sont grands, plus les fractures sont grandes et nombreuses, donc plus la perméabilité est grande et plus la capacité d'atténuation de la pollution de l'aquifère est petite.

II.7.5. Matériaux du sol

Les matériaux du sol concernent la partie la plus superficielle de la zone non saturée qui est caractérisée par une importante activité biologique. Le sol est communément considéré comme la partie formée par des produits d'altérations et constituant la zone superficielle de la terre et sa profondeur moyenne fait 180 cm ou moins à partir de la surface de la terre. Le sol a un impact significatif sur la totalité de la recharge qui peut s'infiltrer dans le sous-sol et ce en dehors de la capacité du polluant à pénétrer verticalement dans la zone non saturée. La présence de matériaux à texture fine comme les limons et les argiles diminue la perméabilité du sol ce qui limite la migration d'un polluant. La matière organique en grande quantité dans le sol peut être aussi un facteur important, particulièrement dans l'atténuation des pesticides. Les composés humiques sont également principalement responsables de l'adsorption.

II.7.6. Topographie

Le terme topographie, ici, veut dire la pente et sa variation dans une région. La topographie conditionne en général l'infiltration de la pluie et de n'importe quel polluant. En effet quand celui-ci se trouve sur une pente raide, il a tendance plutôt à ruisseler et quand il est sur une surface plane.

Cela provoque sa stagnation et ainsi il va mieux s'infiltrer. Par conséquent pour le deuxième cas la pollution potentielle est plus grande.

La pente quand elle varie de 0 à 2 %, c'est idéal pour l'infiltration de la pluie et de la pollution parce que cela offre les conditions d'une stagnation. Contrairement, quand la pente est supérieure à 18 % le polluant ou la pluie a plus tendance à ruisseler et la probabilité d'infiltration est la plus faible dans ce cas.

Pour l'évaluation de ce paramètre, l'utilisateur doit consulter les cartes de pentes qu'on trouve généralement dans les études pédologiques sinon il est obligé de se rabattre sur les cartes topographiques et il doit dans ce cas faire lui-même les calculs

II.7.7. Impact de la zone non saturée

La zone non saturée est définie comme la zone se trouvant au-dessus de la surface piézométrique et qui n'est pas saturée en eau. Elle renferme une phase solide (la roche), une phase liquide (l'eau) et une phase gazeuse (l'air). La biodégradation, la neutralisation, la filtration mécanique, les réactions chimiques, la volatilisation et la dispersion sont autant de processus qui caractérisent la zone non saturée. La biodégradation et la volatilisation diminuent avec la profondeur. Les matériaux jouent également un rôle important par leur constitution et leur agencement dans l'atténuation d'une pollution ou par la facilité du passage que peuvent procurer les fractures.

II.7.8. Conductivité hydraulique de l'aquifère

La conductivité hydraulique donne une idée sur la capacité du matériel de l'aquifère à être traversé par l'eau. Elle dépend des interconnexions des vides à l'intérieur de l'aquifère qui est la somme de la porosité inter granulaire, des fractures et des joints entre les couches. Une conductivité hydraulique élevée implique une pollution potentielle importante.

Les valeurs de la conductivité hydraulique sont calculées par l'interprétation des essais de pompage. Elles peuvent être circonscrites dans les thèses et les études hydrogéologiques. Nous pouvons les trouver dans des tableaux de certains ouvrages techniques.

II.7.9. Interaction entre les paramètres

Au-delà de la description et de l'application de l'indice DRASTIC il a été noté qu'il y avait une certaine redondance entre quelques paramètres. La profondeur de la nappe, par exemple, concerne l'épaisseur des matériaux que le polluant rencontre en s'infiltrant et en se dirigeant vers l'aquifère. Par conséquent plus la zone non saturée est épaisse, donc plus la nappe est profonde et plus les processus de dégradation, de retardation ou d'atténuation d'un polluant sont effectifs. Ces phénomènes dépendent donc de la nature des matériaux et de leur quantité donc entre la profondeur de la nappe, la nature des matériaux de la zone non saturée et même avec les matériaux du sol existent un lien et une influence réciproque. Un autre exemple si le matériel de la zone non saturée est réactif pour le polluant ou soluble alors il peut y avoir deux différents effets. Le premier, le polluant peut être retardé (effet positif). Le second, le matériel de la zone non saturée peut réellement augmenter la perméabilité et permet une introduction subséquente de polluant qui passe à travers plus rapidement avec une retardation très faible (effet négatif). Dans le cas d'un polluant réactif, l'importance d'une porosité secondaire doit être considérée.

L'épaisseur de la zone non saturée, son degré de fracturation et la fréquence ainsi que la diversité des couches influent sur la tortuosité, la longueur du cheminement et la dispersion du polluant qui traverse cette partie et par voie de conséquence sur le temps de séjour de celui-ci. Ce n'est pas seulement le temps de retard qui a de l'importance mais également le temps du contact des réactions.

Il est évident donc que tous les paramètres DRASTIC sont interactifs et dépendent des variables de chacun.

II.8. Interprétation de l'indice « Drastic »

L'indice de vulnérabilité Drastic représente une évolution du niveau de risque de contamination d'une formation aquifère. Ce risque augmente avec la valeur de l'indice. Celui-ci peut prendre une valeur maximale de 226 et une valeur minimale de 23.

Le principal de cette représentation consiste à diviser la valeur indicielle de chaque zone par le score maximum pouvant être atteint (226) en le multipliant par 100 afin d'exprimer la vulnérabilité en pourcentage. (F. Boucenna, 2009)

BIBLIOGRAPHIE

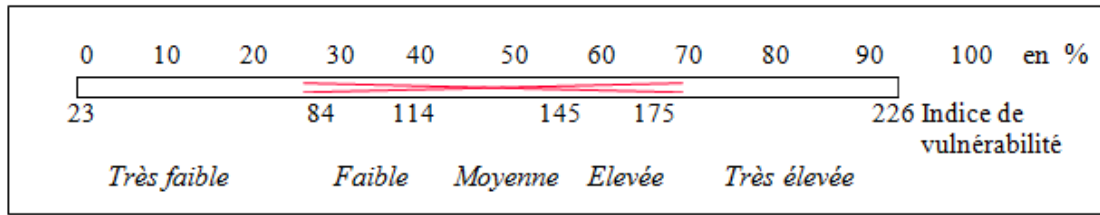


Figure. II.2. Diagramme des classes de vulnérabilité d'après la méthode Drastic

II.9. Principales étapes pour la construction des cartes de vulnérabilité (ALLER et AL, 1987)

Les principales étapes pour la réalisation des cartes de vulnérabilité sont les suivantes :

- a/ Acquisition des données.
- b/ Identification des unités hydrogéologiques.
- c/ Réalisation des cartes thématiques.
- d/ Délimitation des sous-unités.
- e/ Estimation des indices DRASTIC.

II.9.1. Acquisition des données

Pour l'application de la méthode "Drastic", il nous a fallu d'abord, rassembler le maximum d'informations sur ce sujet et la région étudiée. Les données nécessaires à l'estimation des paramètres caractérisant la vulnérabilité, ont été constituées, grâce à la compilation de différentes études hydrogéologique, géomorphologique, hydroclimatologique, pédologique et géophysique, de la plaine alluviale de l'oued El Hachem (Tableau 2.12). .(**F. Boucenna,2009**)

Tableau II.12. Information sur les sources de données

Paramètre " Drastic"	Principe source d'information et méthode d'évaluation
Profondeur de l'eau (D)	<ul style="list-style-type: none"> - Campagne piézométrique d'octobre 2014 - Carte piézométrique d'octobre 2014
Matériaux de l'aquifère (A)	<ul style="list-style-type: none"> - Carte géologique au 1/50 000 (feuille de Cherchell) - Coupes lithologiques de forages - Etude géophysique (prospection par méthode électrique C.G.G, 1967)
Matériaux du sol (S)	<ul style="list-style-type: none"> - Cartes géologique de Cherchell et carte pédologique de la région de Tipaza (au 1/50 000)
Topographie (T)	<ul style="list-style-type: none"> - Carte topographiques 1/25 000 (feuille topographique de Cherchell) - Carte des pentes topographiques Modèle Numérique de Terrain (images SRTM)
Impact de la zone non saturée (I)	<ul style="list-style-type: none"> - Les logs de forages - Coupes géo-électriques - Rapports géophysiques
Perméabilité (C)	<ul style="list-style-type: none"> - Etude hydrogéologique de la plaine alluviale de l'oued El Hachem - Données et rapports d'essais de pompages - Abaque de FREEZE et CHERRY, 1979
Recharge nette (R)	<ul style="list-style-type: none"> - Données climatiques des stations de Boukourdane - Coupes de forages - Description lithologique

II.9.3. Réalisation des cartes thématiques

Il existe essentiellement deux méthodes, la première manuelle et la deuxième informatisée.

II.9.3.1. Méthode manuelle

Une carte thématique est réalisée pour chacun des sept (07) paramètres considérés par la méthode DRASTIC. Sur chacune des cartes sont délimitées des zones en fonction des intervalles établis par le système de cotation. Ainsi, chacune des zones délimitées reçoit un indice partiel correspondant au produit (cote x poids). Les indices partiels semblables, ainsi obtenus, permettent de délimiter sur une carte thématique des zones homogènes.

Pour faciliter, l'établissement de la carte de synthèse des 7 cartes thématiques, il est conseillé de choisir des couleurs différentes pour chaque paramètre. Aussi le tableau suivant donne les couleurs utilisées par la méthode DRASTIC.

Tableau II.13. Couleurs utilisées par la méthode DRASTIC

Paramètres DRASTIC	Couleur
Profondeur de la nappe	noir
Recharge nette	vert
Matériaux de l'aquifère	rouge
Matériaux du sol	bleu
Topographie	violet
Impact des matériaux de la zone non saturée	marron
Conductivité hydraulique de l'aquifère	orange

II.9.3.2. Méthode informatique

L'informatisation de la méthodologie exige la discrétisation du territoire étudié en petits éléments réguliers distincts. Des éléments de 1km de côté sont utilisés à cette fin. Cette taille est issue d'un compromis entre la faible densité des informations disponibles et la nécessité d'utiliser le maillage le plus fin possible afin d'augmenter la résolution de la carte. De plus, l'indice DRASTIC a été conçu pour s'appliquer à des superficies de plus de 400 000 m² (Aller et Al ...1987)

II.10. Conclusion

Nous avons choisi la méthode Drastic pour l'application sur notre site d'étude car le test d'évaluation montre que la méthode Drastic est la plus fiable pour la caractérisation de la vulnérabilité car elle intègre plus de paramètres et peut être facilement appliquée à notre secteur d'étude. Le but recherché est de proposer un document de base au gestionnaire de l'eau en tant qu'outil nécessaire pour la prise de décision.

Résultats et discussions

III.1. Etablissement de la carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines selon le modèle DRASTIC

La carte des indices de degré de la vulnérabilité intrinsèque à la pollution des eaux souterraines, de la plaine alluviale de Oued el Hachem a été élaborée en se basant sur la cartographie de chaque paramètre présentés, nous allons, dans ce chapitre cartographier et interpréter les résultats sous forme cartographique de chaque paramètre.

III.1.2. Paramètres du modèle DRASTIC

III.1.2.1. Paramètre "Profondeur des eaux souterraines (D)"

Ce paramètre est très important pour l'évaluation de la carte de vulnérabilité pour un aquifère donné (Jourda et al ., 2007). L'évaluation de ce paramètre a été faite sur la base des plus récentes mesures piézométriques disponibles, effectuées en mois d'octobre 2014 au niveau de la nappe. Ces mesures montrent que la profondeur de la nappe varie de 14,9 m au sud (à côté de la ville de Sidi Amar) et 0,40 m au Nord (à l'embouchure de l'oued El Hachem). Ces différentes valeurs permettent de distinguer trois zones (Figure 3.1) où l'indice de vulnérabilité partiel varie entre 25 et 45.

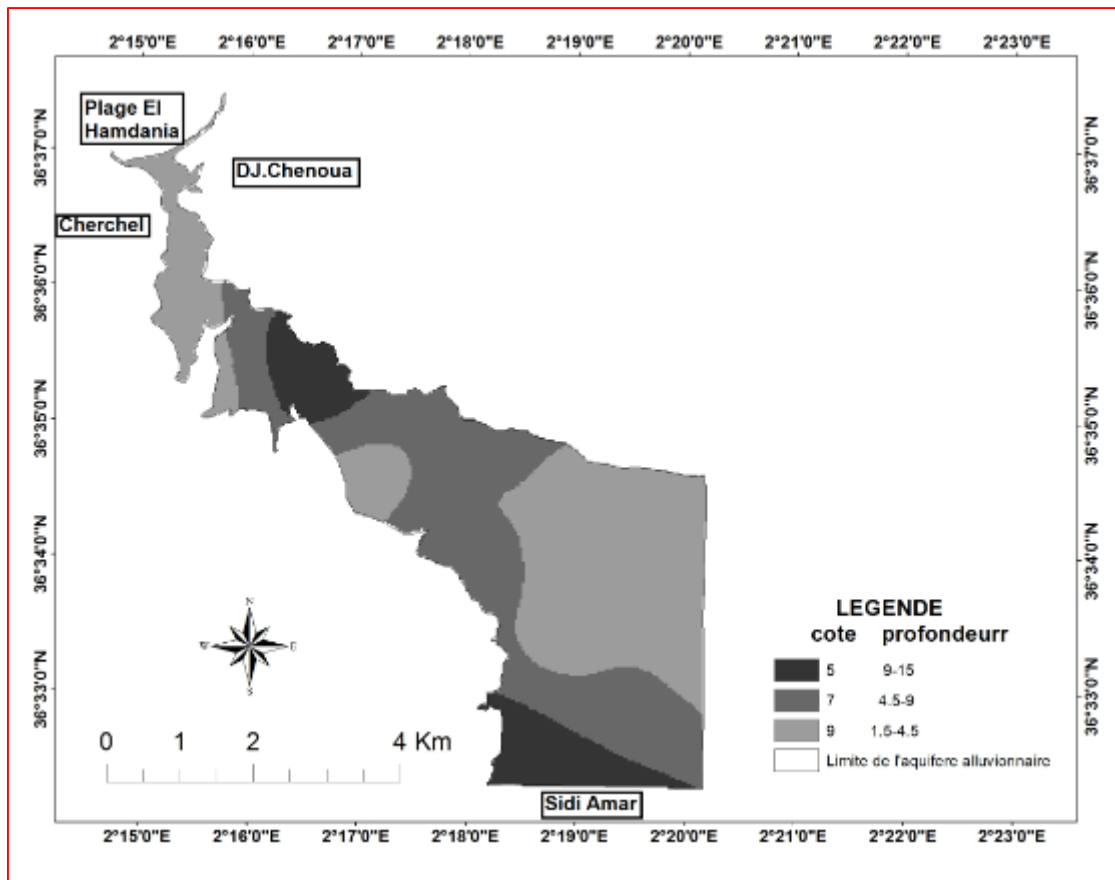


Figure III.1. Carte du paramètre profondeur des eaux souterraines "D"

III.1.2.2. Le paramètre "Recharge efficace de l'aquifère (R)"

La recharge efficace joue un rôle déterminant dans le transfert de la lame d'eau depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère. Ce paramètre est particulièrement difficile à évaluer lors des études hydrogéologiques (Aller et al 1987). Pour l'estimation de ce paramètre dans la nappe alluviale de l'oued El Hachem, nous avons, utilisé les résultats de bilans hydriques établis par plusieurs auteurs (Thorntwaite et Turc..). (F. Boucenna,2009)

La carte du paramètre "Recharge efficace", ainsi obtenue (Figure 3.2), montre deux domaines d'indices de vulnérabilité partiels distincts:

- L'un, couvrant la majeure partie de la plaine et du fait de la nature lithologique essentiellement sableuse ou graveleuse avec la présence d'un recouvrement argilo-limoneux qui limite un peu cette réalimentation. La lame d'eau de réalimentation varie entre 100 et 180 mm/an. Elle est affectée un indice de vulnérabilité partiel de 24 ;
- L'autre, coïncidant avec le lit de l'oued El Hachem, signalé par une forte réalimentation, (180 à 250 mm/an). Cette zone alors attribuée un indice de vulnérabilité partielle de 32, ce qui est considérable.

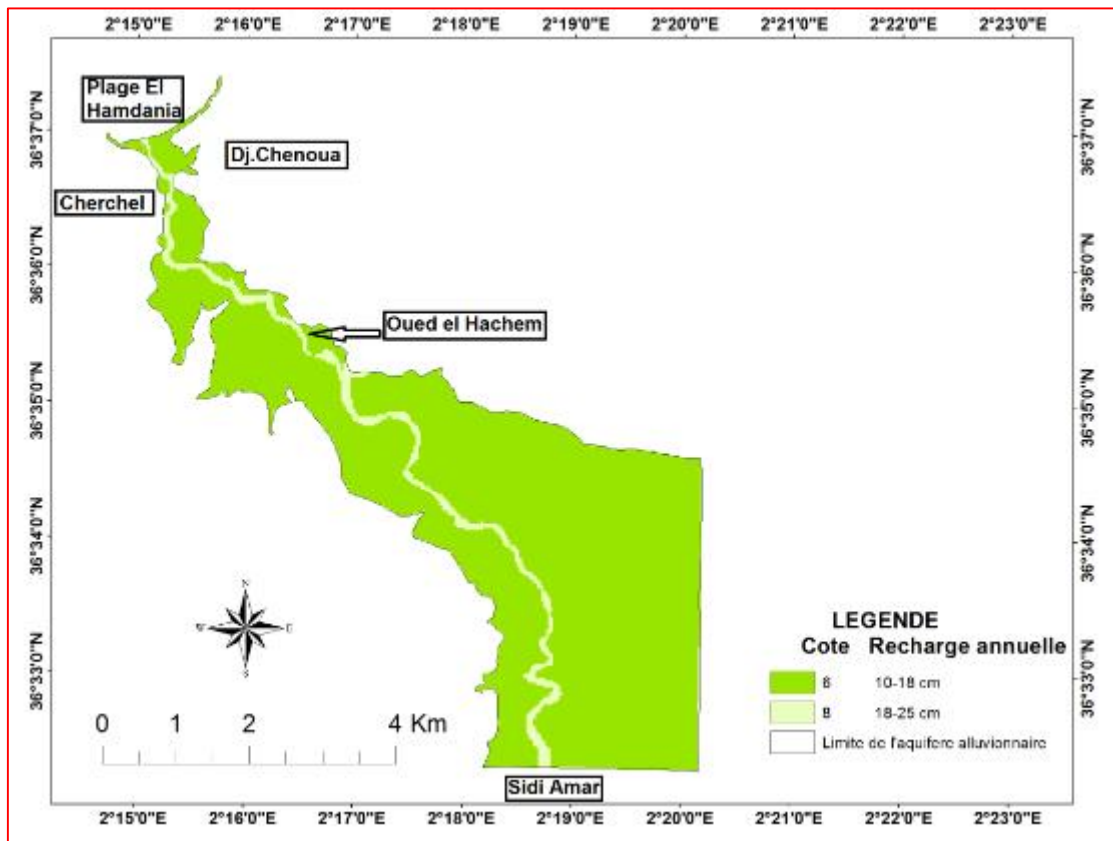


Figure III.2. Carte du paramètre recharge efficace "R"

III.1.2.3. Le paramètre "Nature du matériel aquifère (A)"

La description du matériel lithologique constituant la zone saturée et non saturée, a été réalisée grâce à la carte géologique de la région, les coupes géologiques et les logs stratigraphiques des forages captant l'aquifère alluvial de la région. Les rapports de prospections géophysiques et les coupes géo-électriques interprétatives ont été également exploités.

Le paramètre milieu aquifère désigne la lithologie de l'aquifère, il intervient dans le piégeage des polluants échappés au pouvoir d'absorption du sol. Son identification a été basée, beaucoup plus sur les coupes lithologiques des forages réalisés dans la région d'étude.

Il ressort de la compilation des tous ces documents, que le remplissage alluvial de la plaine est constitué d'un mélange de graviers, sables, galets, cailloutis conglomérats, argiles et roches métamorphiques. Conformément à la nature lithologique de l'aquifère, la carte relative à ce paramètre (Figure 3.3), montre pour l'ensemble de la plaine, hormis la partie Sud-Est où la présence d'une formation métamorphique, un "indice Drastic" élevé, variant entre 18 à 24. Seul le secteur Sud-Est (formation métamorphique) présente un indice partiel faible, de 9.

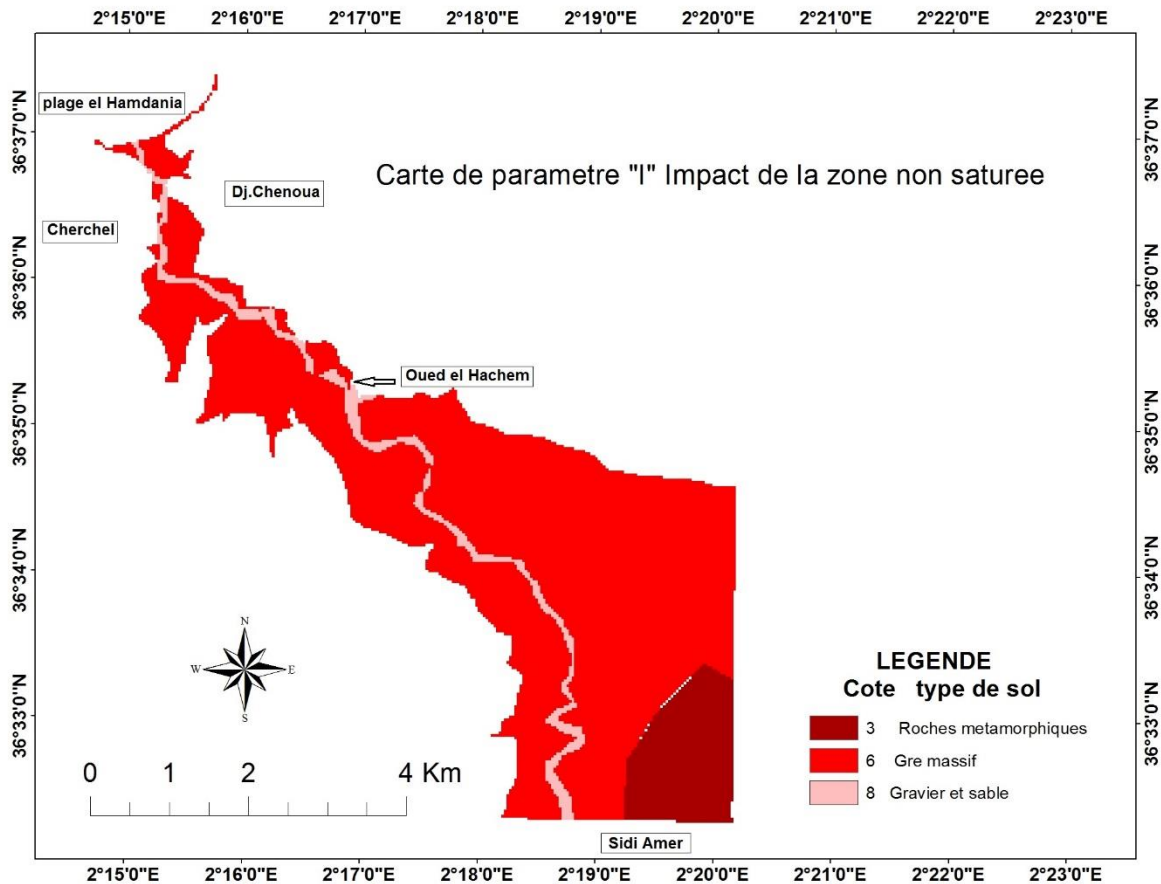


Figure III.3. Carte du paramètre milieu aquifère "A"

III.1.2.4. Le paramètre "Nature du sol (S)"

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

Pour affecter ces sols d'un indice Drastic, on utilise les tables de cotations, destinées à cet effet. Elles permettent de classer les sols en fonction de leurs textures et d'attribuer à chaque type, l'indice de vulnérabilité partiel correspondant. Les résultats obtenus (Figure 3.4) montrent:

- Des sols limono-sableux, plus perméables, occupant la majeure partie de la plaine. On leur attribue un indice de vulnérabilité partiel de 12 ;
- Les formations sableuse (rive droite du secteur centrale et la partie aval de la plaine) susceptibles de propager rapidement la contamination, sont affectées d'un indice "Drastic" partiel élevé de 18 ;
- Enfin, le lit mineur de l'oued El Hachem et les dunes côtières du secteur nord où la nappe est sub-affleurante sont affectés d'un indice de 20.

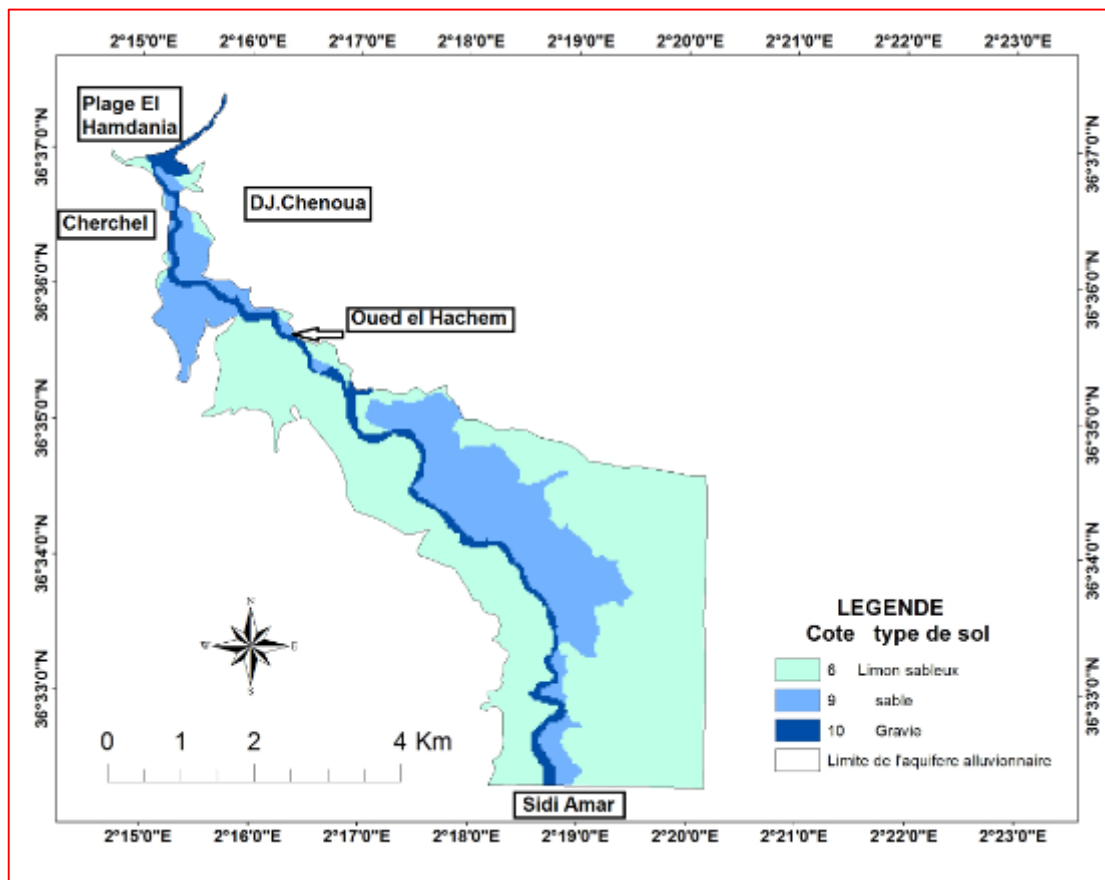


Figure III.4. Carte du paramètre nature du sol " S"

III.1.2.5. Le paramètre "Topographie (T)"

Le paramètre topographie est représenté par les degrés de pente en pourcentage, ce paramètre traduit l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des eaux superficielles vers, la nappe et reflète donc la capacité de ces eaux à introduire des agents polluants vers la nappe. En effet, plus le rapport de la pente des terrains est grand, plus le ruissellement des eaux n'est rapide et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. Par contre, une zone à faible pente a une tendance à retenir l'eau pendant une longue période, cela permet un plus grand potentiel de migration des contaminants de la surface vers la nappe par infiltration.

Dans la carte du paramètre "Topographie" (Figure 3.5), la plaine est assignée d'un indice de vulnérabilité partiel compris entre 1 et 10 :

- A l'embouchure et sur la frange le long du lit majeur, la pente topographique inférieure à 2 % et l'indice partiel est maximum qui a une valeur de 10 ;
- Presque partout ailleurs, où la topographie est moyenne les pentes comprises entre 2 % et 6 % , l'indice partiel est de l'ordre de 9 ;
- Enfin dans les zones de piémonts des élévations de sols sont importantes, induisent un indice partiel voisin de 1 à 5 ou les pentes comprises entre 6 % et > 18 %.

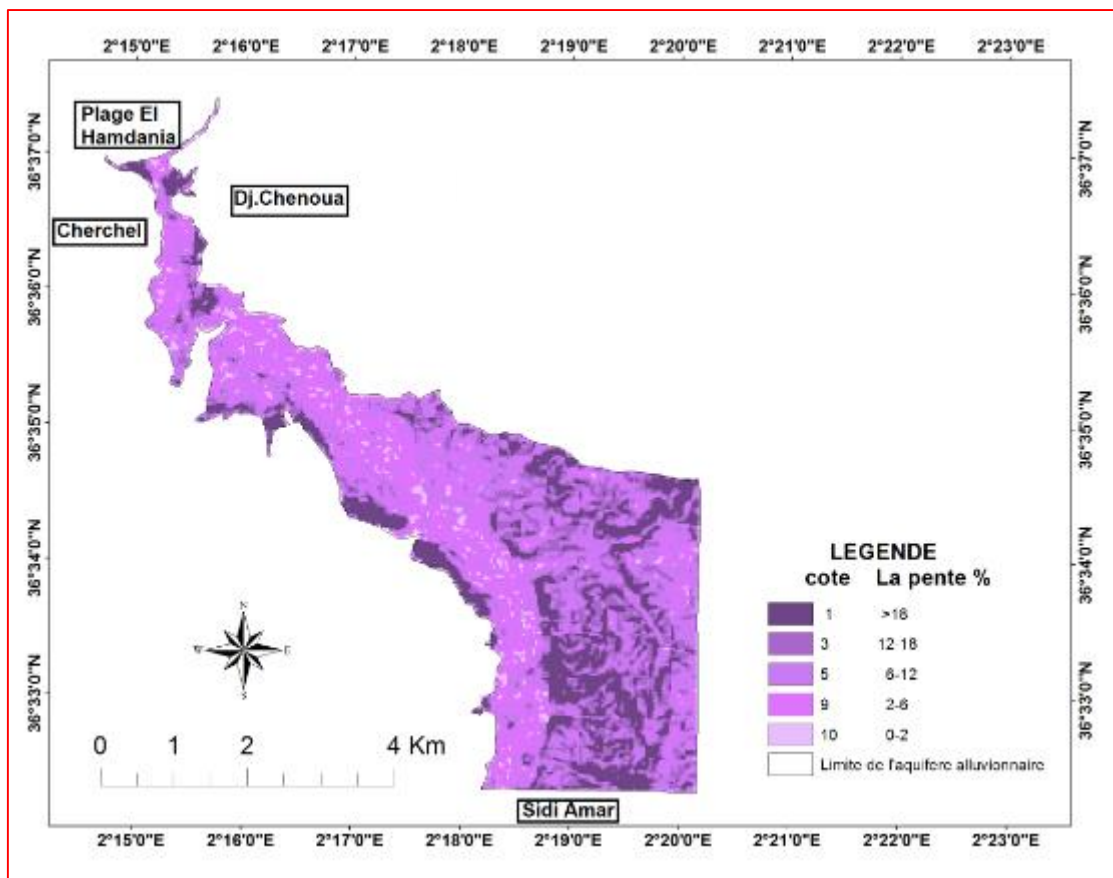


Figure III.5. Carte du paramètre topographie " T"

III.1.2.6. Le paramètre "Impact de la zone vadose (I)"

Le rôle de la zone non saturée est très important dans la méthode DRASTIC, étant donné qu'on considère que la nature et l'épaisseur de la zone située au dessus du niveau piézométrique, contrôlent de façon notable la vulnérabilité à la pollution des aquifères. Il a un poids d'une valeur 5.

La carte du paramètre "zone non saturée" (Figure 3.6) montre l'existence de deux domaines de vulnérabilité, couvrant la majeure partie de la plaine de l'oued El Hachem. Dans tout ce domaine, la zone non saturée, constituée essentiellement de formations perméables, favorise l'infiltration des substances polluantes, qui seraient éventuellement déversées en surface. Il est affecté d'un indice de vulnérabilité partiel élevé de 30. Cependant, les zones de piémonts sont délimitées par un indice moyen de 15.

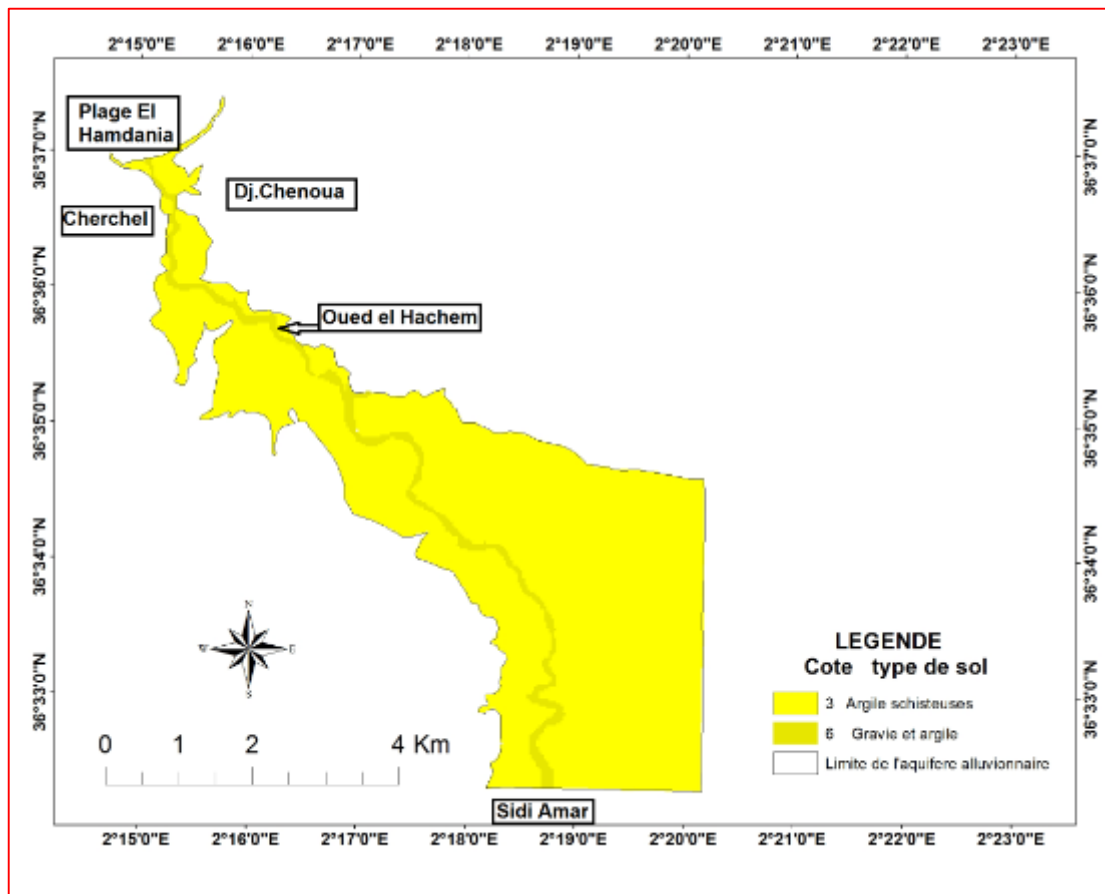


Figure III.6. Carte du paramètre impact de la zone vadose "I"

III.1.2.7. Le paramètre "Conductivité hydraulique (C)"

La conductivité hydraulique de la couche aquifère nous aide à connaître sur la vitesse de migration des polluants et leur dispersion dans la nappe du point de vue d'injection, de la

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

surface, jusqu'à la zone saturée et, par conséquent, leurs répartition spatiale dans l'aquifère. Plus ce paramètre est considérable, plus le transfert des polluants est rapide.

Ce paramètre est évalué par les résultats de l'interprétation d'essais de pompages réalisés dans les forages. Néanmoins, l'absence d'ouvrages de captages dans certaines zones, et par souci de couvrir l'ensemble de la plaine, nous avons eu recours à l'utilisation d'abaques pour la détermination de ce paramètre. Ces abaques (Annexe 1), se basent sur la nature lithologique de l'aquifère (Freeze et Cherry ; 1979), pour estimer la perméabilité.

Selon la nature lithologique de l'aquifère, les valeurs de la perméabilité obtenues par cette méthode, varient d'un point à un autre. Elles permettent néanmoins, d'identifier trois grandes zones de perméabilité (Figure 3.7), chacune caractérisée par son propre indice de vulnérabilité partiel :

- L'une située à l'embouchure, couvrant la bande côtière, et le long du lit mineur de l'oued El Hachem, caractérisée par une perméabilité élevée, supérieure à 9.4×10^{-4} m/s, et se traduisant donc par un indice de vulnérabilité partiel, élevé, égal à 30 ;
- La deuxième le reste la rive droite de la zone centrale et la partie avale de la plaine, à bonne perméabilité (22.9×10^{-5} m/s et 4.7×10^{-4} m/s), qui est affectée d'un indice de vulnérabilité partiel de 24 ;
- L'autre couvrant le reste de la plaine et les zones de piémonts de plus faibles valeurs de perméabilités (14.7×10^{-5} m/s et 4.7×10^{-5}), sont affectées d'un indice Drastic égal à 6.

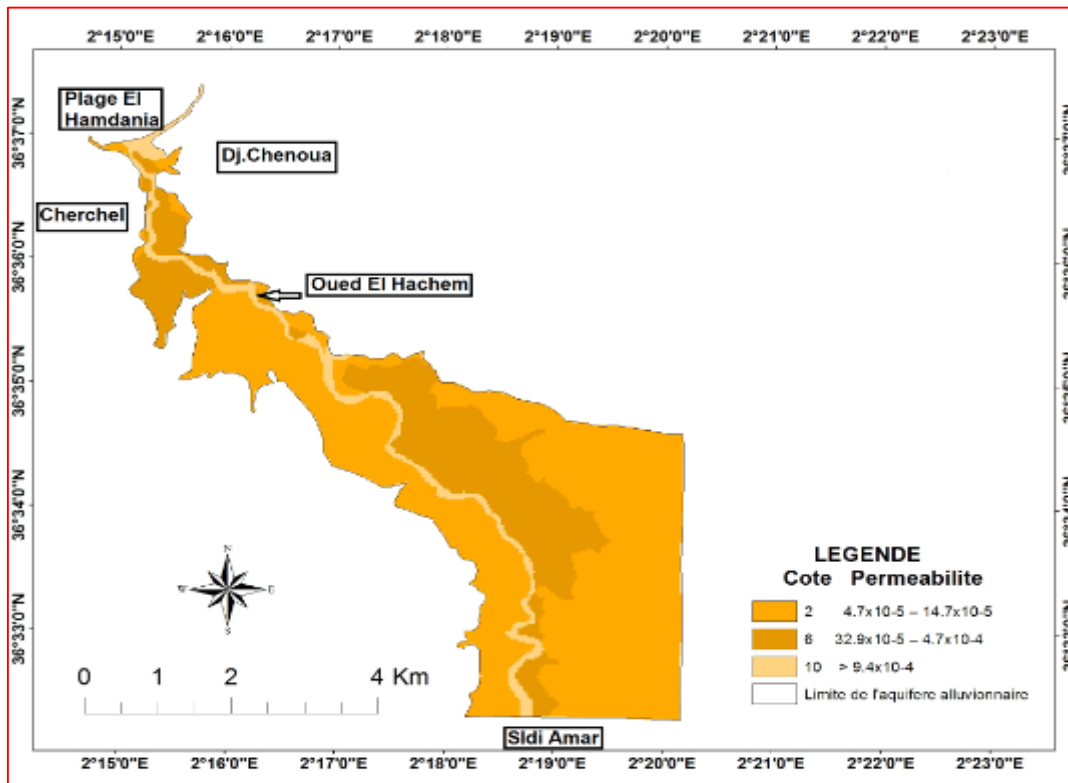


Figure III.7. Carte du paramètre conductivité hydraulique " C"

III.1.2.8. Carte synthèse de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

Soulignons tout d'abord, que cette méthode "DRASTIC", a été appliquée seulement à la nappe alluviale, pour laquelle nous avons pu rassembler les données nécessaires à l'étude.

La carte de vulnérabilité à la pollution fait la synthèse des sept cartes thématiques précédentes élaborées, Elle permet de visualiser les principales zones susceptibles d'être contaminées, et qui sont traduites par des indices de vulnérabilités des paramètres "DRASTIC".

La méthode qui a été utilisée pour l'élaboration de la carte de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à la pollution, est élaborée par sept paramètres, dite cartographie Modèle DRASTIC. Plusieurs cartes à indice partiel ont été élaborées puis superposées, la profondeur du niveau d'eau, impact de la zone vadose, la conductivité hydraulique sont les paramètres les plus efficaces par rapport à la recharge nette, milieu aquifère et le type du sol.

Avec cette méthode, les valeurs de l'indice de vulnérabilité DRASTIC varient de 92 à 175. Leur répartition spatiale permet de distinguer dans la plaine étudiée 3 zones de différents degrés vulnérabilités (Fig. 3.8), en relation étroite avec le réseau hydrographique.

a- La zone à vulnérabilité élevée correspond au front de mer, affectant plus particulièrement l'embouchure de l'oued El Hachem et pénètre à l'intérieur des terres suivant la gouttière topographique de l'oued El Hachem. Elle occupe environ 43 % de la superficie de la plaine étudiée. Son degré de vulnérabilité élevé, s'explique par la faible profondeur de la nappe (< 5 m) ainsi que par l'existence de la fraction grossière des sédiments (graviers et sable) dont le caractère perméable, favorise l'infiltration des éléments polluants présents en surface.

b- La zone d'indice de vulnérabilité moyen couvre environ 48 % de la zone d'étude, où malgré l'importance de fraction graveleuse et sableuse des aquifères, les nappes sont plus ou moins protégées de la pollution du fait de la relative profondeur par rapport à la surface (généralement plus de 5 à 10 m).

c- La zone d faible vulnérabilité, correspond aux bordures de la plaine et la partie Sud de la plaine et couvre 9 % de la superficie totale. Son faible degré de vulnérabilité est dû, d'une part à la profondeur du plan d'eau (environ 10 à 14 m) et d'autre part, à la faible perméabilité du sol de couverture et de la zone non saturée.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

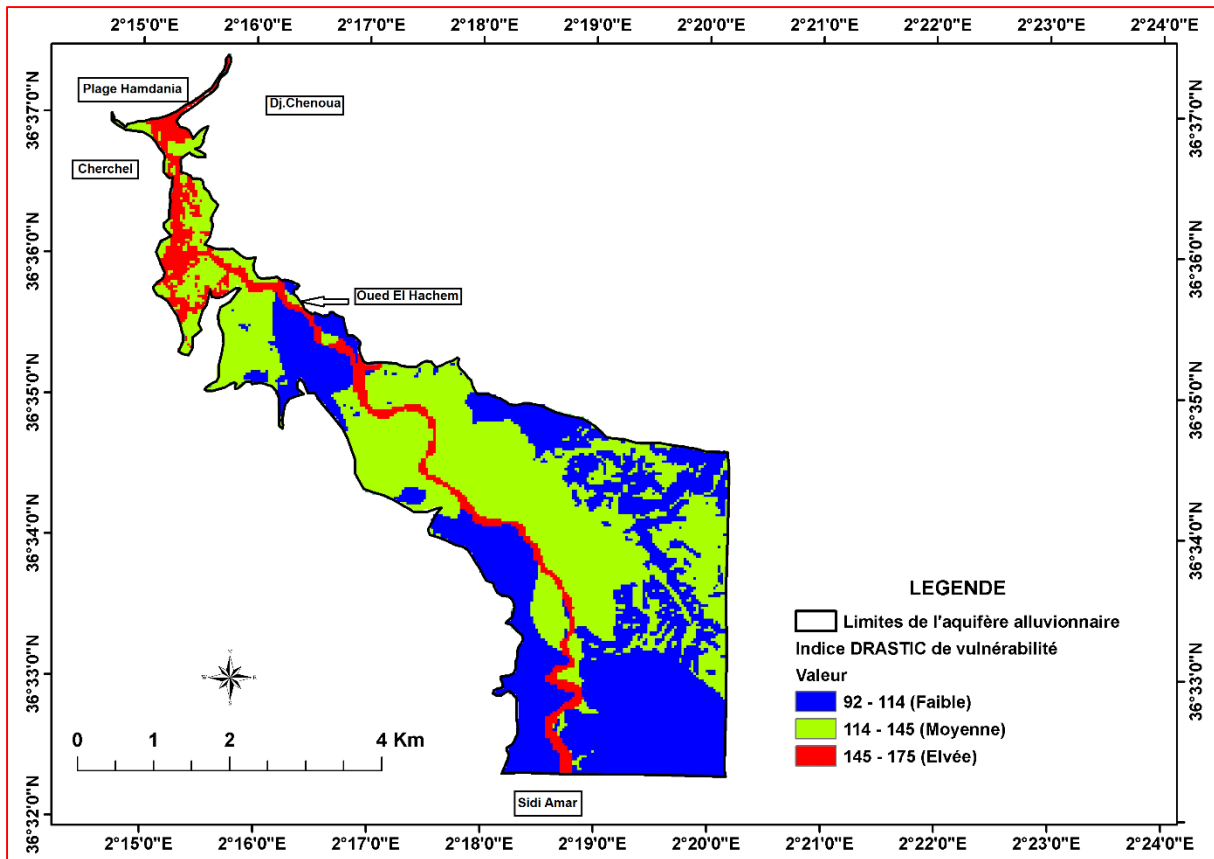


Figure III.8. Carte de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines par la méthode DRASTIC de la plaine Alluviale de l'oued El Hachem

III.1.9. Les précautions à prendre :

- éviter l'exploitation intensive des forages.
- Respecter l'espacement entre les forages.
- Procéder un fonctionnement cyclique des forages.
- Faire les analyses de l'eau périodiquement.
- Implanter les forages loin des zones qui ont une vulnérabilité a la pollution des eaux souterraine élevé. .

III.1.10. Conclusion

Cette carte serve à l'élaboration d'une politique visant à prévenir la pollution des nappes souterraines : les zones ciblées (les plus vulnérables) devront faire l'objet d'une réglementation sévère quant à d'éventuelles implantations d'activités potentiellement polluantes. Elles servent aussi à établir des priorités d'action en ce qui concerne la surveillance de la qualité des eaux souterraines ou la restauration des sites contaminés.

Cependant, il faut rappeler que cette carte de vulnérabilité a un caractère général et régional et que toute implantation, par exemple d'un lieu d'enfouissement sanitaire ou d'une usine

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

d'industrie, doit obligatoirement faire l'objet de d'étude hydrogéologique et de vulnérabilité d'impact détaillée.

Par conséquent, des mesures préventives sévères doivent être impérativement mises en œuvre, pour protéger ces ressources. Parmi les mesures à prendre, les plus importantes sont :

- le suivi de la qualité chimique des eaux,
- L'établissement d'un plan d'évacuation des eaux usées d'origine urbaine et industrielle,
- Le contrôle régulier des épandages d'engrais,
- la surveillance des eaux de l'oued El Hachem, des risques de pollution,

III.2. Etude de la qualité des eaux souterraines de la nappe alluviale de l'oued El Hachem

III.2.1. Introduction

Cette étude de la qualité des eaux souterraine est permet :

- de donner une idée de la qualité chimique de l'eau,
- de visualiser à l'aide de cartes en iso-teneurs, la répartition et l'évolution géographique des concentrations en éléments chimiques dissous,
- ✓ de disposer d'outils pour valider les cartes de vulnérabilité et de risque de pollution.

Cette étude a été faite grâce à la constitution d'un dossier analytique concernant 12 points d'eau ayant servi à la piézométrie. La campagne d'échantillonnage a été réalisée au mois de d'octobre 2014. Le choix des sites des prélèvements tient compte aussi d'une bonne répartition spatiale des points d'eau, de manière à couvrir de façon équitable, l'ensemble de la nappe et les analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources hydrauliques, Direction Régionale Centre - Blida).

Le tableau III.1, ci-après, présente les résultats d'analyse physico-chimique des points analysés

Tableau III.1. Analyses physico-chimique des eaux de la nappe alluviale de l'oued El Hachem (Octobre 2014)

Puits	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	CE	pH	R.C
	Mg/l								µmh/cm	/	
W039-001	121	40	83	3	94	211	366	5,0	1 620	8,3	949
W039-002	169	51	69	3	158	292	397	24,0	1 840	8,3	1 192
W039-004	187	63	147	3	238	204	519	78,0	2 700	8,2	1 695
W039-005	106	50	72	3	87	251	336	31,0	1 580	8,3	966
W039-006	122	38	64	2	94	156	351	4,0	1 490	8,3	858
W039-007	157	51	91	2	107	321	412	17,0	1 860	8,3	1 187
W039-009	152	51	43	3	132	208	350	41,0	1 580	7,8	1 238
W039-010	196	67	172	4	372	338	442	37,0	2 800	7,8	2 052
W039-012	209	52	91	3	93	397	397	20,0	1 980	7,8	1 229
W039-013	186	61	71	2	101	308	473	35,0	1 860	7,8	1 172

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

W039-014	178	57	102	2	198	309	458	6,0	2 080	8,0	1 504
W039-018	186	57	72	3	123	251	458	23,0	1 900	7,8	1 338

SOURCE : ANRH BLIDA

Alors que les normes de potabilité fixées par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) des principaux éléments chimiques sont portées sur le tableau ci-dessous (Tableau 3.2).

Tableau 3.2. Normes de potabilité des eaux selon l'OMS

Elément	Limites de potabilité
Ca²⁺	200 mg/l
Mg⁺²	150 mg/l
Na⁺	250 mg/l
SO₄²⁻	400 mg/l
HCO₃⁻	600 mg/l
Cl⁻	500 mg/l
NO₃⁻	50 mg/l
Résidu sec	1500 mg/l

III.2.2. Les paramètres physico-chimiques

III.2.2.1. Paramètres Physiques

Il s'agit des caractéristiques de l'eau telles que le pH, la conductivité, et la température de celle-ci, qui sont en relation avec le contexte naturel de l'eau.

➔ La conductivité

La conductivité électrique de l'eau représente sa capacité à laisser les charges électriques se déplacer librement. Elle dépend de la quantité des sels dissous (minéralisation globale).

Elle est donnée en $\mu\text{mho/cm}$ à 25 °C. Pour la zone d'étude, les valeurs de la conductivité varient entre 1490 et 2800 $\mu\text{mho/cm}$ respectivement aux points P6 et P10, ce qui indique une forte minéralisation des eaux pendant l'année 2014.

➔ Le potentiel hydrogène

Le pH est le mode de présentation de la concentration en ions hydrogènes libre H⁺, c'est à dire l'acidité ou l'alcalinité du chimisme de l'eau.

Les eaux de la nappe de l'oued El Hachem présente des valeurs de pH varie de 7,8 à 8,3 indiquant des eaux généralement légèrement basiques. Elles sont dans la frange de la norme de potabilité de l'OMS qui est de l'ordre de $6,5 < \text{pH} < 9,5$.

III.2.2.2. Paramètres chimiques

➔ Les Cations

Les cations analysés sont le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium.

☞ Le Calcium : Sa présence résulte principalement de l'infiltration des eaux météoriques à travers des formations carbonatées. La dissolution qui s'en suit est favorisée par le gaz carbonique provenant de l'atmosphère et du sol.



Dans le cas de la nappe étudiée, les concentrations en calcium montrent des valeurs qui varient de 121 à 209 mg/l respectivement aux points P01 et P12.

☞ Le Magnésium : Second élément intervenant dans la dureté totale des eaux, le magnésium est moins abondant que le calcium et le sodium. En effet, la majorité des puits de la plaine alluviale de l'oued El Hachem présentent des teneurs inférieures à la norme admissible de 150 mg/l, fixée par l'OMS. Les concentrations en magnésium varient entre 38 et 67 mg/l respectivement aux points P06 et P12.

☞ Le Sodium : Les teneurs en sodium admises par l'O.M.S (potabilité) sont de l'ordre de 250 mg/l. Les teneurs en sodium varient de 43 à 172 mg/l, respectivement aux points P09 et P10. Toutes les concentrations en Na sont dans les normes de potabilité.

☞ Le Potassium : Les teneurs en potassium très souvent en très faibles quantités dans les eaux, ne présentent pas d'inconvénient majeur. Toutes les concentrations en potassium sont inférieures à 4 mg/l.

➔ Les anions

Les anions analysés sont les chlorures, les sulfates, les bicarbonates et les nitrates.

☞ Les Chlorures : On les trouve en grandes quantités dans les eaux souterraines de la nappe étudiée. Comme précédemment, ils peuvent provenir, selon l'endroit, soit de l'intrusion marine (biseau salé) soit d'une contamination par les eaux usées domestiques et industrielles. Les teneurs observées s'échelonnent entre 87 et 372 mg/l. Elles sont dans la fourchette des normes de potabilité. La valeur minimale est observée dans le point d'eau P06 alors que la valeur maximale est observée dans le point d'eau P10.

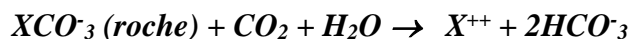
☞ Les Sulfates : Les sulfates sont présents dans l'eau en quantités variables. Leur présence résulte :

- ✓ De la solubilité des formations gypseuses dans le haut bassin versant ou du lessivage des niveaux argileux et marneux de la nappe,
- ✓ Des rejets d'eaux usées et industrielles contenant de l'acide sulfurique (H₂SO₄),

✓ L'utilisation d'engrais chimiques.

Dans la nappe étudiée, les teneurs en sulfates varient de 156 à 394 mg/l. Ces valeurs sont observées au niveau des points d'eau P06 et P12. Les teneurs élevées peuvent être dues à l'utilisation abusive des engrais chimiques (pratiques agricoles).

☞ Les Bicarbonates : Les bicarbonates sont le résultat de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, selon l'équation générale suivante :



La concentration des bicarbonates dans l'eau est fonction des paramètres suivants :

- Température de l'eau,
- Tension du CO₂ dissous,
- Concentration de l'eau en sels et nature lithologique des terrains traversés.

Dans le cas de la nappe étudiée, les teneurs en bicarbonates sont comprises entre 350 et 519 mg/l. Tous les points d'eau montrent que la concentration en bicarbonates de la nappe est élevée (> 350 mg/l).

☞ Les Nitrates : Les nitrates sont les polluants les plus souvent trouvés dans les eaux souterraines peu profondes du fait de sources ponctuelles (rejet d'eaux usées, fosses septiques) et diffuses (agriculture). Les concentrations en nitrates sont comprises entre 4 et 78 mg/l. On distingue un puits (P04) qui présente une teneur dépassant les normes de potabilité. Dans notre cas, la pollution par les nitrates dans l'endroit où se trouve le point d'eau P04 est dû à l'utilisation intense des engrais chimiques (terres agricoles).

III.2.3. Classification des eaux

Plusieurs méthodes de classification des eaux naturelles ont été définies par divers auteurs. On s'intéressera ici uniquement aux plus utilisées, pour déterminer le faciès hydrochimique.

III.2.3.1. Classification de Stabler (formule caractéristique)

A partir de la formule caractéristique de Stabler et en tenant compte de l'anion prédominant dans les eaux, nous obtenons trois principaux faciès chimiques, qui sont :

- Le bicarbonaté calcique avec 50,00 % des échantillons;
- Le sulfaté calcique avec 41,66 % des échantillons;
- Le chloruré calcique avec 8,34 %.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 3.3. Classification des eaux souterraines selon la formule caractéristique de Stabler

Faciès	Pourcentage des points (%)	Points d'eau correspondant
Bicarbonaté calcique	50,00	P01, P02, P04, P05, P06, P09

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Sulfaté calcique	41,66	P07, P12, P13, P14, P18
Bicarbonaté calcique	8,34	P10

III.2.3.2. Classification selon Scholler-Berkaloff

La représentation graphique d'une analyse d'eau sur le diagramme Scholler-Berkaloff permet :

- De comparer les eaux entre elles,
- D'apprécier leur potabilité,
- De déterminer le pH d'équilibre et le CO₂ libre.

Cette représentation graphique des analyses sur ce diagramme vertical logarithmique de Schoeller-Berkaloff montre que la moitié de nos échantillons présentent un caractère incrustant et l'autre moitié, un caractère agressif,

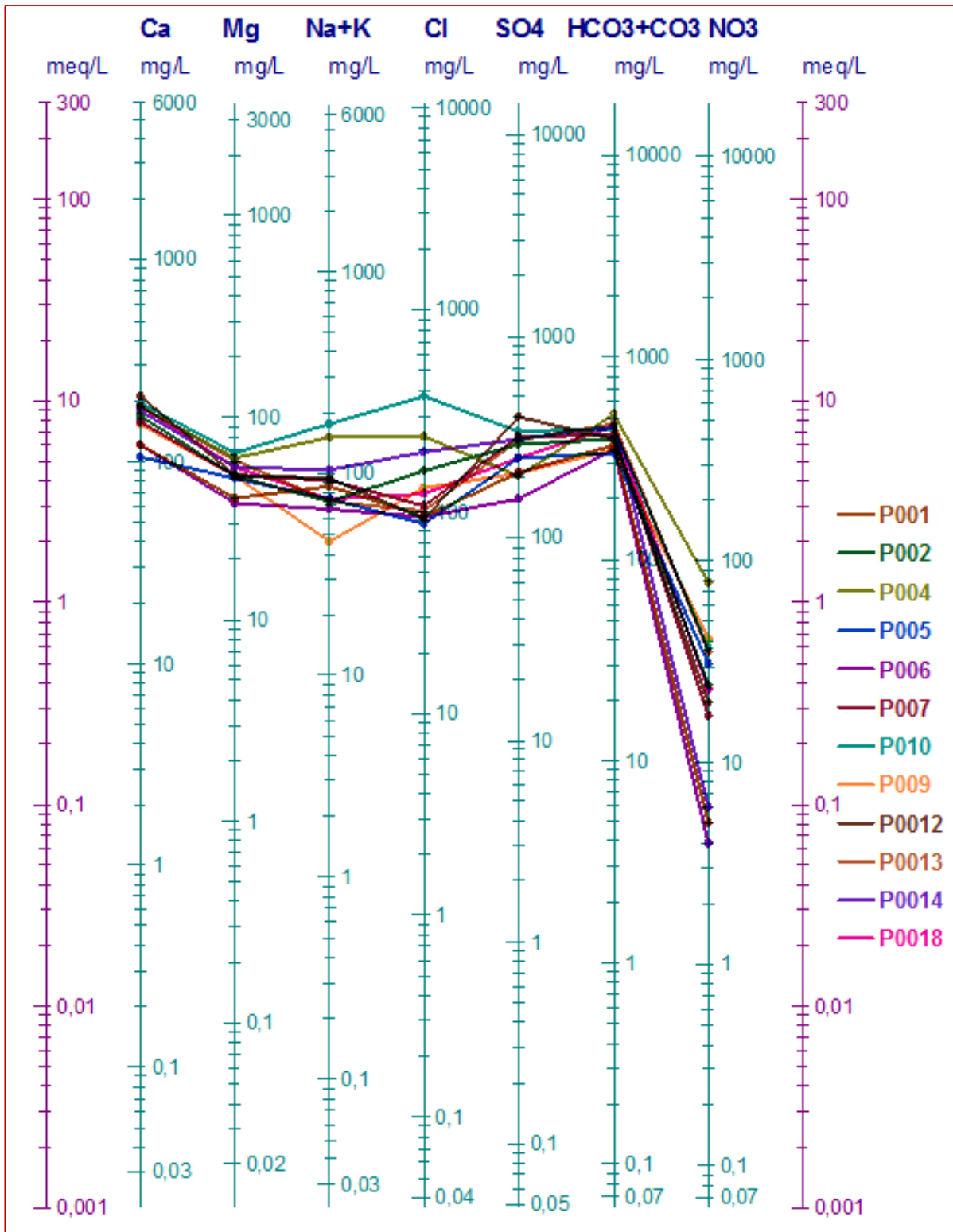


Figure III.9. Classification des eaux selon le diagramme vertical de Scheöller-Berkaloff

III.2.4. Conclusion

Tenant compte des résultats d'analyses chimiques et des normes de potabilité selon l'OMS, on peut conclure que, environ, la moitié des points d'eau analysés dans la nappe alluviale de

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

l'oued El Hachem sont classés comme des eaux non potables. Les facteurs qui nuisent à la qualité des eaux de la nappe sont :

- Les teneurs élevées en sulfates ;
- Les teneurs en nitrates.

Conclusion générale

Les eaux souterraines sont intrinsèquement sensibles à la contamination provoquée par les activités anthropiques et naturelles, leur traitement devient très coûteux ces dernières années. La prévention contre la contamination des eaux souterraines est essentielle pour une gestion efficace et durable. Dans ce mémoire, une tentative a été faite pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines de l'aquifère alluvial de l'oued el Hachem dans la wilaya de Tipaza, Algérie.

La vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination de la zone d'étude a été évaluée en utilisant le modèle DRASTIC à l'aide d'un logiciel des systèmes d'information géographique qui est : "ArcGis".

Sept paramètres de diverses sources ont été intégrés et cartographiés, à savoir, la profondeur des eaux souterraines, la recharge efficace de l'aquifère, l'effet de l'autoépuration de la zone vadose, le type de sol, les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, la conductivité hydraulique de l'aquifère et la pente topographique. Sept paramètres du modèle DRASTIC ont été cartographiés sur une base de données et exprimés en couches thématiques dans un SIG.

L'établissement de la carte de vulnérabilité sur la base du croisement entre les sept cartes thématiques a révélé que la plus grande partie de la plaine est caractérisée par un degré de vulnérabilité faible à moyenne et une vulnérabilité élevée au niveau de lit de l'oued et la bande côtière. A partir de l'analyse de la carte finale de la vulnérabilité obtenue en appliquant la méthode DRASTIC, nous constatons que le lit d'oued et la partie aval (bande côtière) sont les plus vulnérables.

Tenant compte des résultats d'analyses chimiques et des normes de potabilité selon l'OMS, on peut conclure que, environ, la moitié des points d'eau analysés dans la nappe alluviale de l'oued El Hachem sont classés comme des eaux non potables. Les facteurs qui nuisent à la qualité des eaux de la nappe sont :

- Les teneurs élevées en sulfates ;
- Les teneurs en nitrates.

Bibliographie :

Albinet M., Margat J., (1970) : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine, Bull. BRGM.

(ALLER et AL, 1987)

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., & Hackett, G. (1987): Drastic, a standardized System for evaluating groundwater pollution potential using Hydro Geological Settings. *Environnemental Research.*

Bedroune Mohamed et Sidi Moussa Mohamed Fouzi...ANRH 1996 : Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution - application de la méthode DRASTIC.

Boucenna.F,2009 : cartographie par les differentes methodes de vulnerabilite a la pollution d'une nappe cotiere cas de la plaine alluviale de l'oued djendjen (jijel, nord-est algerien)

Haddad.O ,2017 : Etude de la vulnérabilité d'une nappe d'eau souterraine basée sur l'approche méthodologique GALDIT (Cas de la nappe de BOUTELDJA, Nord EST Algérien.)

Haddouche .A,2011 :Etude comparative sur la vulnérabilité à la pollution des aquifères dans un milieu constrastes :Mitidja Est et Oued Miya .Mémoire de Magister .USTHB Alger

Jourda et al ., 2007. Jourda, J.P., Kouame, K.J., Adja, M.G., Deh, S.K., Anani, A.T., Effini, A.T., Biemi, J., 2007. Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. SIG 2007.

Louda.I ,2016 : Etude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la plaine alluviale du haut Sébaou par la méthode de PRASTCHIM.

Luc Champagne et Robert P.Chapuis : Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC

M.Albinet... (Jan. 1989) : Détermination du degré de vulnérabilité des captages en nappes alluviales.

M.Sinan et J.M.Touillard (Mai 1993) : Utilisation de la cartographie multicritère pour l'étude de la vulnérabilité des aquifères .Application au Sud du bassin hydrogéologique de l'Essonne

Touileb M., (1997) : Utilisation de la méthode Drastic et des Sig pour l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité des nappes souterraines à la pollution. Cas de la Mitidja Est. Thèse de magister. ENSH de Blida.

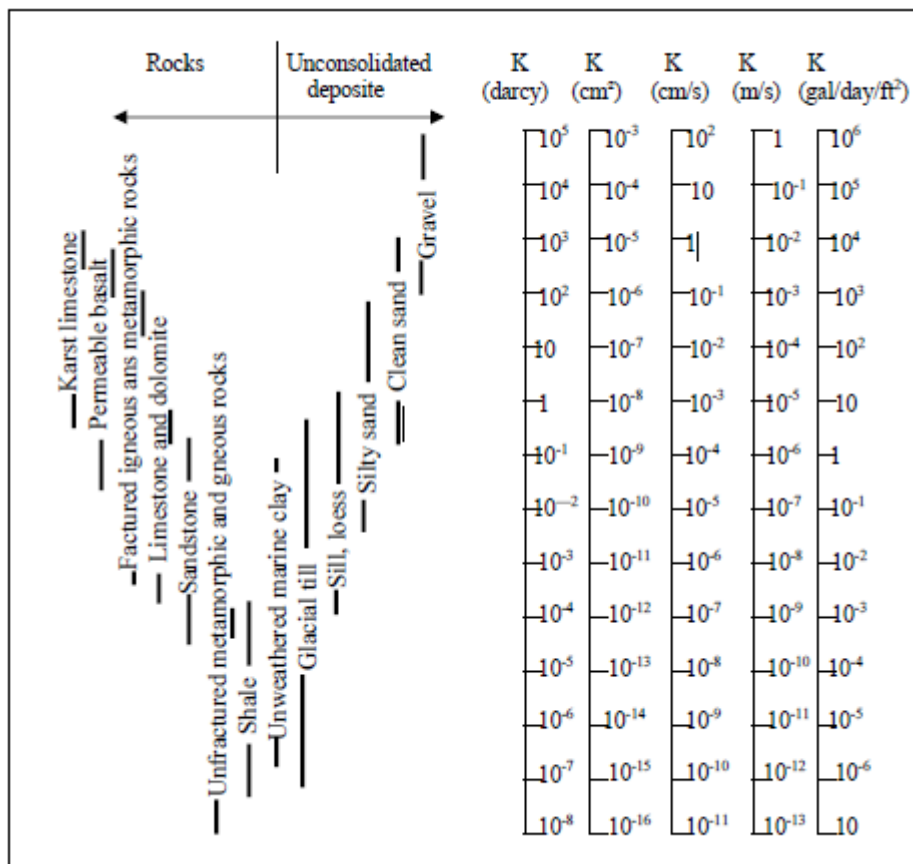
Abréviation :

AEP : Alimentation en eau potable.

ANRH : Agence nationale des ressources hydriques

Annexes:

*Range of values of hydraulic conductivity and permeability
(Freeze and Cherry)*



Conversion factors for permeability and hydraulic conductivity units
(Freeze and Cherry, 1979)

	Permeability, k*			Hydraulic conductivity, k		
	Cm ²	ft ²	darcy	m/s	ft/s	U.S.gal/day/ft ²
cm ²	1	1.08 x 10 ⁻³	1.01 x 10 ⁸	9.80 x 10 ⁻²	3.22 x 10 ³	1.85 x 10 ⁹
ft ²	2.29 x 10 ²	1	9.42 x 10 ¹⁰	9.11 x 10 ⁵	2.99 x 10 ⁶	1.71 x 10 ¹²
darcy	9.87 x 10 ⁻⁹	1.06 x 10 ⁻¹¹	1	9.66 x 10 ⁻⁶	3.17 x 10 ⁻⁵	1.82 x 10 ¹
m/s	1.02 x 10 ⁻³	1.10 x 10 ⁻⁶	1.04 x 10 ⁵	1	3.28	2.12 x 10 ⁶
ft/s	3.11 x 10 ⁻⁴	3.35 x 10 ⁻⁷	3.15 x 10 ⁴	3.05 x 10 ⁻¹	1	6.46 x 10 ⁵
U.S.gal/day/ft ²	5.42 x 10 ⁻¹⁰	5.83 x 10 ⁻¹³	5.49 x 10 ⁷	4.72 x 10 ⁻⁷	1.55 x 10 ⁻⁶	1

*To obtain k in ft², multiply in cm² by 1.08 x 10⁻³

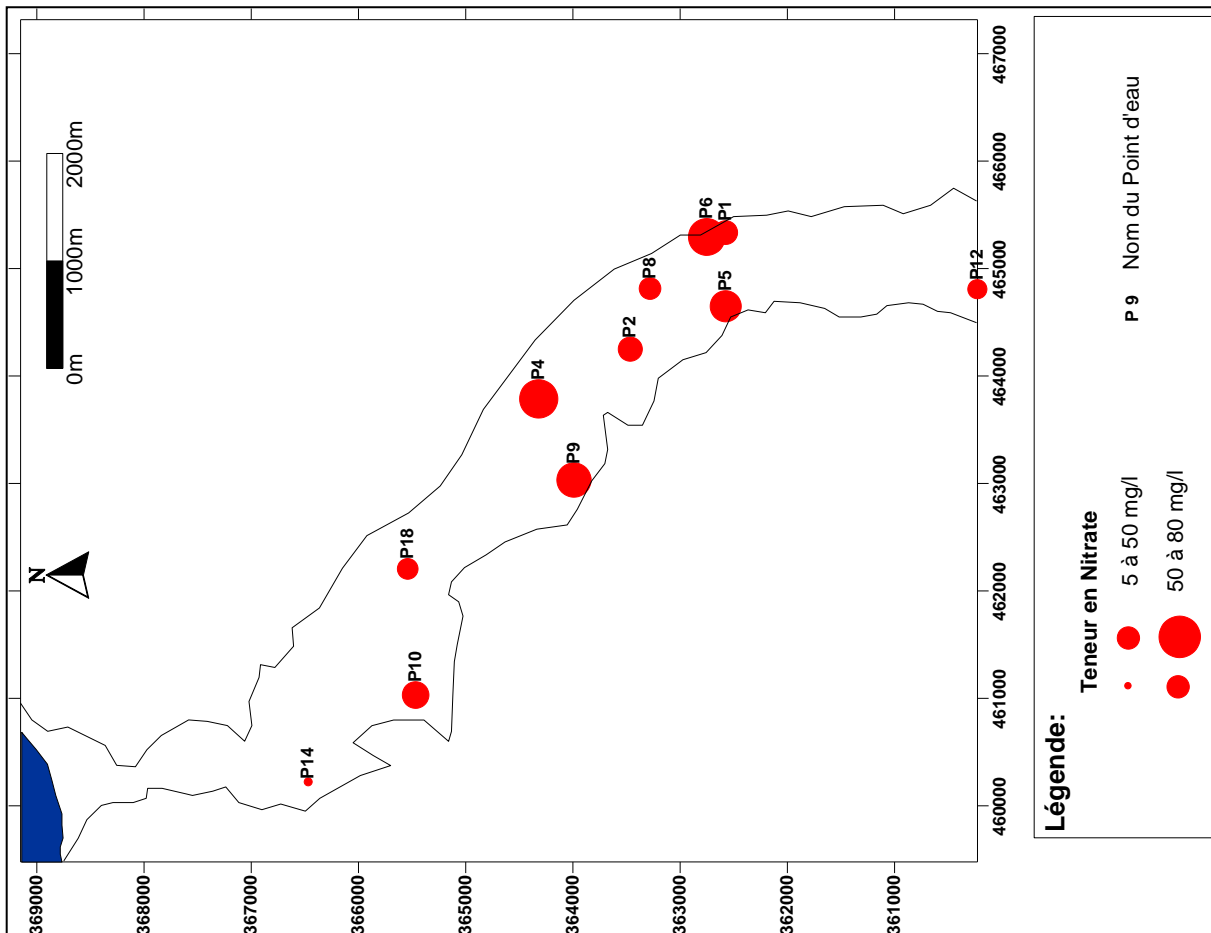
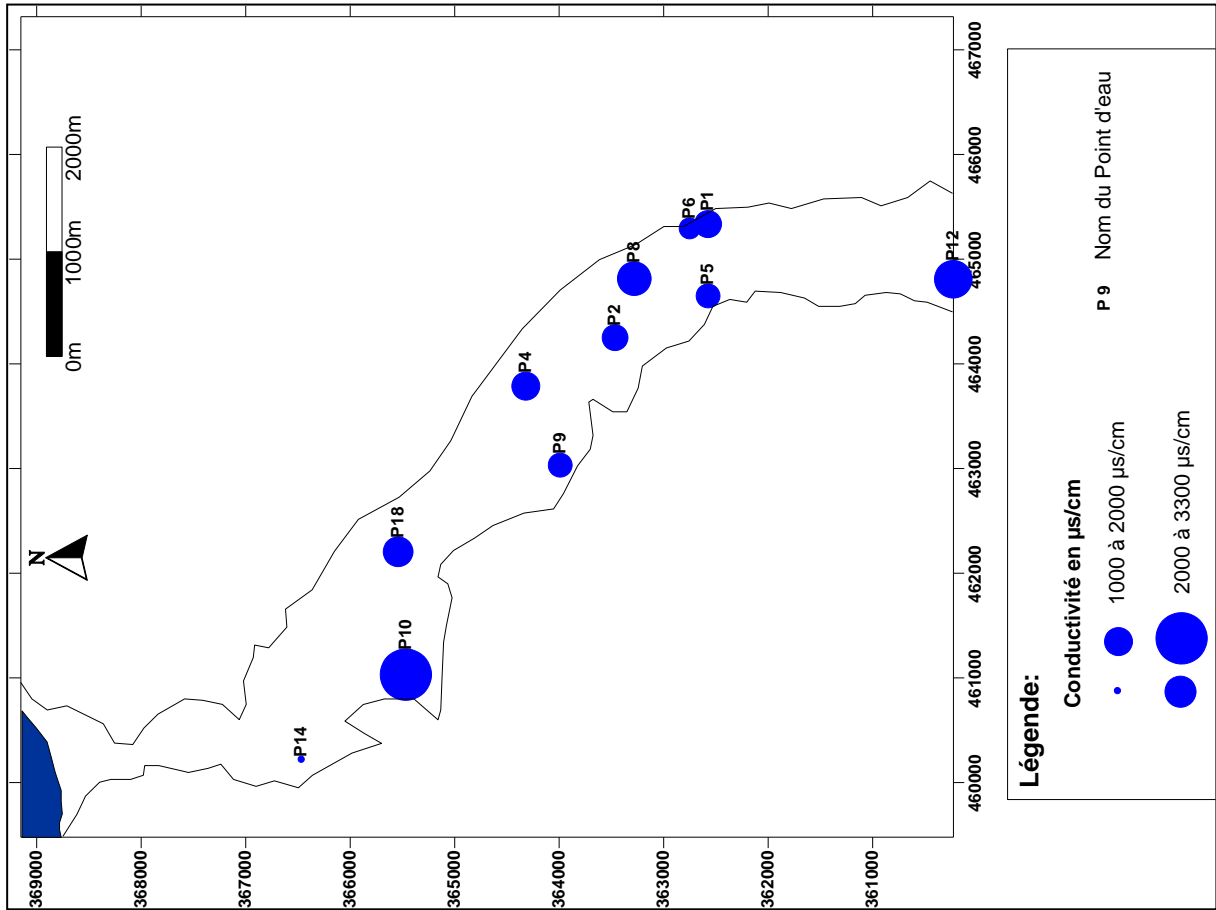


Figure 11: Carte de teneur en Nitrate (Qued El Hachem
Octobre 2010)



**Figure10: Carte de conductivité (Qued El Hachem
Octobre 2010)**